Horst Völz

Das Mensch-Technik-System

Physiologische, physikalische und technische Grundlagen – Software und Hardware

33 Edition expertSoft

Prof. Dr. Horst Völz

Das Mensch-Technik-System

Physiologische, physikalische und technische Grundlagen –
Software und Hardware

Mit 190 Bildern, 67 Tabellen
und 157 Literaturstellen sowie CD-ROM

expertverlag LINDE

Enthält:
1 CD-ROM

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Völz, Horst:
Das Mensch-Technik-System [Medienkombination] : physiologische, physikalische und technische Grundlagen – Hardware und Software / Horst Völz. – Renningen-Malmsheim : expert-Verl.; Wien : Linde
(Edition expertsoft ; Bd. 34)
ISBN 3-8169-1643-0 (expert-Verl.)
ISBN 3-85122-863-4 (Linde)

Buch. Mit 67 Tabellen und 157 Literaturstellen. – 1999

CD-ROM. 1999

ISBN 3-8169-1643-0 (expert verlag)
ISBN 3-85122-863-4 (Linde Verlag)

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 1999 by expert verlag, 71272 Renningen-Malmsheim
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Bezüglich der Datenverwendung von der CD-ROM gelten die dort im Teil (Pfad) „Rechte" aufgeschriebenen Festlegungen.

Vorwort

Wir haben heute einen breiten Umgang mit vielen technischen Geräten und Einrichtungen. Wir müssen diese „Technik" bedienen. Sie hilft und unterstützt uns in vielen Situationen. Sie bringt uns nützliche Information und angenehme Unterhaltung. Sie bereitet uns aber auch Probleme. Viele haben Schwierigkeiten im Umgang mit Automaten und Rechner – und wer kann schon einen Videorecorder richtig programmieren? In jedem Fall erfordert die neue Technik eine umfangreiche Interaktion gefordert. Dabei müssen wir uns einerseits auf die besonderen Eigenschaften und Gegebenheiten der Technik einstellen. Umgekehrt muß die Technik sich auf solche Signale und Ausgaben beschränken, die wir auch (gut) wahrnehmen können. So entstehen Bedingungen und Grenzen für eine allgemeine *Mensch-Technik-Schnittstelle*. Leider gab es bis jetzt keine systematische Behandlung der oft hochkomplexen und | oder[1] komplizierten Zusammenhänge. So mußten die Ingenieure die Schnittstellen ganz pragmatisch und intuitiv erstellen. Das Ergebnis kann folglich nicht immer ideal sein.

Die Interaktion wird aber in der Zukunft noch komplexer. So sind insbesondere für den virtuellen Raum wesentlich mehr Bedingungen einzuhalten. Daher müssen die Entwickler künftig deutlich mehr von der *physiologische Ausstattung des Menschen* wissen und einbeziehen. Was können wir wahrnehmen? Wie sind wir zu erreichen | zu beeinflussen, ohne daß wir es bewußt wahrnehmen? Auf welche Weise handeln wir bequemer? Auf solche Fragen gibt der erste Teil dieses Buches in den Kapiteln 1 bis 6 die Antworten. Sie betreffen medizinische, biologische, neuro-anatomische, physiologische und z. T. auch psychologische Grundlagen. Dabei wurde versucht, sie weitgehend in dem Sprachgebrauch des Technikers aufzubereiten. Ergänzend hierzu wurde auch ein Abschnitt über individuelle Kenngrößen eingefügt (Abschnitt 6.9). Sie werden ja immer mehr bei Zugangsberechtigungen jeder Art erfolgreich eingesetzt.

Der zweite Hauptteil des Buches zeigt, wie und wo technische Systeme diese Gegebenheiten nutzen können. Dazu ist zunächst eine Vielzahl physikalisch-chemischer Grundlagen erforderlich. Erst auf deren Basis ergibt sich ein relativ vollständiges Spektrum der Möglichkeiten. Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind sie im Kapitel 7 zusammengefaßt. Nur sehr spezielle Grundlagen sind bei den einzelnen Sensoren und Aktoren direkt behandelt. Das trifft z. B. auf die stimulierte Emission zu, die ja nur beim Laser Bedeutung besitzt. Die *Sensoren* übernehmen Information von Menschen. Das kann einmal durch unsere bewußte, aktive Tätigkeit erfolgen. Ohne, daß wir es merken und | oder wollen, kann es aber auch durch die Technik allein geschehen. Die hierzu notwendigen Grundlagen enthalten die Abschnitte 7.1 bis 7.6. *Aktoren* wirken auf den Menschen ein. Ihre Grundlagen enthalten die Abschnitte 7.7 und 7.8. Mehrfach ist auf indirektes Einwirken über Sonden und Felder hingewiesen.

Im dritten Hauptteil des Buches sind die bereits *vorhandenen Geräte | Systeme* erfaßt. Hierzu gehören u. a. Tasten, Maus, Kameras, Monitore, Lautsprecher und Mikrophone. Die Eingabegeräte enthält Kapitel 8, die Ausgabegeräte Kapitel 9. Vielfach ist es auch notwendig, „offline" zu arbeiten. Deshalb wurden für die Eingabe die Kamera- und die Scannertechnik und für die Ausgabe die Drucktechnik zusätzlich berücksichtigt.

Abgerundet wird der Inhalt durch einen kurzen Ausflug in informationstheoretische Grundlagen (Kapitel 9). Damit liegt hoffentlich ein Buch vor, das künftig dabei hilft, die Mensch-Technik-Schnittstelle besser und bewußter zu gestalten.

Da es bei einem solch komplexen Inhalt nicht ganz einfach sein dürfte, immer die gewünschte Stelle zu finden, wurden neue Wege beschritten. Einmal wurde ein umfangreiches *Sachwort-Ver-*

---

[1] Das Zeichen „|" wird in diesem Buch für zwei Zusammenhänge benutzt. Einmal im Sinne von „sowohl als auch" und zum anderen für ähnliche bzw. sich ergänzende Inhalte | Begriffe. Es wurde eingeführt, um die aus Patenten übliche Schreibweise „und/oder" zu vermeiden, die ja insbesondere bei Zahlenwerten mit dem Bruchstrich zu Verwechslungen führen kann. Zum anderen lassen sich so Alternativen textlich vereinfachen.

zeichnis (per Hand) erstellt. Zusätzlich befindet sich auf der anliegenden CD ein *Volltext* zur schnellen Suche. Dabei wurde bewußt auf das reine ASCII-Format zurückgegangen. So ist die gesamte Datei etwa nur 1 MByte klein. Folglich ist sie schnell in jeden Rechner und in jedes Betriebssystem zu laden und dann extrem schnell zu durchsuchen. Das hatte natürlich seinen Preis. Es fehlen alle Bilder, Tabellen und Formatierungen. Jedoch wurden die in den Tabellen und Bildern enthaltenen Begriffe – wiederum als ASCII-Text – eingefügt. Ferner sind in der Datei die Seitenzahlen des Buches, die Überschriften usw. eingetragen. So dürfte eine Volltextsuche immer sehr schnell und perfekt möglich sein. Bedenken Sie aber bitte das Urheberrecht. Hierzu sind – und das auch für alle Dateien – auf der CD genauere Angaben enthalten.

Die *Bilder* im Buch sind der Komplexität und des Umfanges wegen häufig zu eigenständigen Bildkomplexen zusammengefaßt. Dabei wurde – um den vorgegebenen Umfang für das Buch nicht zu überschreiten – zuweilen bis an die Grenze des Lesbaren gegangen. Auch hierzu befindet sich aber Hilfe auf der CD. Alle Bilder sind als .PCX-Dateien mit einer einheitlichen Breitenauflösung von 2000 Pixeln als reine Schwarz-weiß-Bilder vorhanden. Daher sind auch diese Dateien bei großer Auflösung recht klein. Von einer Einordnung der originalen .CDR-Dateien wurde aus mehreren Gründen abgesehen. In einer Vereinbarung mit dem Autor sind aber auch sie erhältlich.

Schließlich sei noch auf die *geschichtliche Datenbank* hingewiesen, die sich in mehreren Datei-Formaten auf der CD befindet. Da diese Daten ständig aktualisiert werden, kann von Autor immer jeweils neueste Versionen gegen Erstattung der Unkosten abgefordert werden.

Das Buch ist für mehrere Gruppen gedacht. Einmal dürfte es jenen Ingenieuren nützlich sein, die Ein- und Ausgabe-Hardware und | oder die zugehörige Software, einschließlich der Anpassungen dazu entwickeln | herstellen. Weiter könnte es für jene vorteilhaft sein, die solche Technik konfigurieren | einsetzen | betreiben. Aber auch bei Kauf- und Einsatz-Entscheidungen kann es hilfreich sein. Nützlich dürfte es auch für Studierende technischer Fächer an Hoch- und Fachschulen sein. Selbst allgemein interessierte Laien werden viele Anregungen | finden. Entsprechend der Breite der Grundlagen wird nur solides Abiturwissen in Biologie, Physik und Informatik vorausgesetzt. Auf mathematische Tiefe wurde weitgehend verzichtet. Die umfangreichen Zeichnungen, Schemata und Tabellen dienen der besseren Veranschaulichung der oft komplexen Zusammenhänge.

Dem Manuskript gingen Lehrveranstaltungen an der Freien Universität Berlin und an der Technischen Universität Berlin voraus. So entstanden zwischendurch mehrfach Skripte, Notizen und Folien. Sie bildeten den Grundstock des Buches. Die Studenten gaben dabei in vielen Diskussionen u. a. Anregungen zur besseren Darstellung. Schon während der Abfassung wurden die Texte von weiblichen | männlichen Kollegen und Freunden kritisch gelesen. Dadurch ergaben sich teilweise beachtliche Änderungen. Besonderer Dank gebührt Herrn Helmut Degen (FU Berlin). Hier war von Vorteil, daß seine Dissertation dem Thema sehr nahe lag. So ergab sich immer wieder eine sehr konstruktive Diskussion. Sehr gründlich wurde das Manuskript – quasi in Schlußredaktion – von Frau Dr. Ursula Findeisen und Herrn Dr. Berndt Findeisen gelesen. Ihnen gilt mein Dank für vielfältige sachliche und inhaltliche Hinweise. Weiter möchte ich Frau Sabine Hagedorn (TU) für das ständige und beharrliche Aufzeigen von formalen Mängeln und unklaren Ausdrucksweisen danken. Aber auch meiner Frau Ruth Roma-Völz habe ich herzlich zu danken. Sie hat das Manuskript aus der Sicht einer Nichtfachfrau gründlich gelesen und dabei gleichzeitig wohlwollende stilistische Kritik geübt. Last but not least gilt mein Dank auch den Mitarbeitern des Verlages. Erneut habe ich hier – wie schon bei meinem Speicherbuch – eine unwahrscheinlich angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit erlebt. Damit müßte eigentlich alles bestens bestellt sein. Ich weiß aber nur zu gut, daß stets Mängel übrig bleiben. Hierfür trage ich die Schuld allein und bitte daher den Leser um Nachsicht.

H. Völz

Inhaltsverzeichnis

1	**Überblick und Einführung zum Anliegen**	**1**
1.1	Die technische Seite	2
1.2	Die menschliche Seite	4
1.3	Zu den Informationsflüssen	6
2	**Biologisch-anatomische Grundlagen**	**9**
2.1	Biologische Zellen	9
2.2	Zellpotential als Membraneigenschaft	10
2.3	Das Neuron	11
2.4	Dynamik der Zellmembran	13
2.5	Erregungsfortleitung	14
2.6	Sinnesphysiologie	15
2.7	Einteilung und Eigenschaften der Sinne	15
2.8	Einfache Neuronenschaltungen	20
3	**Sehen**	**22**
3.1	Das Auge	22
3.1.1	Aufbau des Auges	22
3.1.2	Die Netzhaut	22
3.1.3	Die Sehzellen	23
3.1.4	Signalverarbeitung und Steuerung	24
3.2	Wichtige Kenngrößen	26
3.2.1	Lichtmaße	26
3.2.2	Abbildungsgüte	26
3.2.3	Adaption	27
3.2.4	Auflösungsschwellen	28
3.3	Farben	29
3.3.1	Wahrnehmung und Lichtwellenlänge	29
3.3.2	Physiologische Farbmessung	30
3.3.3	Lichtquellen und Farbtemperatur	33
3.3.4	Körperfarben	34
3.3.5	Additive und subtraktive Farben	37
3.3.6	Farbräume	38
3.3.7	Unterscheidbare Farben	40
3.3.8	Farbmanagement	41
3.3.9	Zum Gebrauch von Farben	42
3.4	Bilderkennung	43

4	**Hören**	**45**
4.1	Strukturen des Gehörs	45
4.2	Die Schallanalyse	47
4.3	Grundzüge der Wanderwellentheorie	49
4.4	Die Hörbahn	50
4.5	Schallmessungen	51
4.6	Hörbereich und Kenngrößen	53
4.7	Richtungs-, Entfernungs- und Raumhören	56
4.8	Zur Raumakustik	57
5	**Weitere Sinne und Vergleich**	**60**
5.1	Mechanische Sinne	60
5.1.1	Hautsinn	60
5.1.2	Propriozeption	62
5.1.3	Körperabbild im Gehirn	63
5.2	Gleichgewicht	64
5.3	Temperatur	64
5.4	Schmerz	65
5.5	Innensinne	67
5.6	Riechen	67
5.7	Schmecken	69
5.8	Vergleich der Sinne	71
6	**Aktivitäten des Menschen**	**73**
6.1	Die Muskeln	73
6.2	Sprache und Gesang	75
6.2.1	Phonation	76
6.2.2	Artikulation	77
6.3	Drüsen	79
6.4	Signal-Ableitungen	79
6.5	Ableitungen vom Gehirn	80
6.6	Gedächtnis	82
6.7	Lernen und Superzeichen	86
6.8	Biorhythmen	87
6.9	Identität von Personen	88
6.10	Gefahren	91

7	**Physikalisch-chemische Grundlagen**	**92**
7.1	Überblick und Systematik	92
7.2	Mechanische Sensoren	95
7.2.1	Schalter und Tasten	95
7.2.2	Dehnungsmeßstreifen	97
7.2.3	Piezotechniken	98
7.2.4	Bewegung und Beschleunigung	99
7.3	Magnetische Sensoren	100
7.3.1	Hall-Effekt	101
7.3.2	Feldplatte, Magnetoresistivität und Magnetdiode	102
7.3.3	Magnetostriktion	102
7.4	Optische Sensoren	103
7.4.1	Photowiderstand	103
7.4.2	Photoelement	104
7.4.3	Photodiode	104
7.4.4	Photozelle und Photomultiplier	105
7.5	Thermische Sensoren	106
7.6	Chemische Sensoren	107
7.6.1	Potentiometrie	108
7.6.2	Feuchte-Sensoren	108
7.6.3	Gas-Sensoren	109
7.6.4	MOS-FET-Sensoren	110
7.6.5	Bio-Sensoren	110
7.7	Grundlagen der Ausgabe	111
7.7.1	Überblick	111
7.7.2	Mechanische Ausgaben	112
7.7.3	Magnetismus	113
7.7.4	Elektrostatik	114
7.7.5	Piezo-Effekte	115
7.7.6	Magnetostriktion	116
7.7.7	Richtcharakteristiken	116
7.7.8	Erzeugung von Elektronen	117
7.7.9	Gasentladungen	120
7.7.10	Beeinflussung von Elektronen	123
7.8	Grundlagen für Anzeigen	126
7.8.1	Mögliche Varianten	126
7.8.2	Leuchtphosphore	128
7.8.3	Elektrolumineszenzzellen	130
7.8.4	Flüssigkristalle	131
7.8.5	Ansteuerung von LCD	134
7.8.6	Abkürzungen für Flüssigkristalle	137
7.8.7	Das Bändermodell	138
7.8.8	LED	140
7.8.9	Laser	142
7.8.10	Sonstige einfache Anzeigen	145
7.8.11	Lichtleiterfasern und dichroitische Folien	147

8 Eingabetechniken ... 149
8.1 Eingabe und Interaktion ... 149
8.2 Tasten, Schalter und Regler ... 150
8.3 Maus und Verwandtes ... 152
8.3.1 Aufbau der Maus ... 154
8.3.2 Mausähnliche Eingaben ... 155
8.3.3 Gameport und Joystick ... 157
8.3.4 Datenhandschuh ... 158
8.4 Tabletts und bildschirmbezogene Varianten ... 159
8.4.1 Etwas Geschichte ... 160
8.4.2 Grafiktabletts ... 161
8.5.3 Touchscreens ... 162
8.5 Akustische Eingaben ... 165
8.5.1 Systematik ... 165
8.5.2 Mikrophontypen ... 166
8.5.3 Frequenzgänge ... 168
8.5.4 Sondermikrophone und Zubehör ... 169
8.5.5 Stereotechnik ... 171
8.5.6 Musik- und Spracherkennung ... 173
8.6 Bildaufnahme ... 177
8.6.1 Geschichte ... 177
8.6.2 Systematik ... 178
8.6.3 CCD-Sensoren ... 180
8.6.4 Video-Aufnahme-Röhren ... 183
8.6.5 Digitale Kameras und Videotechnik ... 185
8.6.6 Scanner ... 189
8.6.7 Barcode und OCR ... 194
8.7 Bewegungserfassung ... 195
8.8 Ergonomie und Behinderte ... 199

9 Ausgabetechniken ... 202
9.1 Überblick ... 202
9.2 Bildausgaben ... 204
9.2.1 Bildröhren ... 205
9.2.2 Farbbildröhren ... 206
9.2.3 Fehler bei Bildröhren ... 209
9.2.4 Strahlungen bei Monitoren ... 210
9.2.5 Betriebswerte ... 211
9.2.6 Flache Bildröhren ... 216
9.2.7 Andere Flachdisplays ... 218
9.2.8 Großprojektion ... 219
9.2.9 Individuelle Displays ... 223
9.2.10 Stereobildtechniken ... 226

9.3 Schallausgaben 234
9.3.1 Schallausbreitung und -erzeugung 234
9.3.2 Schallnutzung und -aufbereitung 236
9.3.3 Arten der Schallausgabe 242
9.3.4 Erzeugung von Schwingungen 243
9.3.5 Elektrodynamische Lautsprecher 244
9.3.6 Verbesserung der Abstrahlung 248
9.3.7 Lautsprechersysteme 250
9.3.8 Kopfhörervarianten 254
9.3.9 Schallfeldnachbildungen 256
9.3.10 Etwas Elektronik 260
9.3.11 verwertbare Dynamik 261
9.4 Hardausgabe 263
9.4.1 Überblick 263
9.4.2 Bilderzeugung aus Punkten 266
9.4.3 Laserdrucker 269
9.4.4 Weitere Drucker mit Licht 272
9.4.5 Tintenstrahldrucker 273
9.4.6 Sonstige thermische Drucker 276
9.4.7 Impact-Drucker 278
9.4.8 Sonstige Drucker 280
9.4.9 Plotter 281
9.4.10 Druckmaterialien 282

10 Informationstheorie 287
10.1 Stoff, Energie und Information 289
10.2 Das Getragene 291
10.3 Definition von Information 293
10.4 Kontinuierlich, diskret, digital, analog 295
10.5 Redundanz und relevanz 298
10.6 Shannon-Theorie diskreter Werte 301
10.7 Kontinuierliche Signale 304
10.8 Gibt es ein Informationsfeld 307

11 Anhang 310
11.1 Hinweise zur CD-ROM 310
11.2 Literaturverzeichnis 311
11.3 Sonstige Verzeichnisses 317
11.3.1 Elemente, Verbindungen, Substanzen 317
11.3.2 Abkürzungen 317
11.3.3 Personen und zugehörende Begriffe 318
11.3.4 Sachwortverzeichnis 320

1 Überblick und Einführung

Gleich zu Beginn: Für mich existiert eine *Welt*, in der ich lebe und handle. An dieser Stelle interessiert nicht, ob und | oder wie gut sie erkennbar ist[1]. Zu dieser Welt gehört u. a. alles Technische, wie Geräte, Maschinen, Gebäude und Einrichtungen. Hierzu sage ich im folgenden zum einfacheren Sprachgebrauch *Technik*. Von dieser Technik können wir einen Teil *beobachten*. Dabei sollen auch solche Sinne, wie Hören, Riechen, Fühlen usw. berücksichtigt sein. Auf einen weiteren (sich z. T. damit deckenden) Abschnitt der Technik können wir *einwirken* | ihn *bedienen*. Das geschieht heute (noch) überwiegend manuell | motorisch. Dazu besitzt er u. a. Knöpfe, Tastaturen, Bewegungssensoren, Kameras und | oder natürlich Rechner jeglicher Art. Damit wir die Technik beobachten und beeinflussen können, besitzt sie eine *Oberfläche* | *Interface*. Die restliche, „dahinter liegende" Technik, also was sich in ihrem Innern abspielt, wird hier nicht berücksichtigt, also als Black-Box betrachtet. Die Oberfläche sendet einerseits Signale/Reize mittels Skalen, Zeiger, Lautsprecher, Bildschirme usw. Anderseits nimmt sie Signale | Eingaben | Bewegungen von uns entgegen. So entsteht der rechte Teil von **Bild 1.1.**

Wieder gleich zu Beginn: Für mich befindet sich der *Mensch* in der Welt und besitzt einen stofflichen *Körper*. Er steht über Gehirn, Nervensystem, Sinne, Muskeln (die den Körper bewegen) und Drüsen mit der Welt in Verbindung. Hier interessiert nicht, wieviel der Mensch mehr als seine Körperhaftigkeit ist. Daher gibt es keine Aussagen zu Geisthaftem, Religiösem, Außersinnlichem und ähnlichem. Für die weiteren Betrachtungen genügt es vorauszusetzen, daß die *Wechselwirkungen* mit dem Technik-Interface über Gehirn, Nervensystem, Sinne, Muskeln und Drüsen ablaufen. So entsteht der linke Teil von Bild 1.1

Damit ist bereits der Inhalt und das Ziel des Buches relativ gut abgesteckt. Es betrifft die soeben definierte **Mensch-Technik-Schnittstelle**[2]. Es wendet sich an Entwickler, Forscher, Studenten und Allgemeininteressierte, die sich um bestmögliche und um neue, zukünftige Schnittstellen bemühen. Dieser Kreis ist sehr groß. Beispielhaft seien nur Gebiete wie Rechnerperipherie, Terminals, Multi-

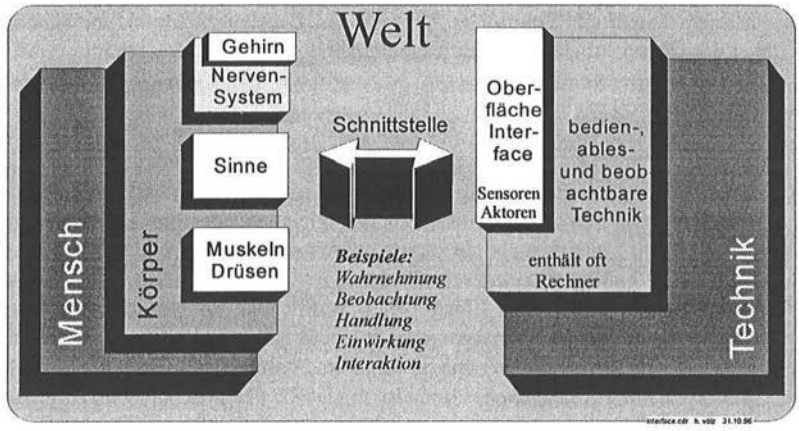


Bild 1.1 Zur Definition der Schnittstelle zwischen dem Körperhaften des Menschen und dem technisch realisierten Interface (als Hardware)

---

1 Das Zeichen „|" wird auf zweierlei Weise benutzt: Einmal im Sinne von „sowohl als auch" und zum anderen für ähnliche bzw. sich ergänzende Inhalte | Begriffe.

2 Begriffe wie Mensch-Maschine- oder Mensch-Rechner-Schnittstelle wurden hier bewußt vermieden. Sie sind einmal einschränkend gegenüber Bild 1.1 und zum anderen unklar wegen des Begriffs Maschine.

media und virtueller Raum genannt. Sie verlangen nach ergonomisch, anmutender Akzeptanz bewirkenden Oberflächen. Bei der Technik wird dazu jedoch fast ausschließlich die „Hardware" im weitesten Sinne, wie Tastatur, Maus, Tablett, Monitor, Kamera, Sensoren, Aktoren usw., berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden Gestaltungsprozesse und Software, also u. a. Programmoberflächen. Den ersten Hauptteil des Buches bilden aber die Grundlagen von Gehirn, Nervensystem, Sinnen, Muskeln und Drüsen. Ihre „Parameter" stehen nämlich seit Jahrtausenden unveränderlich fest und bilden daher den Ausgangspunkt für die technische Gestaltung der Mensch-Technik-Schnittstelle. Für einen besser verständlichen Stil mußten allerdings einige Begriffe etwas abweichend zum üblichen Gebrauch definiert werden[3]. So ist die folgende Tabelle entstanden.

Tätigkeit, Funktion	Richtung und Art der **Aktivität**, betont stofflich-energetisch	Richtung des **Informationsflusses**	Beteiligung des **Bewußtseins**
Wahrnehmen	Mensch bemerkt etwas in Welt | System	System | Welt ⇒ Mensch	Überwiegend
Beobachten	Mensch sucht gezielt Informationen	System | Welt ⇒ Mensch	Sehr stark
Erkennen	Einbeziehen von Kognition	Oft Mensch ⇔ Mensch	Stark
Handeln	Motorische Aktivität des Menschen	Unwesentlich	Überwiegend
Reagieren	Von außen bewirktes Handeln	System | Welt ⇒ Mensch	Nicht nötig
Erleben	Ganzheitliches, auch emotionales Wahrnehmen, Handeln und Reagieren	Mensch ⇔ System | Welt	Beachtlich
Signalgeben	Technik gibt etwas zur Auswertung durch den Menschen aus	System | Welt ⇒ Mensch	Beabsichtigt
Einwirken	Welt | Technik beeinflußt den Menschen	System | Welt ⇒ Mensch	Nicht nötig
Erkunden	Welt |Technik versucht spezifische Information über den Menschen zu erhalten	Mensch ⇒ System | Welt	Meist unerwünscht
Interaktion	Wechselseitige Beeinflussung von Mensch und Welt | Technik	Mensch ⇔ System | Welt	Überwiegend

Der Unterschied in der zweiten und dritten Spalte ergibt sich daraus, daß gegenseitiges Ein-|Zusammenwirken meist von nur einer Seite (Mensch oder Technik) aktiv eingeleitet wird. Diese Richtung muß aber nicht mit der des Informationsflusses übereinstimmen. Z. B. analysiert (*Erkunden*) in einigen Fällen die „aktive" *Technik* unser Gesicht. Der Informationsfluß geht dabei aber vom Gesicht zur Technik. In der letzten Spalte ist berücksichtigt, in wieweit über das Interface ablaufende Prozesse uns bewußt werden können|sollen. Eine weitere Einteilung betrifft willkürliches und unwillkürliches Handeln, wie Mimik, Gesten und Emotionen. Dies hätte eine weitere Spalte in der Tabelle erfordert und wurde daher der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

1.1 Die technische Seite

Eine Präzisierung der technischen Seite der Schnittstelle zeigt **Bild 1.2**. Entsprechend den möglichen „Zugriffen" wurde hier die biologische Seite ein wenig umstrukturiert. Einmal sind Gehirn und Nervensystem zusammengefaßt. Von hier lassen sich nämlich gleichermaßen nur Aktionspotentiale, EEG und ähnliches ableiten. Ein Einwirken auf sie kann wohl nur durch elektrische und|oder magnetische Felder erfolgen. In jedem Fall ist also eine sehr direkte Kopplung erforderlich. Sie ist meist mit Eingriffen – Anschließen oder Setzen von Elektroden – verbunden. Andererseits sind Muskeln und Drüsen jetzt getrennt dargestellt. Die Muskeln steuern ja alle Körperteile. Über ihre Wirkung betätigen wir Tasten, Maus usw. Mit ihnen verändern wir Körperhaltung und Gesichtsausdruck. Hieraus gewinnt die Technik wichtige Aussagen. Sie sind also eigentlich der entscheidende Angriffspunkt der technischen Seite. Die Drüsen liefern dagegen nur relativ wenig Information. Sie betreffen eigentlich nur den „Lügendetektor" und vielleicht künftig einmal chemisch feststellbare Molekülabsonderungen.

Auf der Technikseite geht Bild 1.2 von den Oberbegriffen Sensoren und Aktoren aus. Unter *Sensoren* sind dabei alle technischen Bauelemente, Baugruppen und Geräte zusammengefaßt, welche auf

3 Ich konnte mich nicht dazu durchringen, neue Begriffe einzuführen und zu definieren. Sie hätten recht abstrakt und spezifisch (als Kunstwörter) gewählt werden müssen. Ich hielt es auf Grund mehrerer Erfahrungen für besser, Assoziationen trotz eventueller möglicher Mißverständnisse zu benutzen.

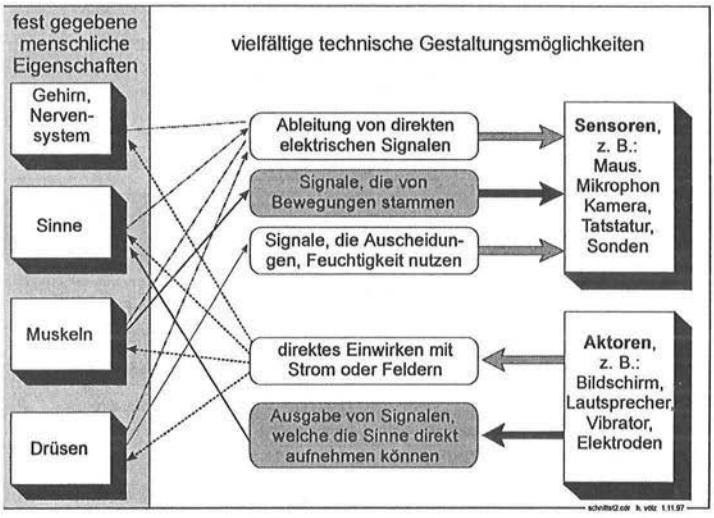


Bild 1.2 Wichtige Funktionen der technischen Schnittstellenseite

irgendeinem Weg Information vom Menschen entgegennehmen bzw. von ihm ableiten. Hier werden im Bild drei wichtige Unterscheidungen gewählt. Von allen vier biologischen Abschnitten lassen sich nämlich durch Sonden, elektromagnetische Felder usw., direkt Signale ableiten. Hierzu ist wie bereits erwähnt meist ein sehr direkter Kontakt erforderlich. Insbesondere von den Drüsen – theoretisch aber auch von den anderen Strukturen – werden chemische Substanzen freigesetzt, die im Kontakt oder bei Gasen in relativer Nähe analysiert werden können. Der Hauptteil der Signale für Sensoren stammt jedoch aus Bewegungen|Haltungen unseres Körpers.

Aktoren wirken dagegen auf den Menschen ein. Auch ihr Spektrum reicht von einfachsten Bauelementen bis zu hochkomplexen Apparaturen. Hier können zwei Klassen unterschieden werden. Einmal erfolgt ein direktes Einwirken, z. B. mit Strom, Feldern, Kraft oder chemischen Substanzen. Der hauptsächliche Weg geht jedoch über Signale, die von unseren Sinnen wahrgenommen werden können, die wir also sehen, hören, fühlen usw..

Eine betont technische Gliederung der Sensoren und Aktoren zeigt **Bild 1.3** (umseitig). Für sie sind die wichtigsten physikalisch-chemischen Funktionsprinzipien, wie Messen und Signale abgeben, detailliert hinzugefügt. Die Vielzahl der dabei möglichen Varianten ist also sehr groß. Deshalb wird im zweiten Hauptteil des Buches hierzu eine Systematik versucht. Obwohl Sensoren und Aktoren auch in der Automatisierungstechnik größte Bedeutung besitzen, konnte keine direkt nutzbare Literatur gefunden werden. Auch die Art der Signale ist vielfältig. Die meisten (einfachen) Sensoren, wie z. B. Lautsprecher, Mikrophon, Bildröhre usw. arbeiten primär analog. Ein Rechner verlangt dagegen digitale Signale. Folglich sind Analog-Digital- und Digtal-Analog-Wandler erforderlich. Sie werden im Buch aber vorausgesetzt. Ferner müssen die Signale nicht selten auf technischen Kanälen (Lichtleiter oder mit Hochfrequenz) übertragen werden. Dazu dienen u. a. Impuls- und Modulationsverfahren. Hierzu sei auf Literatur zur Nachrichtentechnik verwiesen. Desweiteren bedarf Information immer eines Trägers, der elektrisch, magnetisch, elektromagnetisch, akustisch, lichttechnisch, pneumatisch und|oder hydraulisch sein kann. Aus den genannten vier großen Komplexen sind schließlich die Geräte der Schnittstelle aufgebaut. Von ihnen existieren heute Tastatur, Maus, Monitor, Tablett, Drucker usw. Außerdem kommen ständig neue hinzu. Sie alle bilden einen wichtigen Teil des zweiten Hauptteiles dieses Buches.

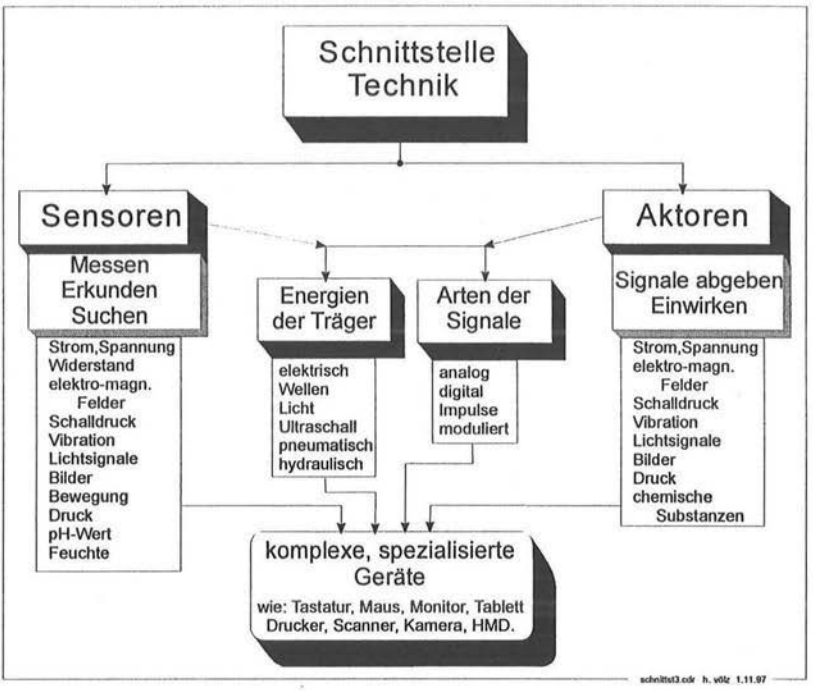


Bild 1.3 Bestandteile der technischen Seite der Schnittstelle

1.2 Die menschliche Seite

Die menschliche Seite der Schnittstelle ist wesentlich durch funktionelle Merkmale gekennzeichnet. Sie sind in **Bild 1.4** aufgezeigt. Unser (übliches) *Wahrnehmen* betrifft (nur) unsere Sinne. Dabei gelangt aber nicht alles, was wir wahrnehmen, ins Bewußtsein (z. B. grau unterlegt: Gleichgewicht und Körpergefühl). Im technischen Bereich bilden heute (noch) Sehen und Hören den Schwerpunkt. Bei der virtuellen Realität (aktiver Datenhandschuh) und einigen Pagern (Geräte mit Vibratoren) hat aber auch bereits das Fühlen Bedeutung erlangt. Ob und wann Riechen, Schmecken und Temperaturempfinden systematisch einbezogen werden, muß die Zukunft zeigen. Unwahrscheinlich ist es aber, mit technischen Mitteln auf unser Körpergefühl (Leiblichkeit) einzuwirken. Fast unmöglich erscheint es schließlich, das Gleichgewichtsorgan zu beeinflussen. Wenn von direkter Nervenstimulation abgesehen wird, müßte dazu nämlich zumindest lokal die Schwerkraft verändert werden. Anderseits liegt ja hier die Ursache dafür, daß uns im virtuellen Raum so leicht ein Schwindelgefühl erfaßt. Die virtuelle Umwelt wird von uns so bewegt, als ob wir uns in ihr bewegen. Aber unser Gleichgewichtsorgan merkt davon nichts. Das ist nur die Umkehrung dessen, was wir beim Flug durch „Luftlöcher" erleben. Dort sehen wir keine Änderung, merken sie aber. Bei virtueller Realität sehen wir sie, merken aber nichts. Während im täglichen Leben alle Sinneseindrücke zu einer Einheit integriert werden, ist das hier nicht mehr möglich.

Für ein bewußtes (aktives) *Handeln* besitzen wir nur eine begrenzte Anzahl von Möglichkeiten. Im großen Umfang betrifft es die Haltung und Bewegung unseres Körpers und aller Körperorgane. Die wichtigsten davon sind im Bild 1.4 unten zusammengestellt. Die heutige Technik nutzt fast ausschließlich unsere Hände, insbesondere die Finger. Tastatur, Maus sowie z. T. Digitalisierungstabletts und interaktive Bildschirme sind dafür typisch. Beachtlich große Ausdrucksfähigkeit besitzt zwar

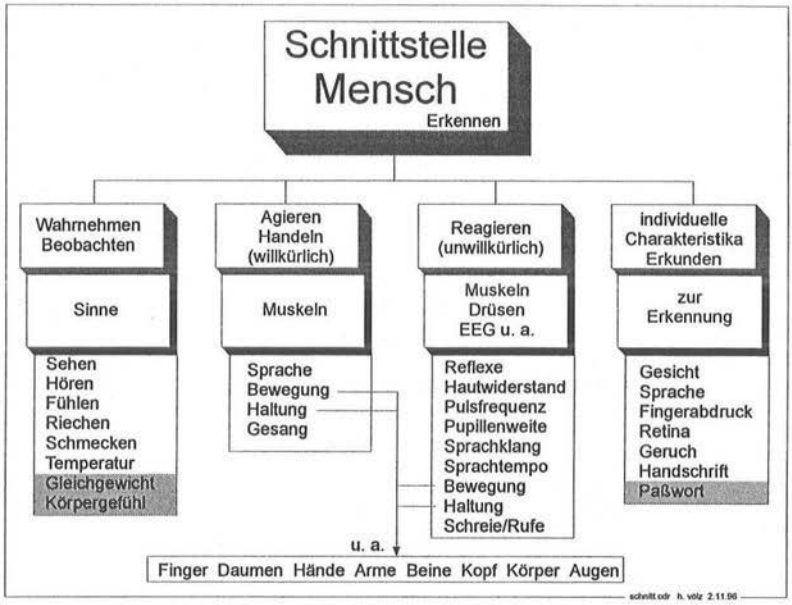


Bild 1.4 Die vier Hauptklassen der menschliche Seite der Schnittstelle

unsere Stimme bei Sprache und Gesang. Für die Interaktion mit dem Rechner besitzt sie aber (immer noch) eine äußerste geringe Bedeutung. Noch extremer ist es, daß wir keine „inneren" Bilder unmittelbar ausgeben können. Dafür muß ein „Umweg" über die Sprache und | oder über Zeichnen und Malen gegangen werden.

Bei der Mensch-Technik-Kopplung sind jedoch nicht nur bewußte Handlungen bedeutsam. Zumindest bei der virtuellen Realität soll ja auch unser Erleben (Leiblichkeit) beeinflußt werden. Dafür sind dann auch innere, unbewußte und bewußt nicht beeinflußbare Gegebenheiten zu erfassen. Sie sind im Bild 1.4 unter dem Begriff „Reagieren" zusammengefaßt. Neben den Auswirkungen der entsprechenden Muskeln (wie unbewußtes Verhalten und Kommunizieren, Gesichtsausdruck usw.) sind hier auch Ausschüttungen der Drüsen (u. a. Schweiß) wichtig. Im gewissen Umfang können sogar Auswirkungen der Tätigkeit des Nervensystems (z. B. über das EEG) genutzt werden.

Nicht immer sollen alle Daten und die Nutzung eines Systems für jedermann zugänglich sein. Der Datenschutz, der private Intimbereich und der Schutz von Kindern, Jugendlichen, Minderheiten usw. erfordert Grenzen. Dafür sind individuelle Charakteristika zur Zugangskontrolle nützlich. Wichtige Möglichkeiten zeigt ebenfalls Bild 1.4. Das Paßwort ist dabei eigentlich ein nur recht spezieller Fall. Das zugehörige individuelle „Wissen" kann nämlich allzu leicht anderen zugänglich werden und dann mißbraucht werden. Es kann außerdem vergessen gehen.

In der Anatomie ist es gebräuchlich, Gehirn, Nervensystem und Sinnesorgane zusammenzufassen. Dann gilt die Einteilung gemäß **Bild 1.5** (umseitig). Es werden dabei die *Außen- bzw. Innenwelt* des Menschen unterschieden. Zunächst erscheint es unsinnig, für die Mensch-Technik-Schnittstelle auch innenweltbezogene Signale ausnutzen zu wollen (Synonyme sind vegetativ, autonom und idiotrop). Aber in der Medizin und der Psychologie wird ja schon lange der Erregungszustand des sympathischen und parasympathischen Nervensystems z. B. über die Messung des Hautwiderstandes und der Änderung der Pupillengröße genutzt. Da außerdem schon die Mindmaschinen[4] hiermit umzuge-

4 Geräte die u.a. durch akustische Signale den Allgemeinzustand ändern, z. B. Entspanntheit bewirken sollen.

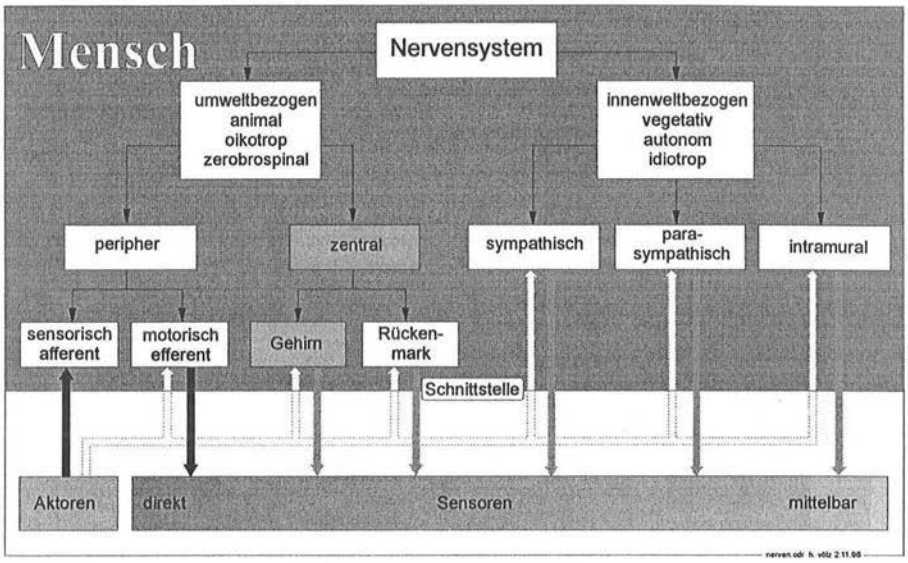


Bild 1.5 Die Schnittstelle aus der Sicht des Nervensystems der Anatomie

hen versuchen, werden andere Anwendungen z. B. in der Virtuellen Realität kaum lange auf sich warten lassen. Das intramurale System betrifft u. a. Nervenzellen des Herzmuskels und ist somit ein wichtiger Bezugspunkt für Herzschrittmacher.

Das *umweltbezogene* Nervensystem (synonym sind animal, oikotrop und zerebrospinal) wird in das zentrale und periphere unterteilt. Für unsere Schnittstelle ist natürlich das periphere System von größtem Interesse. Es enthält einen sensorischen (afferenten) und einen motorischen (efferenten) Teil.

Der *sensorische* Teil des Nervensystems beginnt überwiegend mit Sinnesorganen. Er wird wegen seiner großen Bedeutung recht ausführlich in den Abschnitten über die Sinnesorgane und -qualitäten behandelt. Die Schnittstellentechnik benutzt zur Einwirkung auf den Menschen überwiegend angepaßte Aktoren. Sie kann aber auch mit speziellen Mitteln direkt Teile des Nervensystems beeinflussen. Das deuten die gestrichelten Pfeile an. In letzter Konsequenz wäre so ein Einwirken auf den Menschen unter Umgehung des Bewußtseins möglich. Dabei sind sowohl wünschenswerte Anwendungen wie Lernen im Schlaf als auch unerwünschte Manipulationen der Psyche denkbar.

Der *motorische* Teil des Nervensystems steuert sowohl Muskeln als auch Drüsen. Im Gegensatz zum sensorischen Teil konnten hierzu so gut wie keine Angaben gefunden werden, die als Basis für eine Nutzung bei der Mensch-Technik-Schnittstelle hinreichend konkret waren. Das ist aus mehreren Gründen verwunderlich. So dürften doch z. B. im Leistungssport sehr genaue Kenntnisse der motorischen Leistungsfähigkeit vorhanden sein. Weiter müßten Kenntnisse u. a. von den Wettbewerben im Maschineschreiben, aus der Artistik, des Spiels von Musikinstrumenten und der feinwerktechnischen Fertigung ableitbar sein. Damit bleibt hier wohl einstweilen (notwendigerweise) die intuitive Entwicklung nach trial-and-error eine wichtige Variante.

1.3 Zu den Informationsflüssen

Die bisherigen Betrachtungen galten vor allem der stofflich-energetischen Basis. Das gilt auch für die menschliche (biologische) Seite der Schnittstelle. In den vorangegangenen Bildern tauchten aber auch mehrfach Pfeile und Hinweise zu Signal- bzw. Informationsflüssen auf. Sie besitzen generell

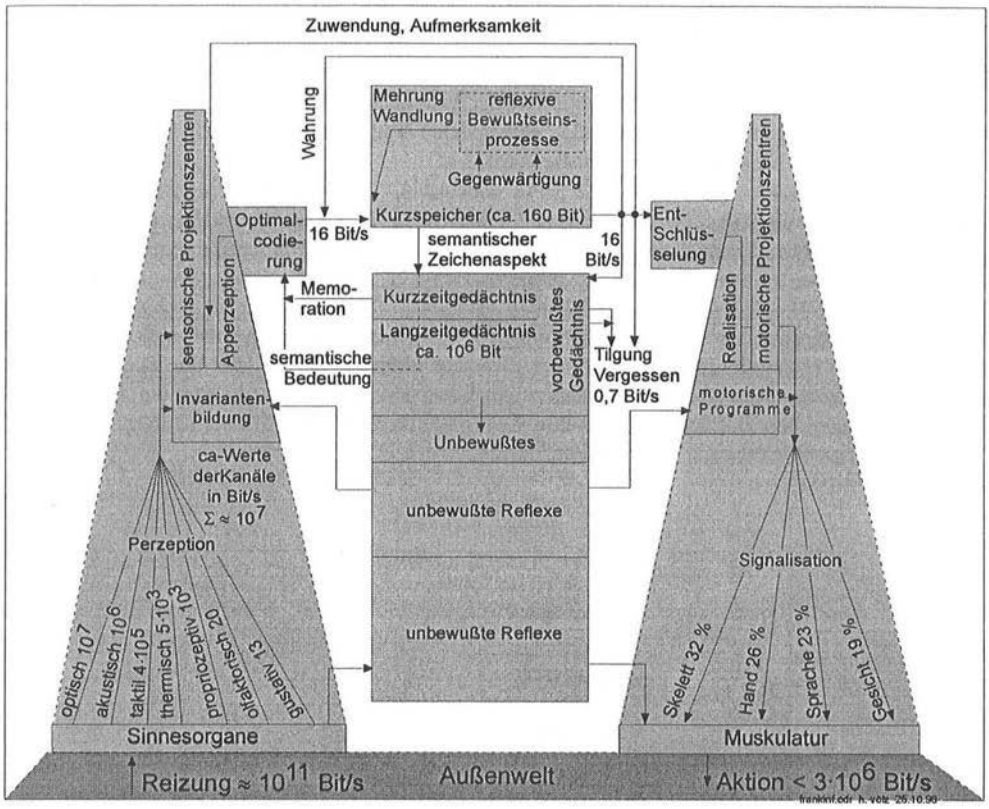


Bild 1.6 Modell der auf den Menschen bezogenen Informationsflüsse nach Helmar Frank [FRA]

eine beachtliche Bedeutung und müssen daher auch für die Mensch-Technik-Schnittstelle beachtet werden. Natürlich bringt es immer Probleme, die klassische Informationstheorie auf den Menschen anzuwenden. Dennoch haben mehrere Autoren, u. a. W. Keidel und W. Steinbuch, es mit beachtlichem Erfolg versucht. Ein recht komplexes und daher nicht auf Anhieb besonders übersichtliches Modell stammt bereits aus den 60er Jahren. Es geht auf Helmar Frank [FRA] zurück und ist in **Bild 1.6** gezeigt. Sein großer Vorteil besteht darin, daß es die drei wichtigsten Teilstrukturen erfaßt. Links im Bild befindet sich der Information aufnehmende Teil, der vor allem die Sinne berücksichtigt. In der Mitte befindet sich das Gedächtnis und die „Informationsverarbeitung". Rechts sind die wichtigsten Aktionen und Reaktionen des Menschen zusammengefaßt. Heute gelten allerdings z. T. andere Zahlenwerte und im Detail etwas andere Strukturen. Hierauf wird am Ende des Buches eingegangen.

Eine wichtige Ergänzung betrifft die emotionalen Zusammenhänge. Ihre Bildung und Wirkung zeigt **Bild 1.7** (umseitig) [VÖL7]. Dabei wird – wie in der Psychologie üblich – angenommen, daß für die Wechselwirkung von Mensch und Umwelt drei Ebenen gegeben sind. Die Ebene **1** ist durch die Welt, die Wirklichkeit bestimmt. Diesen Abschnitt können wir einerseits beobachten und erkennen und andererseits haben wir hier die Möglichkeit, durch Handeln und Reagieren auf die Welt Einfluß zu nehmen. Die Ebene **3** betrifft das „Innere" des Menschen. Sie kann bestenfalls, aber nur sehr bruchstückweise durch Selbstanalyse und Schlußfolgerungen erfaßt werden. Die Ebene **2** ähnelt unserer Schnittstelle. Hier ist der Mensch durch andere Menschen und durch Technik z. T. objektiv

beobachtbar. Genauer gilt dies nur für sein Handeln, sein Reagieren und über die „sichtbaren" Auswirkungen seiner Emotionen. Dabei ist bedeutsam, daß unser Handeln zum Teil bewußt erfolgt und dann prinzipiell (technisch) erfaßbar ist. Unsere Emotionen können wir dagegen nur wenig beeinflussen. Sie betreffen vorwiegend das vegetative Nervensystem und werden schlicht erlebt. Beobachtbar | meßbar sind jedoch die nach außen gelangenden Wirkungen. Sie betreffen u. a. den Hautwiderstand, den Pupillenreflex und die Pulsfrequenz.

Für die Mensch-Technik-Schnittstelle ist es bedeutsam, Zusammenhänge zwischen bewußtem Handeln und den weitgehend im „Hintergrund" ablaufenden Emotionen zu erkennen. Hierbei kann das interne Modell der Ebene **3** von Bild 1.7 weiterhelfen. Jeder Mensch hat für sein Verhalten Bedürfnisse, Motive usw., aus denen er meist mehrere, sich z. T. widersprechende Ziele ableitet. Diese versucht er, durch Handeln in der Wirklichkeit zu realisieren. Dafür gibt es meist mehrere Varianten, deren Handlungsaufwand mit dem natürlich nur bedingt richtigen inneren Modell abgeschätzt wird. Die Intensität von Emotionen ergibt sich vor allem aus einem Vergleich, der die Wichtigkeit des Ziels und den Aufwand zu seinem Erreichen erfaßt. So steuern die Emotionen u. a. die Wirksamkeit des Wollens, also das Eintreten des Handelns. Es erscheint möglich zu sein, diese komplexen Prozesse für künftige Erlebnisse in der virtuellen Realität zu nutzen.

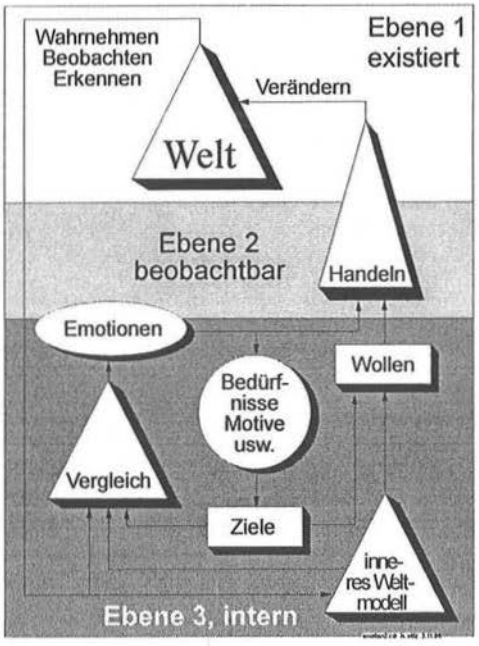


Bild 1.7 Modell zum Entstehen und zur Wirkung von Emotionen

2 Biologisch-anatomische Grundlagen

Hier kann nur ein extrem kurzer Abriß der biologischen Grundlagen gegeben werden. Für weitere Details sei auf die biologische Standardliteratur verwiesen, u. a. [SCH2]. Eine einfache, wenn auch nicht mehr ganz aktuelle Darstellung enthält [VÖL5].

2.1 Biologische Zellen

Die biologische Zelle ist die kleinste Einheit allen Lebens. Ihr typischer Durchmesser beträgt etwa 10 bis 100 µm. Sie existiert in sehr großer Vielfalt. Entsprechend den unterschiedlichen Aufgaben kann sie von dieser Größe stark abweichen und sehr unterschiedlich aussehen. Ein Mensch besteht aus ca. 10^{14} Zellen bei rund hundert verschiedenen Zelltypen. Davon werden täglich grob 10^{11} Zellen durch Neubildung regeneriert. Zusätzlich existieren reichlich 10^{13} Blutzellen. Weiter leben in unserem Darm etwa 10^{20} E-coli-Bakterien. Für dieses Buch brauchen nur die Sinnes-, Muskel- und Nervenzellen (Neuronen) betrachtet zu werden. Sie entwickeln sich wie alle Zellen eines Organismus aus der ursprünglich einen Eizelle durch Zellteilung und -differenzierung.

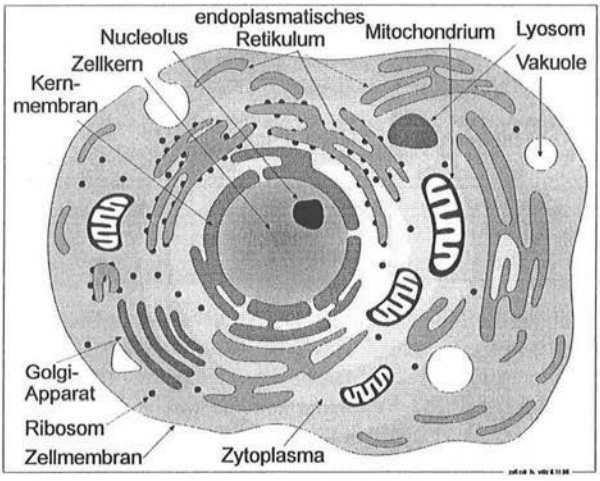


Bild 2.1 Typisches Aussehen einer biologischen Zelle

Den Aufbau einer etwa typischen Zelle zeigt **Bild 2.1**. Sie besitzt mehrere Membranen von jeweils etwa 4 bis 15 nm Dicke, die aus ungesättigten Carbonsäuren (Fettsäuren) und Phosphorlipiden (Lecitinen) bestehen. Gegenüber Wasser sind sie polar: eine Seite ist hydrophob (wasserabweisend), die andere hydrophil (wasserbindend). Zur Versteifung und zur Aktivität enthalten die Membranen u. a. Cholesterin, Proteine und Kohlenhydrate.

Die äußere Plasmamembran trennt das Zellinnere mit dem Zytoplasma (Zellflüssigkeit) von der Umwelt der Zelle ab. Sie sorgt aktiv dafür, daß im Innern auch dann ein möglichst gleichbleibendes Milieu (z. B. pH-Wert) existiert, wenn sich die Umwelt erheblich ändert. Bei den Sinnes- und Nervenzellen wird dieser Zustand kurzzeitig gezielt verändert. Die Kernmembran dient vor allem dem Schutz der Erbsubstanz (DNS = Desoxyribo Nuklein Säure). Weitere Membranen definieren die Zellorganellen. Die Mitochondrien sind als „Kraftwerke der Zelle" für die Energieerzeugung zuständig. Sie speichern dazu ATP (Adenin-Tri-Phosphat), was sie aus energiereichen Kohlenwasserstoffen ableiten. Der Golgi-Apparat besteht aus mehreren, zum Zellkern hin gekrümmten Membransystemen mit einem Durchmesser von 0,1 bis 5 µm. Er erzeugt Zellsekrete, die sich ständig in Form kleiner Golgi-Vesikel abschnüren. Hierzu gehören u. a. Neurosekrete (Transmitter) und die Sekrete der Drüsen. Das endoplasmatische Retikulum (ER) ist ein stark verzweigtes Netz, das den interzellularen Transport, also den Stoffaustausch, aber auch die Speicherung verschiedener Zellsubstanzen bewirkt. Das granuläre ER ist mit Ribosomen besetzt, die als „Werkbänke der Zelle" bezeichnet werden, weil sie mittels der RNS (Ribo-Nuklein-Säure) für die Zelle wichtige Substanzen (Proteine) erzeugen. Die Lyosomen haben einen Durchmesser von etwa 0,4 bis 1 µm und enthalten mehrere Enzyme in hoher

Konzentration. Sie bewirken die „Verdauung" von „verbrauchten" Zellbestandteilen und Fremdstoffen. Ihnen ähnlich sind die Vakuolen.

2.2 Zellpotential als Membraneigenschaft

Die Zellmenbran ist semipermeabel. Ihre Poren ermöglichen einigen Ionen eine Diffusion. Hierfür gilt das 1. Ficksche Gesetz und zwar getrennt für jede Ionenart. Aus der Membranpermeabilität P und den Konzentrationen c_i und c_a (innen, außen) folgt dann ein Stoffstrom $J = P(c_i - c_a)$. Zu den unten stehenden typischen Tabellenwerten sei ergänzt, daß für K^+ in einer Wasserschicht die Permeabilität bei 10 cm/s liegt. In der Zellmembran befinden sich Na- und Ka-Pumpen, welche die Ionen aktiv (katalytisch) durch die Membran transportieren. Hierzu wird viel Energie – bis zu 70 % des Ruheumsatzes der Zelle – benötigt. Für 1 g Nervenfaser sind rund 1 J/h ≈ 0,3 mW nötig. Damit werden u. a. etwa $3 \cdot 10^{-5}$ mol Na^+ herausgepumpt. So entsteht das konstante innere Milieu und der erhebliche Konzentrationsunterschied zwischen innen und außen. Weitere Auswirkungen sind ein osmotischer Druck und ein elektrisches Potential.

Ionen	Permeabilität ca. in cm/s	Konzentration außen : innen in mmol/l	
		Muskel	Axon
K^+	10^{-8}	7:150 ≈ 0,05	20:400 ≈ 0,05
Na^+	$3 \cdot 10^{-10}$	150:15 ≈ 10	450:60 ≈ 7,5
Cl^-	10^{-10}	120:5 ≈ 25	600:30 ≈ 20

Bei Diffusion kann das elektrische Potential aus der Ionenverteilung mit der Nernstschen Gleichung bestimmt werden:

$$\Delta U = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i}{c_a} .$$

Darin bedeutet: R die allgemeine Gaskonstante, T die absolute Temperatur, F die Faraday-Konstante und z die Ladungszahl des Ions. Zum Faktor RT/F gehören bei 37 °C etwa 26,7 mV. Für die drei wichtigsten Ionen gilt bei einer typischen Zelle $U_K \approx -100$ mV; $U_{NA} \approx +70$ mV; $U_{Cl} \approx -90$ mV. Bei der Zusammenfassung müssen die Ionenbeweglichkeiten | Permeabilitäten der Membran einbezogen werden. Dann gilt die Goldmansche bzw. Hodgkin-Huxley-Katzsche Gleichung (z ist hier, da alle drei Ionen einwertig sind, nicht erforderlich, die Ionenkonzentrationen stehen in „[ ]"):

$$\Delta U = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K[K]_a + P_{Na}[Na]_a + P_{Cl}[Cl]_i}{P_K[K]_i + P_{Na}[Na]_i + P_{Cl}[Cl]_a} .$$

Das Innere der Zelle ist immer negativ, und für typische Neuronen folgen 60 bis 90 mV, für tierische Zellen 30 bis 100 mV und für pflanzliche Zellen 50 bis 200 mV. Infolge der Membrandicke von 8 nm existiert eine sehr hohe Feldstärke um 10^5 V/cm. Der spezifische Widerstand einer Membran ρ_M liegt bei 10^{10} Ω·cm, jener der Zellflüssigkeit bei 20 ... 200 Ω·cm. Im extrazellulären Raum ist er etwa doppelt so groß (zum Vergleich Kupfer ≈ $1{,}78 \cdot 10^{-6}$ und Glas ≈ 10^{11} Ω·cm). Rein formal folgt so für die Zelle das elektrische Ersatzschaltbild von **Bild 2.2.** Wird der Membranwiderstand auf die Oberfläche der Membran bezogen, so gilt mit der Membrandicke d

$$R_F = \rho_M \, . \, d.$$

Der typische Wert liegt bei 10^3 bis 10^4 Ω·cm² (möglich 10 bis 10^6 Ω·cm²). Für eine erregte Membran (s. u.) sinkt er auf ca. 2 Ω·cm² ab. Die ebenfalls flächenbezogene Membrankapazität folgt zu

$$C_F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d} .$$

Da die relative Dielektrizitätskonstante ε_r bei etwa 10 liegt, folgt etwa 1 µF/cm². Bei der Oberfläche eines typischen Neurons von 10^{-5} cm² ergeben sich 30 pF und 10^8 Ω. Diese technisch sehr un-

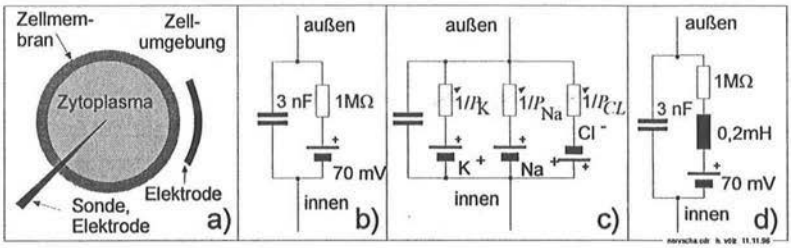


Bild 2.2 Elektrische Ersatzschaltbilder für eine Zelle bzw. ein Neuron

praktischen Werte werden meist unter Beibehaltung der Zeitkonstanten $T = R \cdot C$ umgerechnet (Bild 2.2b). Weiter kann die Ladungsmenge einer Nervenzelle berechnet werden. Zu einem Zellpotential von 100 mV gehören etwa $3 \cdot 10^{-7}$ C/cm^2 $\approx 3 \cdot 10^{-12}$ mol/cm^2 $\approx 2 \cdot 10^{12}$ Ionen/cm^2. Für ein mittleres Neuron mit $3 \cdot 10^2$ µm^2 Oberfläche sind es rund 10^7 Elementarladungen.

Mit den drei Ionenarten wird das Schaltbild umfangreicher (Bild 2.2c). Die Widerstände können dann aus den Membranpermeabilitäten abgeleitet werden. So sind beim Neuron (s. u.) wesentliche Eigenschaften gut beschreibbar. Nur in Ausnahmefällen wird die Verzögerung des Ladungsausgleichs durch eine zusätzliche Induktivität berücksichtigt (Bild 2.2d).

2.3 Das Neuron

Neuronen sind so hoch spezialisierte graue Zellen (graue Substanz im Gehirn), daß sie zu keiner Teilung (Mitose) mehr fähig sind. Daher wird meist angenommen, daß bereits bei der Geburt alle Neuronen vorhanden sind und sich nach der Geburt keine neuen mehr entwickeln können. Neuronen, die absterben, sind folglich nicht wieder zu ersetzen. Ihre morphologische Vielfalt ist so groß, daß eigentlich keine typische Gestalt existiert. Dennoch funktionieren alle nach dem gleichen Prinzip (s. u.). Neuronen sind stets von vielen anderen Zellen umgeben. Im Gehirn wird ein Neuron von etwa zehn Gliazellen versorgt und gestützt. Ein etwa typisches und maßstabsgerechtes Neuron zeigt **Bild 2.3a**. Der Zellkörper (kleiner schwarzer Fleck) hat einen Durchmesser von etwa 2 bis 100 µm. In ihm ist der weiß dargestellte Zellkern gerade noch erkennbar. Beide sind, wie bei jeder anderen Zelle, durch entsprechende Membranen abgrenzt. Die äußere Zellmembran ist noch stärker als eine Kastanie mit bis zu hundert spitzen Fortsätzen (Dendriten) versehen. Z. T. verzweigen sie sich baumartig. Ihre Länge liegt zwischen einigen Mikrometern und Millimetern, ihr Durchmesser im Mikrometer-Bereich. Sie vergrößern die Oberfläche des Neurons so stark, daß sie davon 90 - 96 % ausmachen. Die gesamte Oberfläche verhält sich dabei funktionell gleichartig. Auf sie wirkt eine Vielzahl (bis zu 50 000) Synapsen anderer Neuronen oder Sinneszellen ein, die dabei bis zu 40 % der Oberfläche belegen. Dagegen mehr funktionell als strukturell abgegrenzt, besitzt jedes Neuron einen einzigen Fortsatz, das Axon, den Neuriten. Während die Dendriten sich an ihrem Ende zuspitzen, besitzt das Axon über seine gesamte Länge einen nahezu gleichbleibenden Durchmesser im Mikrometer-Bereich. Seine Länge kann zwischen 50 µm (bei den bipolaren Zellen der Retina des Auges) und reichlich einem Meter (zur Versorgung peripherer Körperstellen) liegen. Diese große Länge konnte im Bild 2.3a nur durch das mehrfach zerschnittene Axon angedeutet werden. Oft besitzt das Axon viele, teilweise über tausend verschachtelte Verzweigungen, die Kollateralen. An allen Enden befinden sich Verdickungen, die Synapsen. Sie wirken auf andere Neuronen ein. Die gesamte, stark verzweigte Struktur des Neurons wird – wie bei jeder anderen Zelle – nur vom Zellkern gesteuert. Daher sterben abgetrennte Teile eines Neurons stets ab. Z. T. können sie aber erneut vom Kern erzeugt werden. Hierbei weisen die Myolinscheiden (s. u.) den Weg.

Jedes Neuron ist eine funktionelle Einheit. Es empfängt von anderen Neuronen oder Sinneszellen über viele Synapsen Informationen. Sie ändern in komplexer Weise seinen Zustand. Er wird über das

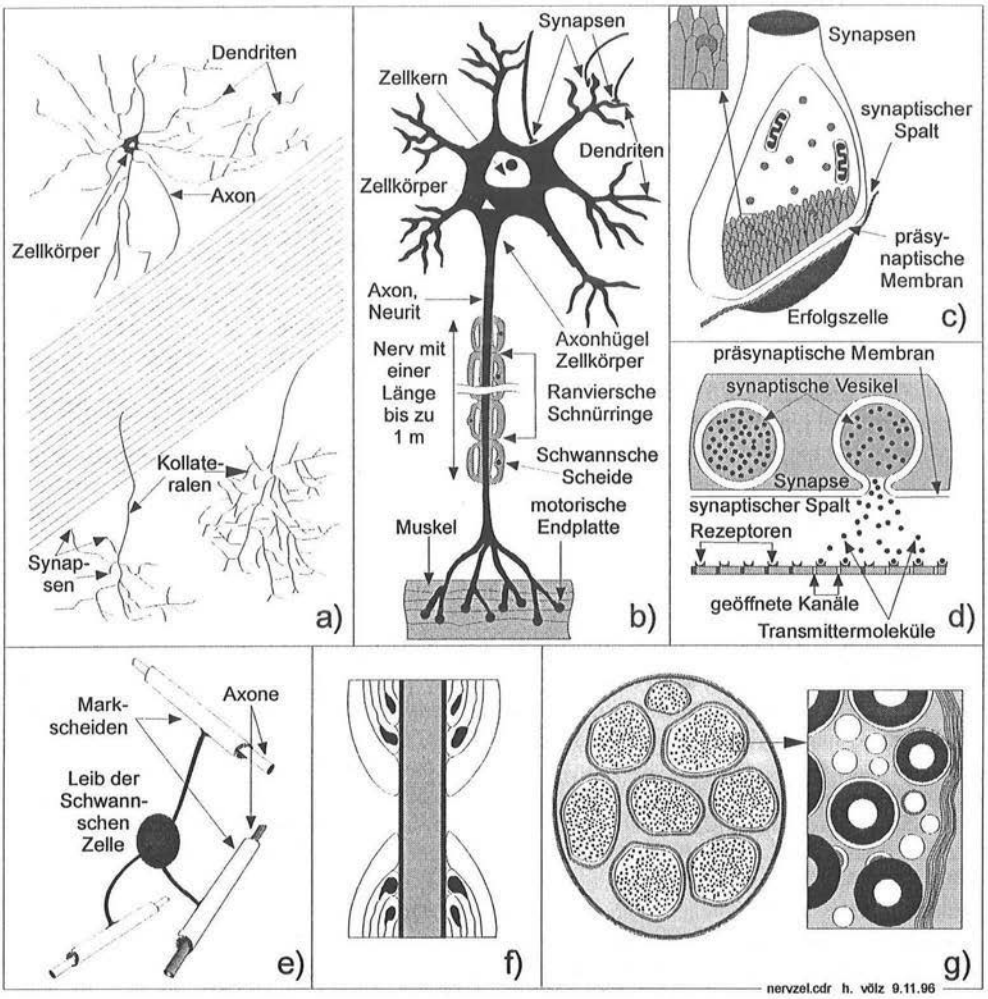


Bild 2.3 Darstellung von Neuron, Synapse und Nerv. Details im Text

Axon und dessen Kollateralen wiederum mittels Synapsen an andere Nerven-, Sinnes-, Muskel- oder Drüsenzellen weitergeleitet.

Bild 2.3b zeigt eine Darstellung des Neurons, die mehr Details erkennen läßt. Außerdem wirkt dieses Neuron mit der motorischen Endplatte (spezielle und etwa 1 mm^2 große Synapse) auf einen Muskel ein. Ferner ist zu erkennen, wie das Axon von dem weißen Myolin vieler (aus Gliazellen differenzierter) Schwannscher Zellen (weiße Substanz im Gehirn) stückweise umhüllt wird. Zwischen je zwei solcher Myolinscheiden befinden sich ein Ranvierscher Schnürring. Bild 2.3f zeigt ihn vergrößert, während Bild 2.3e andeutet, wie eine Schwannsche Zelle zugleich mehrere Axons umwickelt. Die Markscheide ist entwicklungsgeschichtlich eine späte Errungenschaft des Neurons. Ursprünglich waren alle Axons marklos. Beim Menschen beginnt die Markscheidenbildung erst im vierten Embryonalmonat. Die Dicke der Myolinscheide, d. h. die Anzahl ihrer Windungen um das Axon, kann sehr unterschiedlich sein. Axons mit sehr dünnen Markscheiden werden zuweilen fälschlich als marklose (graue) Fasern bezeichnet.

Den Körper durchzieht kein einzelnes Axon. Als Nerv werden sie mehrfach gebündelt und zusammengefaßt. Einen typischen Querschnitt zeigt Bild 2.3g. Erst im vergrößerten rechten Nebenbild sind die einzelnen Axons mit den mehr oder weniger dicken Myolinscheiden zu erkennen. Die gesamte Länge der etwa 10^{12} menschlichen Nervenfasern beträgt rund 10^8 m. Je die Hälfte davon befindet sich im Gehirn und im peripheren Nervensystem.

Für die Funktion des Neurons sind die synaptischen Komplexe entscheidend. Sie können wiederum bei fast gleicher Funktion sehr verschieden aussehen. Jeder Komplex gehört immer zu zwei Zellen. Ein typisches Beispiel, wie er z. T. im Gehirn vorkommt, zeigt Bild 2.3c. Sein Durchmesser liegt um ein Mikrometer. Die *Präsynapse* ist das verdickte Ende des Axons der ersten Zelle. Die *Postsynapse* (schwarz gezeichnet) gehört bereits zur zweiten Zelle, der Erfolgszelle. Beide sind durch den 20 - 30 nm weiten *synaptischen Spalt* getrennt. Dennoch ist die Synapse eine funktionelle Einheit, die beide Zellen zur Informationsübertragung in Richtung zur Erfolgszelle koppelt. Im Innern der Präsynapse befinden sich hexagonal angeordnete hügelartige Anlagerungen (dense projections). Ihre Abstände betragen ca. 80 nm und sind daher gerade so groß, daß sich ein synaptisches Bläschen (Vesikel) dazwischen lagern kann (Nebenbild links oben). In einer Synapse sind etwa tausend solcher Bläschen vorhanden. Die Bläschen enthalten Moleküle einer Transmittersubstanz, z. B. Acetylcholin. Heute sind mehr als zwanzig verschiedene Transmitter bekannt. Dennoch gilt das bereits 1933 von F. Dale formulierte Prinzip: Weil der Transmitter oder seine Vorstufe im Zellkörper synthetisiert wird, verfügen alle Synapsen einer Ausgangszelle nur über einen einzigen Transmitter.

2.4 Dynamik der Zellmembran

Mit ihren Ionenpumpen sorgt die Zellmembran aktiv u. a. dafür, daß das Mileu im Innern der Zelle möglichst günstig erhalten bleibt (vgl. S. 9, u. a. die Tabelle). Dieser Mechanismus kann nur zeitweilig durch äußere Einwirkungen gestört werden. Sinneszellen reagieren z. B. auf bestimmte physikalische oder chemische Außenreize. Nervenzellen werden durch ausgeschütteten Transmitter beeinflußt.

Eine Erregung (s. u.) der Ausgangszelle gelangt über das Axon und die Kollateralen zur Synapse. Dort platzt ein Vesikel, eventuell auch mehrere. Der frei werdende Transmitter gelang über den synaptischen Spalt zur Erfolgszelle. An ihrer Membran befinden sich Anlagerungen, welche spezielle Rezeptoren für die Transmittermoleküle enthalten (Bild 2.3d). Dort koppelt der Transmitter an und öffnet so Kanäle in der Membran. Das ändert lokal die Membranpermeabilität. Sie wird u. a. für Na^+ durchlässiger. Folglich strömen Na^+-Ionen in die Zelle. Weitere Folgeprozesse treten ein. Lokal ändert sich das Membranpotential um ΔU_0. Sekundenbruchteile später bauen Substanzen der Erfolgszelle den Transmitter schnell ab und die Pumpen stellen wieder das optimale Milieu her.

Jede lokale Änderung des Membranpotentials pflanzt sich gedämpft (elektro-tonisch) auf der Membranoberfläche in alle Richtungen fort. Mit einer Konstanten λ, die bei Bruchteilen eines Millimeters liegt, gilt für um x entfernte Orte

$$\Delta U = \Delta U_0 \cdot e^{-x/\lambda}.$$

Wirken mehrere erregte Synapsen nahezu gleichzeitig auf die Zellmembran ein, so werden die einzelnen Veränderungen örtlich-zeitlich integriert. Sobald dabei der gesamte Na^+-Ionen-Einstrom die Leitungsfähigkeit der Na-K-Pumpen der Zelle überschreitet, wird ihr Verhalten instabil. Da auch die Na^+-Ionen die Membranpermeabilität verändern, tritt eine positive Rückkopplung ein, und der Na^+-Einstrom wächst exponentiell. Die Membranpermeabilität steigt sprunghaft auf das etwa 500-fache und ist schließlich sogar 20mal größer als die für K^+ ($P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1:20:0{,}45$). Damit ist die Erregung der Erfolgszelle eingetreten.

Nach kurzer Zeit polt das eindringende Na^+ das Zellpotential um. So begrenzt sich der Einstrom selbst. Zum Potentialausgleich fließt dann die gleiche Menge K^+-Ionen aus der Zelle heraus. Auch dies wird durch eine Permeabilitätsänderung für K^+ unterstützt. Schließlich wird die Aktivität der Na-K-Pumpen auf das 6- bis 10-fache erhöht. So können schnell die ursprünglichen Verhältnisse

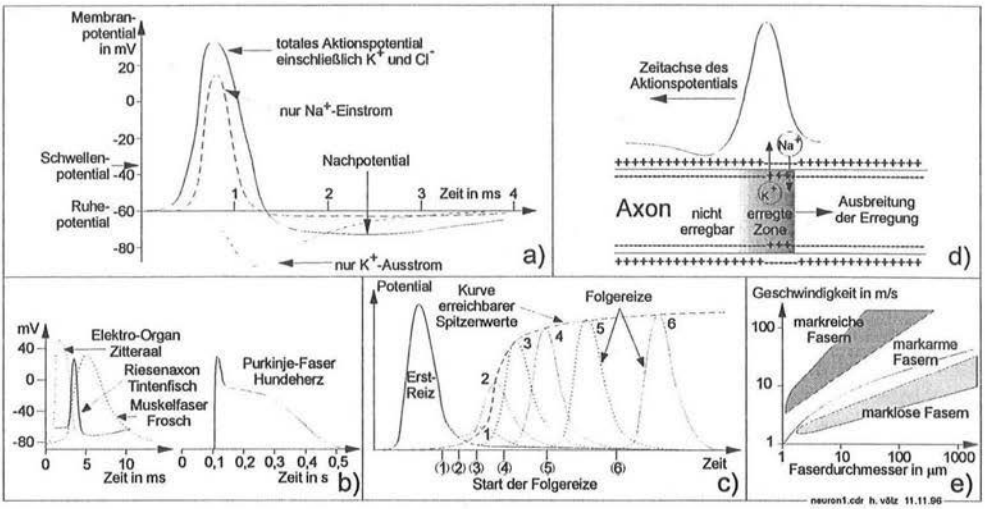


Bild 2.4 Potentialverlauf bei Erregung eines Neurons und Auswirkungen bei der Erregungsfortleitung im Axon

wieder hergestellt werden. Aber meist schießen die Ausgleichseffekte etwas über das Ziel hinaus und erzeugen für einige Zeit ein Nachpotential. Dies faßt **Bild 2.4a** als zeitlichen Verlauf des Zellpotentials zusammen.

Insgesamt müssen also zwei Erscheinungen unterschieden werden: Zunächst sind da die einzelnen *unterschwelligen Reize*, die nur wenig und kurzzeitig das Zellpotential ändern. Die räumlich-zeitliche Integration vieler Reize kann zweitens bei Überschreitung einer Schwelle zu einem stark nichtlinearen Verhalten der Zelle führen. Dabei entsteht ein definierter Impuls, der auch als *Entladung*, Spike, Erregungswelle, Impulsantwort oder Feuern der Zelle bezeichnet wird. Dabei werden etwa $4 \cdot 10^{-12}$ mol/cm^2 oder $2{,}5 \cdot 10^{12}$ Ionen je cm^2 Membranoberfläche ausgetauscht. Für ein mittleres Neuron mit 10 µm Durchmesser ergeben sich rund 10^7 ein- bzw. ausströmende Ionen. Das ist etwa ein Tausendstel aller in ihr enthaltenen Ionen. Infolge des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses ist der Anteil für kleine Zellen größer. Die Länge der typischen Entladung liegt bei etwa 1 bis 2 ms. Spezielle Zellen können deutlich von diesem Wert abweichen (Bild 2.4b).

Zwischen der Einwirkung des überschwelligen Reizes und dem Beginn des Aktionspotentials gibt es die Latenzzeit. Weiter kann eine Zelle kurz nach der Entladung zunächst keine weiteren Impulse abgeben. Selbst sonst stark überschwellige Reize lösen zunächst keine oder nur sehr schwache Entladungen aus (Bild 2.4c). Erst nach etwa 3 bis 5 ms (Refraktärzeit ≈ Abklingen der Hyperpolarisation) tritt wieder eine annähernd gleich große Impulsamplitude auf.

Einige Neuronen verwenden auch Transmitter, welche „negative" Reize für die Folgezelle darstellen. Sie verstärken die Polarisation der Zelle und wirken so hemmend für die Auslösung von Impulsen. Unphysiologisch kann das Feuern eines Neurons auch elektrisch hervorgerufen werden. Die zugehörige Schwellenreizstromstärke heißt Rheobase und beträgt einige zehn µA/cm^2, am Ranvierknoten das 20-fache.

2.5 Erregungsfortleitung

So wie eine überschwellige Erregung schnell die gesamte Zelle erfaßt, breitet sie sich auch als Welle aus. Sie beginnt am Axonkegel (Bild 2.3b, S. 11) und verläuft entlang des Axons zu den Synapsen. In Bild 2.4d bewegt sich die Erregung nach rechts. Deshalb muß der zeitliche Verlauf des jeweils

aktuellen Membranpotentials nach links gerichtet eingetragen werden. Auf Grund der Refraktärzeit verbleibt immer hinter der erregten Zone ein nicht erregbarer Bereich. Die Erregungswelle kann daher nur zu den Synapsen hin laufen. Eine Reflexion oder Umkehr ist nicht möglich. Lediglich bei unphysiologischer Erregung, z. B. durch eine elektrische Sonde im Axon, breitet sich je eine Welle nach jeder Seite aus. Unterschwellige Reize der Nervenzelle erreichen nicht das Axon und werden daher auch nicht weitergeleitet. Dieses Alles-oder-Nichts-Gesetz der Neuronen sagt weiter aus, daß durch die aktive Zellmembran – auch des Axons – der Reiz immer ungedämpft fortgeleitet wird. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle hängt jedoch wesentlich vom Durchmesser des Axons ab. (Bild 2.4e). Die drei Kurven folgen aus den unterschiedliche Axontypen. Wie im Zusammenhang mit Bild 2.3e bis g (S.11) gezeigt wurde, kann nämlich ein Axon mit einer unterschiedlich dicken Markschicht umhüllt werden. Bei den markhaltigen Fasern kann der Na^+-Einstrom und K^+-Ausstrom nur an den Ranvierknoten erfolgen. Die sonst gegebene elektrotonische Ausbreitung der Erregungswelle wird so durch eine saltatorische ersetzt. Die Erregung springt von Knoten zu Knoten. Der Abstand der Ranvierknoten ist dabei so gewählt, daß beim folgenden ein reichlich überschwelliger Reiz ankommt. Zusätzlich spart diese Fortleitung, weil viel weniger Ionen bewegt werden, auch viel Energie. Die multiple Sklerose zerstört u.a. die Myelinscheiden. Hierdurch wird deutlich, wie groß der „Gewinn" dieser Fortleitungsart ist.

2.6 Sinnesphysiologie

Wahrnehmungen gehen gewöhnlich von physikalisch-chemischen Reizen aus. Gemäß **Bild 2.5.** sind beim zugehörigen Ablauf drei größere Abschnitte zu unterscheiden. Die *objektive Sinnesphysiologie* verfolgt die Wirkung der Reize aus der *Welt,* oft messend in mehreren Teilschritten. Die *subjektive Sinnesphysiologie* beginnt dort, wo die Reize in Sinneseindrücke übergehen. Sie lassen sich kaum extern und objektiv erfassen. Schließlich entstehen die subjektiven Wahrnehmungen. Konkreter ist das Beispiel im unteren Teil des Bildes: Wir betrachten eine Rose. Über das Auge gelangt von ihr reflektiertes Licht als spezifischer Reiz in unser Auge. In der Netzhaut verändert sich dadurch das Zellpotential der Stäbchen und Zäpfchen. Neuronen der Netzhaut leiten als Folge Aktionspotentiale weiter. Bereits in den drei Neuronenschichten der Netzhaut werden diese Signale aufbereitet. Diese Verarbeitung setzt sich in mehreren Arealen des Gehirns fort. Dabei entsteht (zunächst) der Sinneseindruck von Farben und Formen. Erst auf relativ „hoher" neuronaler Ebene wird uns als Wahrnehmung bewußt: „eine Rose".

2.7 Einteilung und Eigenschaften der Sinne

Entwicklungsgeschichtlich entstanden zunächst einzelne spezialisierte Sinneszellen. Statt einer Erregung mittels Synapsen reagieren sie auf äußere Reize. Das Ergebnis wird an Neuronen und/oder unmittelbar oder über eine komplexe Verarbeitung zu einer Muskel- und | oder einer Drüsenzelle weitergeleitet. So entstanden die drei Hauptvarianten nach **Bild 2.6.** Bei der *primären Sinneszelle* (a) sind die Dendriten eines Neurons zu Sensoren umgewandelt | umfunktioniert. Die *sekundäre Sinneszelle* (b) besteht aus einem modifizierten Neuron und einer umgewandelten Epithelzelle (Hautzelle).

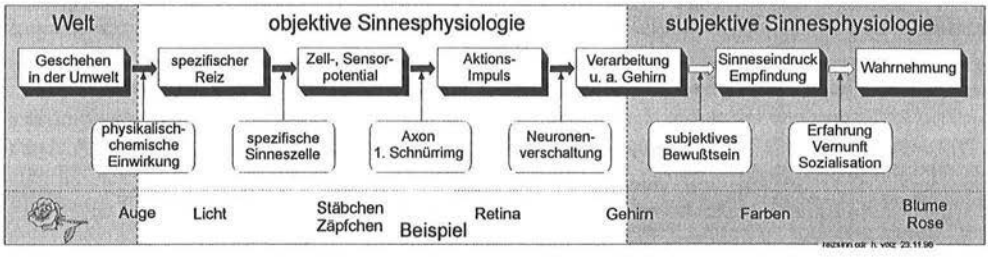


Bild 2.5 Vom Reiz aus der Welt zur subjektiven Wahrnehmung

Die umgewandelte Hautzelle besitzt kein Axon. Ein Reiz ändert aber je nach seiner Intensität ihr Potential. Das wirkt dann ähnlich wie eine Synapse auf die modifizierten und sie umfassenden Dendriten des Neurons ein. Bei der *Sinnesnervenzelle* (c) verteilen sich schließlich die Dedriten-Enden eines Neurons relativ gleichmäßig in einem Gewebe. Im Gegensatz zu den anderen Sinneszellen ist es bei ihr nicht mehr möglich, sie auf ausgewählte Reizmodalitäten (Wärme, Licht, Chemie usw.) anzupassen. Sie reagiert vielmehr unspezifisch auf alle möglichen Reize und ist zugleich wesentlich unempfindlicher.

Die Vielfalt der Reizumsetzung in Sinneszellen sei am Beispiel einer Hörzelle betrachtet (Bild 2.6d). Der mechanische Reiz verbiegt ihre Zilien und ändert so die Membranpermeabilität und damit ihr Sensor- bzw. Zellpotential. Die Wirksamkeit des Reizes kann dabei durch effektorische Axons variiert werden. Mittels chemischer Transmitter wird das Sensorpotential zum afferenten Axon übertragen und löst dort ein adäquates postsynaptisches Potential aus. Hinter dem ersten Schnürring entstehen so Aktionspotentiale bestimmter Frequenz. Das Generatorpotential und die Aktionsimpulse entstehen also an verschiedenen Stellen.

Die Evolution ließ aus einer größeren Anzahl von Sinneszellen schrittweise Sinnesorgane für ausgewählte Reizmodalitäten entstehen. Beispiele sind Auge und Ohr. Hierdurch wird sowohl die Empfindlichkeit als auch die Spezifik deutlich erhöht. Meist wird dabei der entsprechende Reiz, bevor er zu den Sinneszellen gelangt, über eine zugehörige Reizleitung selektiert und gebündelt. Beim Auge z. B. durch den dioptrischen Apparat, beim Gehör durch Trommelfell, Gehörknöchelchen und Schnecke.

Bei einem spezifischen Sinnesorgan ist die wahrgenommene Reizmodalität nur vom Organ selbst, nicht aber von der Art, wie es zur Reizung des Organs kommt, abhängig. Einen Schlag aufs Auge nehmen wir als Lichtblitz wahr, eine elektrische Reizung des Hörnervs hören wir als Geräusch. Hierin besteht eine zusätzliche Möglichkeit für die Mensch-Technik-Schnittstelle. Es kann der entsprechende Nerv elektrisch stimuliert werden. Bislang wird dies nur bei Behinderten genutzt. Das schließt aber nicht aus, daß künftig davon allgemeiner Gebrauch gemacht wird.

Die Vielfalt der Sinnesorgane und Sinneszellen ist weitaus größer, als es die landläufigen „fünf Sinne" andeuten. Für eine Systematik ist es günstig, alle bekannten – und nicht nur die des Menschen – in die Betrachtung einzubeziehen. Dann ergibt sich der Überblick von **Bild 2.7**. Zunächst sind also innen- und außenweltbezogene Sinne (Intero- bzw. Exterorezeptoren) zu unterscheiden.

Vielfach werden die *innenweltbezogenen* Wahrnehmungen nicht in entsprechende Betrachtungen einbezogen. Entsprechend dem vorigen Abschnitt und wie auch bereits in der Einleitung erwähnt, muß ihnen aber zumindest langfristig für die Mensch-Technik-Schnittstelle Beachtung geschenkt werden. Die Sinne des „Eingeweides" (Viscerosinne) betreffen u. a. Hunger und Durst. Unsere gesamte „Köperlichkeit" (Haltung und Bewegung) wird wesentlich über Bewegungsrezeptoren (Propriro-Rezeptoren) bestimmt. Sie sind vor allem in den Muskeln, Sehnen und Gelenken vorhanden. Schmerz- und Temperatur-Rezeptoren sprechen sowohl auf innere wie äußere Reize an und nehmen

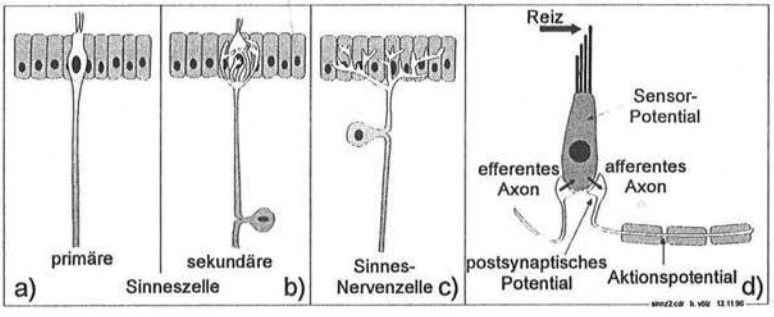


Bild 2.6 Verschiedene Sinneszellen (a - c) und Hörzelle (d) als ein spezifisches Beispiel

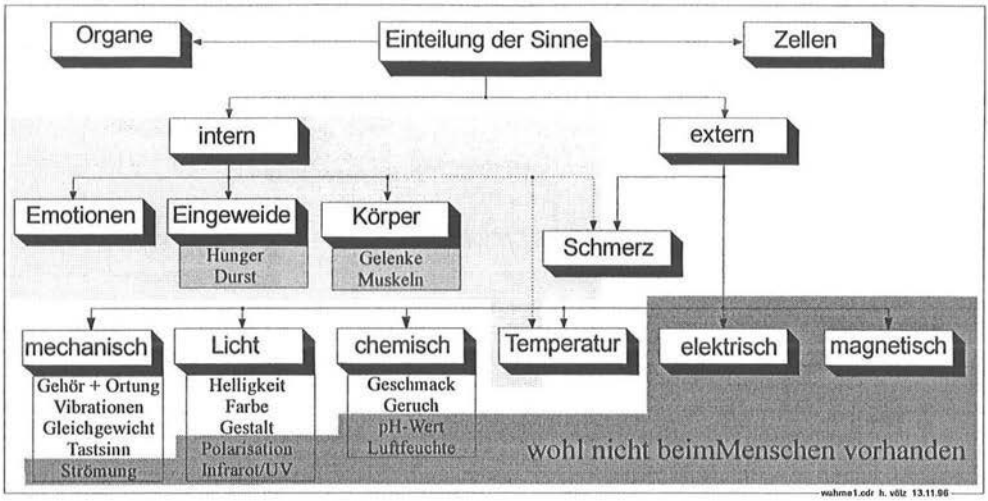


Bild 2.7 Einteilung der Qualitäten für Sinneswahrnehmungen

daher eine Zwischenstellung ein. Für die Emotionen gibt es keine spezifischen Sinneszellen. Sie sind die Widerspiegelung von Bewußseinszuständen. Wegen ihrer Bedeutung bei der Mensch-Technik-Schnittstelle wurden sie dennoch der inneren Wahrnehmung zugeordnet.

Es gibt viele und sehr verschiedene Rezeptoren und Organe, die auf *externe Reize* ansprechen. Die grau unterlegte Fläche macht deutlich, daß einige Tiere (vgl. [HOR]) Reize registrieren, für die beim Menschen (z. Z.) keine Wahrnehmungsmöglichkeiten bekannt sind. Weiter gibt es Reize, die fürs Leben und Überleben wichtig sind, für die aber dennoch bei keinem Lebewesen spezifische Sinneszellen oder Organe gefunden wurden. Beispiele sind energiereiche Strahlung (z. B. Röntgenstrahlen) und Radioaktivität.

Trotz der Vielfalt der Sinnesqualitäten ist das funktionelle Verhalten aller Sinneszellen (etwa 10^8 beim Menschen) recht einheitlich. Der Reiz bewirkt zunächst eine Permeabilitätsänderung der Membran, vor allem für die Natriumionen. Als Folge ändert sich das Ruhepotential der Zelle. Es entsteht ein Generator- bzw. Rezeptorpotential als analoge Größe, das sich elektrotonisch über die Zelle ausbreitet und auch längere Zeit bestehen bleiben kann. Bereits hierbei erfolgt meist eine Verstärkerwirkung. Für die Reizintensität R (Energie, chemische Menge usw.) gibt es eine Schwelle, ab der eine Wahrnehmung ausgelöst wird. Sie liegt z. T. sehr niedrig. Bei Licht genügen etwa $5 \cdot 10^{-17}$ W, was annähernd einem Photonen entspricht. Für Schall sind es sogar nur 10^{-17} W. Dazu gehört eine Schwingungsamplitude weit unterhalb des Atomdurchmessers. Da ein Aktionspotential 10^{-11} W aufbringt, erfolgt bereits in der Sinneszelle eine große Verstärkung. Die dazu notwendige Hilfsenergie stammt aus dem Stoffwechsel der Zelle. Meist wird die Intensität des Reizes in die Frequenz von Impulsfolgen kodiert (**Bild 2.8**a bis d). Erst nach komplexer Verarbeitung im Nervensystem entsteht die subjektive Empfindungsstärke E der Wahrnehmung (Bild 2.8e) des Reizes.

Infolge ihrer hohen Empfindlichkeit besitzt fast jede Sinneszelle eine Ruheaktivität mit nur wenigen Impulsen je Sekunde. Sie ist hauptsächlich thermodynamisch begründet und entspricht deshalb einem Rauschen. Von der Schwelle an ändert sich dann die Frequenz, häufig annähernd proportional zum Logarithmus der Reizintensität (Bild 2.8a). Selten tritt eine direkte Proportionalität oder gar ein Maximum der Frequenz bei einer definierten Reizintensität (Bild 2.8b) auf. Unabhängig davon existiert unterschiedliches Verhalten bei länger anhaltendem Reiz (Bild 2.8c). Der tonische Verlauf mit konstanter Impulsfrequenz ist hier fast die Ausnahme. Häufiger ist schon ein tonisch verzögerter Ver-

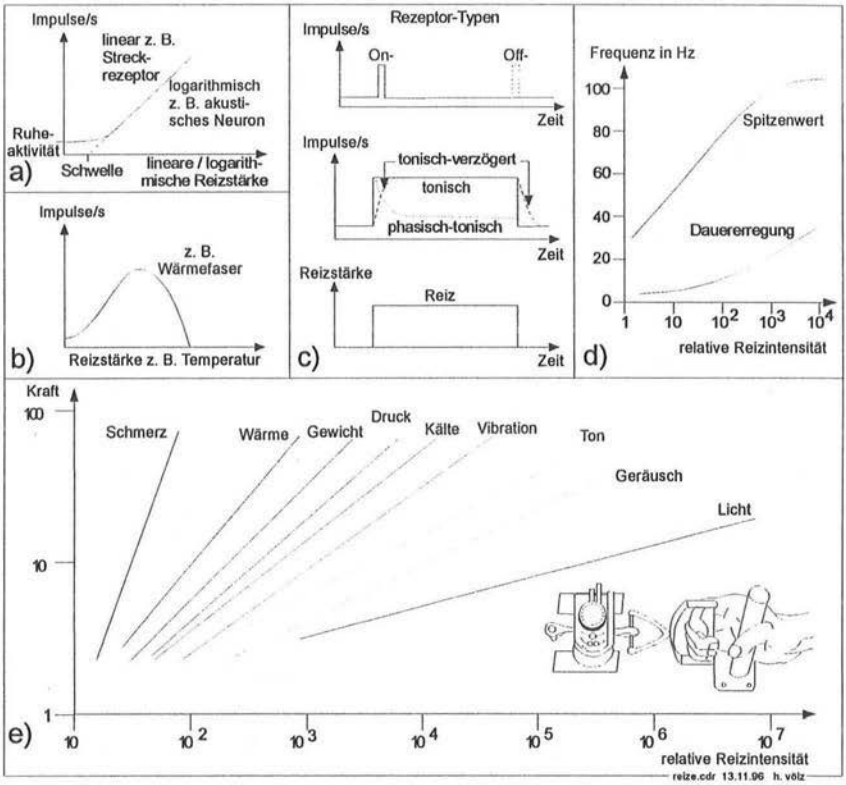


Bild 2.8 Zusammenhänge zwischen physikalisch-chemischen Reiz und physiologischer Wirkung

lauf. Hier benötigt die Zelle bis zur vollen Impulsfrequenz einige Zeit, und beim Enden des Reizes klingt sie verzögert ab. Häufig tritt ein phasisch-tonischer Verlauf auf. Dabei wird zunächst sehr intensiv und dann abgeschwächt auf den Reiz reagiert. Typische Frequenzen für die maximale Reaktion zu Beginn und die geschwächte bei anhaltendem Reiz zeigt Bild 2.8d. Schließlich gibt es noch On- bzw. Off-Rezeptoren. Hier wird *nur* zu Beginn oder beim Ende des Reizes die Impulsfrequenz erhöht. Der phasisch-tonische Rezeptor kann auch als eine Kombination vom On-Off- und vom tonischen Rezeptor aufgefaßt werden.

Zur Bestimmung des subjektiven Empfindens hat die Physiologie mehrere Meßmethoden entwickelt. Eine besonders gut einsichtige ist in Bild 2.8e mit zugehörigen Meßwerten dargestellt. Hierbei werden unterschiedliche Reizarten (z. B. Licht) variabler Intensität angeboten. Der Proband zieht am Kraftmesser so stark, wie er den Reiz empfindet. Alle Kurven verlaufen im doppelt-logarithmischen Maßstab linear, weichen jedoch erheblich in der Steilheit ab. Dadurch ist für die einzelnen Reizarten das meßbare Verhältnis (Reizumfang, Dynamik) vom kleinsten zum größten Reiz sehr verschieden. Während es bei Schmerz etwa nur 1:10 beträgt, sind bei Schall und Licht Verhältnisse von 1:10000 möglich. Die maximal wahrnehmbaren Verhältnisse sind noch größer (s. u.).

Eine systematische Zusammenfassung der verschiedenen Einflüsse und Eigenschaften bei der Wahrnehmung von Reizen zeigt **Bild 2.9**. Es gibt also zwei subjektive Schwellen. Bei der indifferenten spüren wir nur „da ist etwas" oder nicht. Wird der Reiz intensiver, so können wir auch entscheiden, um was für einen Reiz es sich handelt. Erst jenseits dieser zweiten Schwelle können wir weitere

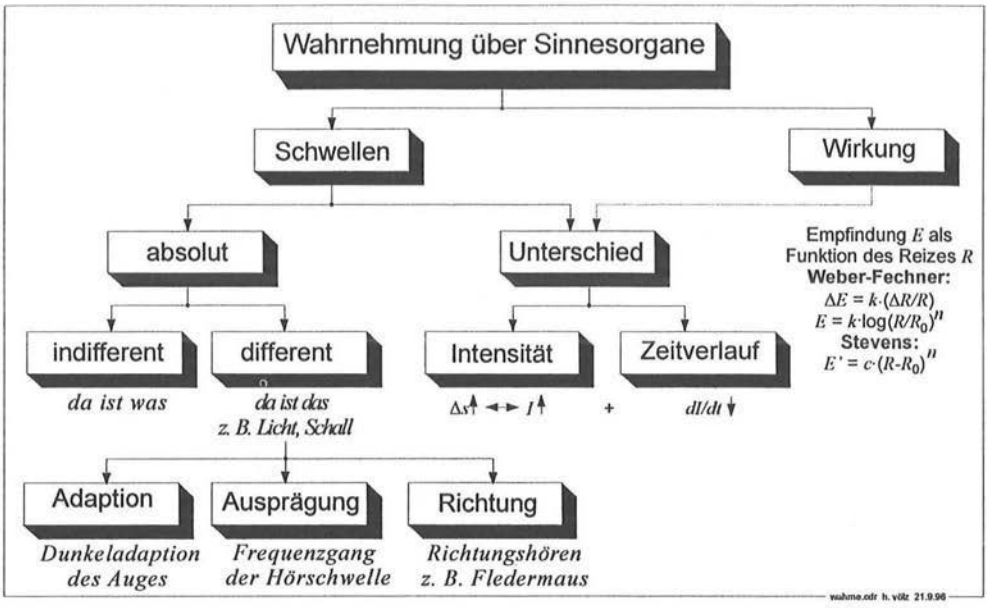


Bild 2.9 Schwellen und Zusammenhänge mit Intensität und Zeit bei Sinneszellen

Details feststellen. Sie betreffen u. a. die Intensität (Kennlinie) und den Zeitverlauf. Aber auch die Ausprägung eines Reizes ist von Einfluß. So können wir nicht alle Schallfrequenzen gleich gut hören oder alle Lichtfrequenzen (Farben) gleich gut sehen. Vielfach passen sich die Rezeptoren und das Nervensystem sehr langsam, also stark verzögert, der Reizstärke an. Es erfolgt dann eine Adaption. Bis zur vollständigen Dunkeladaption des Auges können dabei durchaus dreißig Minuten vergehen. Bei einigen Reizen ist auch die Richtung und/oder Entfernung der Quelle zu orten. Weiter existieren Unterschiedsschwellen. Sie geben an, ab wann eine Eigenschaftsänderung (Lautstärke, Farbe usw.) wahrnehmbar wird. Diese Schwellen Δs hängen von vielen Parametern ab. Besonders stark gehen die Intensität I und der zeitliche Verlauf dI/dt ein:

$$\Delta s = f\left(I, dI/dt\right).$$

In der Regel wachsen die Unterschiedsschwellen mit zunehmender Intensität und geringer werdender Änderungsgeschwindigkeit.

Für den Zusammenhang zwischen Reizintensität I und Empfindungsstärke E stellte schon Weber fest, daß in einigen Fällen etwa $\Delta I/I \approx 0{,}02$ gilt. Spätere Nachprüfungen zeigten, daß dies nur für mittlere Reizintensitäten gilt. Fechner entwickelte dann 1860 aus den ähnlichen Zusammenhängen mit einer Konstanten k das Weber-Fechnersche Gesetz:

$$\Delta E \approx k \cdot \Delta I/I.$$

Durch Integration folgt daraus

$$E \approx k \cdot \log\left(I/I_0\right) + c.$$

Als weitere Konstanten kommen also eine Bezugsintensität I_0 und c hinzu. Später stellte Stevens fest, daß ΔE keine absolute, sondern eine relative Größe ist, die sich durch eine Rational-Skala beschreiben läßt. Es ist daher kein Vergleich mit einer anderen Sinnesmodalität erforderlich:

$$\frac{\Delta E}{E} = k \cdot \frac{\Delta I}{I}$$

Die Integration ergibt dann

$$E_S \approx k_S \cdot (I - I_{0S})^n.$$

Da die Formelgrößen nicht identisch sind, wurde hier überall S als Index hinzugefügt. Ein brauchbarer Zusammenhang mit der Weber-Fechnerschen Beziehung läßt sich durch $I_s \sim \log(I)$ erreichen. Für den Exponenten gilt die folgende Tabelle. Beim Vergleich mit der Handkraft ist dann zu beachten, daß für sie ein Exponent von 1,7 gilt.

Reizart	Exponent n	Dynamikbereich	Unterscheidbare Stufen
Schmerz	2,1	15 dB; 1:8	≈5
Wärme	1,6	33 dB; 1:40	≈20
Schwere	1,5	24 dB, 1:17	≈50
Druck	1,1	20 dB; 1:10	≈50
Kälte	1,0	20 dB; 1:10	≈10
Vibration	0,95	50 dB; 1:300	≈100
Schall	0,6	100 dB; $1:10^5$	400 Lautstärken
Licht	0,33	130 dB; $1:3 \cdot 10^6$	600 Helligkeiten

2.8 Einfache Neuronenschaltungen

Neuronen sind meist sehr kompliziert verschaltet. Hier werden nur wenige, einfache Verschaltungen betrachtet, wie sie z. B. unmittelbar hinter den Sinneszellen folgen. Sie sind im **Bild 2.10** zusammengefaßt. Bei der *einfachen Kette* durchläuft die Erregung mehrere Neuronen nacheinander. An jedem Neuron wird sie dabei jeweils um die typische und z. T. von der Reizintensität abhängige Zeit verzögert. Bei der *Konvergenz* wirken mehrere Neuronen gemeinsam auf ein anderes Neuron ein. Je nach der Schwelle dieses Neurons und der Wirksamkeit der einzelnen Synapsen entsteht ein Aktionspotential nur dann, wenn annähernd gleichzeitig mehrere Reize eintreffen. Bei der *Divergenz* wirkt ein Neuron (Sinneszelle) über Kollateralen auf mehrere andere Neuronen ein. Je nach ihrem Zustand (ihrer Vorerregung) können dann prinzipiell alle die Erregung weiterleiten. Überlagern sich Divergenz und Konvergenz, so entsteht u. a. die *Vorwärtsbahnung*. Die aus einem Neuron (Sinneszelle) stammende Erregung beeinflußt dabei auch die seitlichen Neuronen. Sie können dadurch leichter von den ihnen vorgelagerten Neuronen (Sinneszellen) erregt werden. Diese Schaltung gibt es auch zweidimensional. Die Erregungsmuster laufen dann häufig räumlich auseinander, werden also unschärfer. Mittels hemmender Synapsen können weitere Schaltungen entstehen. Die *rekurrente Hemmung* bewirkt, daß erst dann ein zweiter Reiz wirksam werden kann, wenn die verzögerte Erregung des hemmenden Neurons abgeklungen ist. Das Gegenteil liegt beim *Erregungskreis* vor. Er verstärkt Impulse, die entsprechend der Verzögerungszeit aufeinander folgen. Die *rückwärtige Hemmung* ist strukturell das Gegenteil der Vorwätsbahnung. Sie bewirkt eine Versteilerung von örtlich begrenzten Erregungsmustern. Sie kann auch als Kombination von rekurrenter Hemmung und der *lateralen Inhibition* aufgefaßt werden.

Die laterale Inhibition wurde 1959 von Ratcliff und Hartline am Facettenauge des Pfeilschwanzkrebses Liniulus experimentell entdeckt. Sie gilt noch immer als Musterbeispiel einfacher, leistungsfähiger Neuronenschaltungen. Wegen des Daleschen Gesetzes ist die reale Verschaltung allerdings deutlich komplizierter als in dem üblichen, einfachen Schema von Bild 2.10 unten. Für die Hemmung sind nämlich Zwischenneuronen notwendig, die den erforderlichen Transmitter besitzen müssen. An der Schaltung mit fünf Sinneszellen sei das Wirkprinzip erklärt. Für das Verhalten der Schaltung ist die Reizverstärkung bzw. -schwächung an den einzelnen Lateralneuronen L wichtig. Im Beispiel leiten sie nur ein Viertel der direkten, erregenden Energie weiter.

Die Erregung der Neuronen wird nun so angenommen, daß links beginnend zwischen der zweiten und dritten Sinneszelle die Lichtintensität sprunghaft von 4 auf 8 anwächst. Zum mittleren Horizon-

tal-Neuron **H** gelangt dann die Erregung -4·0,25 +8 -8·0,25 = 5. Das Bild zeigt, welche Erregungen an den 5 Ausgängen entsteht. Es sind die Werte 2, 1, 5, 4 und 4. Insgesamt ergibt sich also eine deutliche Versteilerung (1,5fach) gegenüber der Eingangsinformation. Solche Reizüberbetonungen an Grenzen sind auch für unser Sehen als Machsche Streifen bekannt. Sie dürften dann aber auf kompliziertere Weise entstehen.

Wird in der Schaltung der lateralen Inhibition die Wirksamkeit der Lateralneuronen auf 0,5 erhöht, so verschwinden die konstanten Erregungen völlig und es bleibt nur der Intensitätssprung am Übergang bestehen.

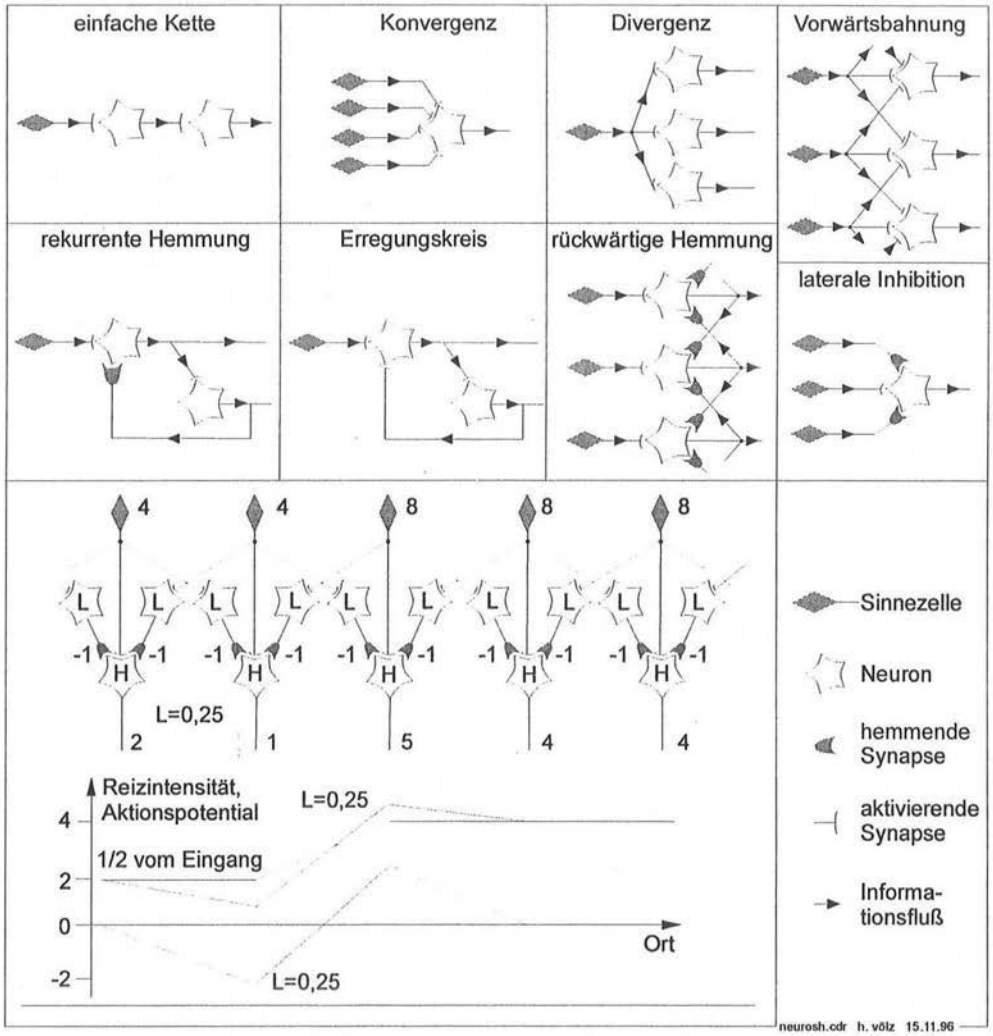


Bild 2.10 Einfache Neuronenschaltungen und das Beispiel der lateralen Inhibitition

3 Sehen

3.1 Das Auge

3.1.1 Aufbau des Auges

Den prinzipiellen Aufbau des menschlichen Auges zeigt **Bild 3.1a**. Seinen vorderen Teil bestimmt die Linse mit einem Durchmesser von etwa 9 mm; im hinteren ist die 0,2 bis 0,4 mm dicke Netzhaut mit etwa 700 mm^2 Oberfläche wesentlich. Außen ist der Augapfel von einer relativ harten Haut eingehüllt und dadurch stabilisiert. Vorne ist sie durchsichtig, ca. 1 mm dick, besitzt einen Krümmungsradius von 7,7 mm und wird als Hornhaut bezeichnet. Der hintere Teil ist etwa 2 mm dick, besitzt einen Radius von nur 6,8 mm und heißt Lederhaut. Die zweite Schicht (schwarz gezeichnet) dient der Ernährung. Sie bildet vorn die Regenbogenhaut (Iris) und erzeugt die zwischen 3 und 8 mm große Pupille. Die Netzhaut (Retina) ist hier eine dritte Schicht. Zwischen Hornhaut und Linse befindet sich das Kammerwasser. Die Eigenschaften der Linse werden durch die Cilliar-Muskeln den jeweiligen Erfordernissen angepaßt. Grenzwerte treten bei der typischen Fern- bzw. Naheinstellung auf. Hierzu gehören die folgenden Krümmungsradien: vorn = 7,7 | 5,3mm; hinten = 6,8 | 5,3 mm und die Dicke = 3,7 | 4,4 mm. Mit dem inneren Glaskörper entsteht so eine totale Brennweite von 17 | 14 mm. Zum Auge gehören noch etliche Schutz- und Hilfsorgane, wie Augenlider, Bindehaut und Tränenapparat (sind nicht im Bild zu sehen). Bewegt wird das Auge von sechs Muskeln mit insgesamt 10^5 Muskelfasern, die von $2 \cdot 10^4$ Nervenfasern gesteuert werden. Der Sehnerv verläßt den Augapfel hinten ungefähr gegenüber der Linse.

3.1.2 Die Netzhaut

Den prinzipiellen Aufbau der Netzhaut zeigt Bild 3.1b. Das Licht muß erst mehrere Neuronen und verschiedene Stützzellen (in den Bildern nicht dargestellt) durchdringen, bevor es zu den eigentlichen Sinneszellen gelangt. Davon gibt es zwei Varianten:

- Die etwa $5 \cdot 10^8$ Stäbchen ermöglichen nur ein Hell-Dunkel-Sehen.
- Die ca. $5 \cdot 10^6$ Zäpfchen sind dicker, existieren in den drei Untervarianten für blau, gelb-grün und rot. Sie dienen dem Farbsehen.

Bild 3.1c zeigt eine typische Verschaltung der Netzhaut. Die Erregung (Zellpotential) der Sinneszellen gelangt zu den $5 \cdot 10^6$ Bipolarzellen (Interneuronen). Während bei den Zäpfchen überwiegend eine 1:1-Verschaltung vorliegt, wirkt meist eine größere Anzahl von Stäbchen auf eine Bipolarzelle ein. Das trägt u. a. zu einer deutlich höheren Lichtempfindlichkeit beim Helligkeitssehen bei. Die Aktionspotentiale der Bipolarzellen werden zu den etwa 10^6 Ganglienzellen geleitet, deren Axons den Sehnerv mit rund 4,5 mm Dicke bilden.

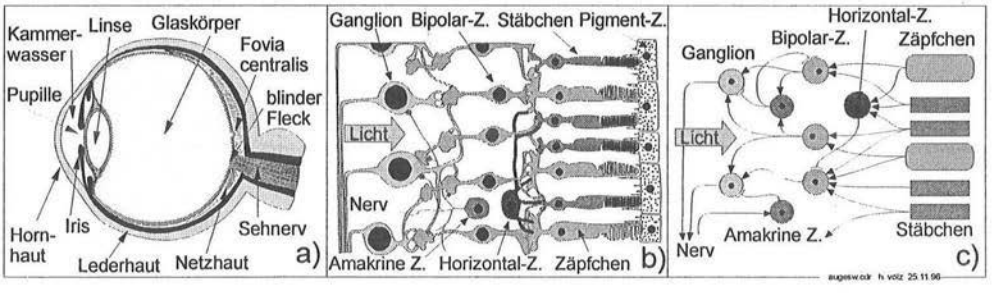


Bild 3.1 Das Auge und seine Netzhaut sowie deren formale Verschaltung

In der Netzhaut erfolgt bereits eine beachtliche Informationsverarbeitung. So bewirken die Horizontalzellen (Anzahl < 10^6) u. a. eine gewisse laterale Inhibition (vgl. Bild 2.10) und erhöhen damit den Kontrast von örtlichen Helligkeitssprüngen. Die amakrinen Zellen (<10^6) erzeugen mittels Hemmung verschiedene Verschaltungen, u. a. eine zusätzliche laterale Inhibition und eine rekurrente Hemmung. Sie können außerdem efferent durch Hemmung die Empfindlichkeit des Auges über die Ganglienzellen beeinflussen. Die Komplexität der Netzhaut ist jedoch weitaus größer als es diese wenigen Beispiele zeigen. So lassen sich schon im Sehnerv Aktionspotentiale nachweisen, die z. B. nur bei bestimmten Richtungen von Hell-Dunkel-Grenzen reagieren oder die einen On- bzw. Off-Effekt zeigen. Dies ist aus der Evolution verständlich, wonach die Netzhaut durch Vorverlagern eines Teils des Gehirns entstanden ist. Weiter ist nachgewiesen, daß bereits in einem sehr frühen Säuglingsalter durch dargebotene Bilder spezielle Verschaltungen entstehen. Werden höhere Wirbeltiere die ersten Wochen ohne Lichteinflüsse aufgezogen, so ist es für sie später kaum mehr möglich, die Fähigkeit der Bilderkennung zu erwerben.

Eine spezielle Bedeutung (Lichtregelung, s. S. 28) kommt den etwa sechseckigen Pigmentepithelzellen zu. Sie enthalten viele braune Melaninkörner (1 bis 5 µm Ø) und verbinden die Netzhaut mit der Lederhaut.

Im Bild 3.1a sind zwei typische Stellen der Netzhaut zu erkennen: Dort wo der Sehnerv das Auge verläßt, gibt es keine Sinneszellen. Dort liegt der blinde Fleck. Besonders auffällig ist der gelbe Fleck (Fovia centralis etwa 3 mm Ø). Hier existieren ausschließlich eng aneinander gepreßte Zäpfchen (vgl. S.30 Bild 3.9). Bei etwa 2,5 µm Abstand sind es insgesamt 10^5, also 10 % aller Zäpfchen. Jedes von ihnen erregt genau eine Ganglienzelle. Zwei Punkte können wir daher genau noch dann unterscheiden, wenn sie auf der Retina mindestens 6 µm entfernt abgebildet werden. Das entspricht ca. 20 Winkelminuten. Da in diesem Bereich sogar alle Blutgefäße und Stützzellen fehlen, erscheint deutlich die gelbe Farbe von den Pigmenten der Zäpfchen. Auch die Stäbchen sind unterschiedlich dicht in der Netzhaut verteilt (vgl. Bild 3.9). Ihre maximale Dichte befindet sich um reichlich 20° von der Fovea centralis entfernt. Da die Zäpfchen besonders gut bei geringer Lichtintensität arbeiten, muß in dunklen Umgebungen, z. B. bei Sternbeobachtungen, ein extra-foviales Sehen geübt werden. Weil dort aber eine Vielzahl von Zäpfchen zusammengeschaltet sind, wird eine deutlich geringere Auflösung erreicht.

3.1.3 Die Sehzellen

Ein Zäpfchen (**Bild 3.2a**) ist mit etwa 7 µm deutlich dicker als ein Stäbchen. In seinen typischen Membranausfaltungen befindet sich das für das Sehen wichtige Rhodopsin.

Ein typisches Stäbchen (Bild 3.2b) ist etwa 100 µm lang und 1,5 µm dick. Im Außenglied (25 - 30 µm) befinden sich ca. tausend Scheibchen. Die Scheibchendicke beträgt etwa 15 nm. Jede Membran ist rund 7 nm dick (Bild 3.2c). Der Raum zwischen beiden Membranen beträgt etwa 0,5 nm. In den Membranen sind die Rhodopsinmoleküle (Sehpurpur) eingelagert (Bild 3.2d).

Das Rhodopsin enthält im wesentlichen Retinal und Opsin. Das Protein Opsin besteht u. a. aus etwa 350 Aminosäuren, hat ein Molekulargewicht um 40000, besitzt 4,2 nm Ø und 7 nm Länge (Bild 3.2e). In der Membran ist jedes Rhodopsinmolekül von etwa 70 Lipidmolekülen umgeben. In einem Scheibchen befinden sich etwa 10^6 Rhodopsinmoleküle, in einem Stäbchen also 10^9. Das Retinal ist ein Aldehyd des Vitamins A1 bzw. A2. Deshalb existieren auch die zwei Varianten Retinal 1 und 2. Reines Retinal besitzt ein Absorptionsmaximum bei 370 nm (ultraviolett). In Verbindung mit dem Opsin verlagert es sich, je nach dessen Struktur, auf etwa 500 nm (grün-gelb, Sehpurpur). Unter Lichteinwirkung erfolgt beim Rhodopsin (Retinal) eine Vielzahl von fein abgestuften Prozessen mit chemischen und strukturellen Umwandlungen beider Komponenten. Die wichtigsten Zusammenhänge zeigt Bild 3.2f. Die eigentliche und primäre Reaktion auf Licht erfolgt innerhalb von 2 ps. Hierbei geht das Retinal von der 11-cis- in die trans-Form. Dann folgen mehrere automatisch ablaufende Prozesse (also ohne Licht) mit Zeitkonstanten zwischen 150 ms, einigen µs bis zu Sekunden und Minuten. Sie betreffen sowohl das Opsin als auch das Retinal. Die längeren Zeiten treten vor

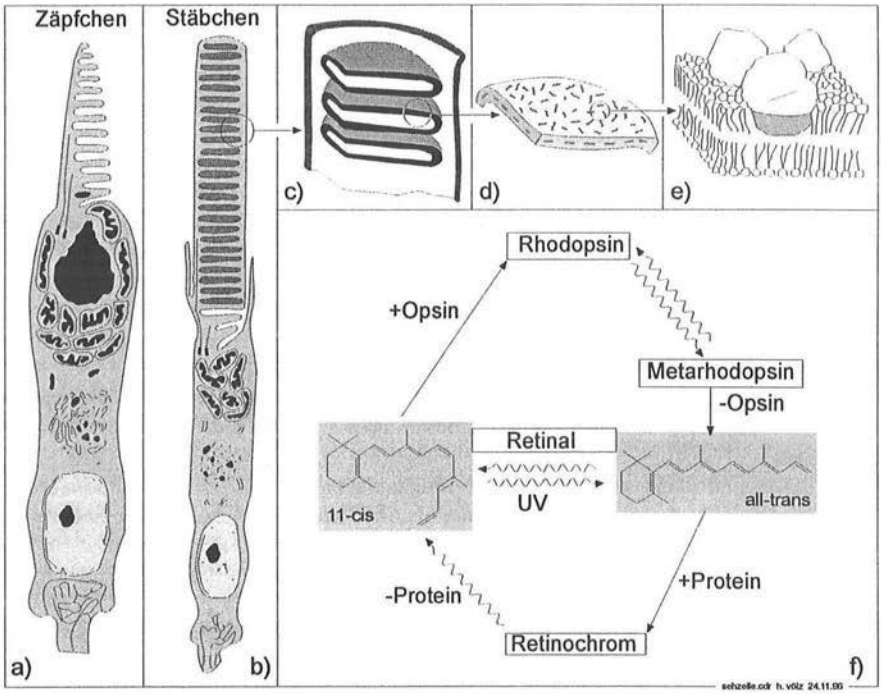


Bild 3.2 Aufbau von Sehzellen und chemische Prozesse beim Sehpurpur

allem beim Wiederaufbau der lichtempfindlichen 11-cis-Verbindung in Erscheinung und verlangen Energiezufuhr.

Die Sehzelle nutzt, wie jede andere Zelle, den aktiven Ionentransport mittels der Ka-Na-Pumpen. Im Außensegment sind etwa 3000 Na-Kanäle vorhanden, die einen Fluß um $5 \cdot 10^8$ Ionen/s bzw. 100 pA bewirken. Bei der Veränderung des Rhodopsins wird dieser Fluß für etwa 0,3 s blockiert. Die Wirkung eines Lichtquants betrifft etwa $5 \cdot 10^4$ Ionen. Als Folge davon wird das Zellpotential im Außensegment vergrößert und dann über die Synapsen weitergeleitet. Bereits ca. 5000 Photonen/s führen zu einer Sättigung des Membranpotentials. Die Quantenausbeute des Rhodopsinmoleküls liegt bei etwa 0,65. Für die erste Strukturänderung eines Moleküls ist nur eine Energie von etwa 10^{-19} J erforderlich. Ein Photon mit $\lambda \approx 500$ nm besitzt die etwa dreifache Energie. Bezogen auf das Aktionspotential ist die Verstärkung der Sehzellen 10^5- bis 10^6-fach. Mittels afferenter Signale kann aber die Empfindlichkeit der Sehzelle bis auf das 10^{-5}-fache abgesenkt werden.

3.1.4 Signalverarbeitung und Steuerung

Sehen erfolgt keineswegs rein passiv. Es ist vielmehr eine hoch komplexe Leistung, bei der auch ein vielfacher efferenter und afferenter Signalfluß einbezogen wird (**Bild 3.3a**). Zusätzlich zu der Informationsverarbeitung in der Netzhaut und im Gehirn erfolgt so u. a. über viele Nervenzentren und Muskeln eine Steuerung der Augenbewegung, der Pupille und der Linse. Unabhängig vom Sehen wird die Pupille auch erheblich vom vegetativen System beeinflußt (vgl. den Zusammenhang mit Emotionen, S. 8). Generell wird die Augen-Motorik vom Thalamus, Colliculus superior (Vierhügel), von der motorischen Sehrinde (Area 4 und 6 der Großhirnrinde) und schließlich vom Vestibularsystem (Gleichgewichtsorgan) gesteuert. Auf diese Weise können alle Bewegungen von Körper, Kopf und Augen im Gehirn so verrechnet werden, daß ein konstanter Eindruck von der Umwelt entsteht.

Dabei werden die Signale beider Augen miteinander vernetzt. So gelangen etwa 30% der Nerven des linken Auges gezielt in der rechten Hirnhälfte (und umgekehrt). Dies erfolgt zunächst in der Sehnervenkreuzung (Chiasma opticum; Bild 3,3b). Dadurch entsteht einmal ein deutlich seitlich vergrößertes Gesichtsfeld von seitlich über 180° hinaus (Bild 3.3c). In einem Raumwinkel von etwa 90° ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit zum binokularen, also räumlich stereoskopischen Sehen.

Die Verarbeitung der Aktionspotentiale des Sehnerves erfolgt zunächst im Kniehöcker und schließlich in den drei Schichten der Sehrinde (Area striata; Area 17 bis 19). Ab Area 18 ist dabei weitgehend die auf der Retina abgebildete Struktur verschwunden. Es existieren aber Blöcke, sogenannte Hypersäulen von etwa $2 \times 1 \times 1$ mm^3. Ihre größere Abmessung zeigt zur Rindenoberfläche (Bild 3.3d). In ihnen sind Signale des rechten und linken Auges für einen größeren „Bildausschnitt" zusammengefaßt. Die hintereinander liegenden Schichten der Säulen sind auf einzelne Kontrastrichtungen spezialisiert. Entlang ihrer Höhe werden andere Bildspezifika erfaßt. In jedem Block sind zylinderförmige Blobs vorhanden, die für die Wahrnehmung zuständig sind. Hier erfolgt u. a. die Aufbereitung des Farbsehens (Bild 3.3e). Durch Addition der Aktionspotentiale aller Zäpfchenarten wird zunächst ein Wert für die Helligkeit gebildet. Durch gemischte Hemmung und Addition werden weiter zwei Signale für Gegenfarben gebildet. Einmal sind das blau und gelb, wobei gelb zuvor durch Addition der roten und grünen Signale entsteht. Zum anderen sind es grün und pupur, wobei zuvor purpur aus blau und rot entsteht. Das Verhältnis der so zusammen geschalteten Sehzellen beträgt dabei etwa blau : grün : rot = 1 : 10 : 10. Wie noch im Abschnitt 3.3.2 gezeigt wird, lassen sich die Zusammenhänge recht gut am Farbenkreis erklären (Bild 3.3f). Es entstehen ±-Werte für die Gegenfarben als zwei Richtungsvektoren. Jeder Farbton entspricht also einer Richtung vom Mittelpunkt aus. Die Farbsättigung entspricht der Länge dieses Vektors.

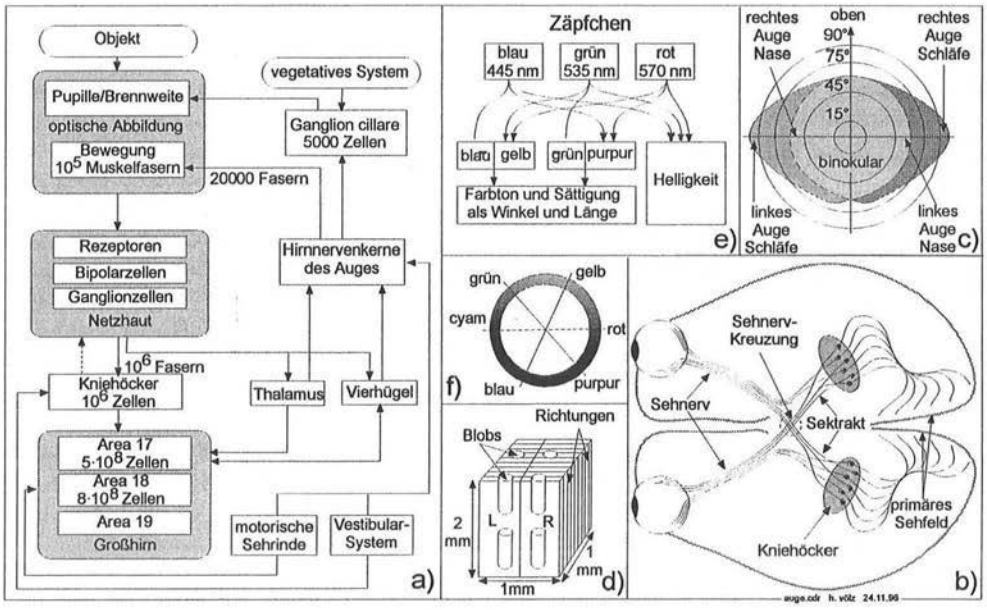


Bild 3.3 Zur Vielfalt der Zusammenhänge beim Sehen

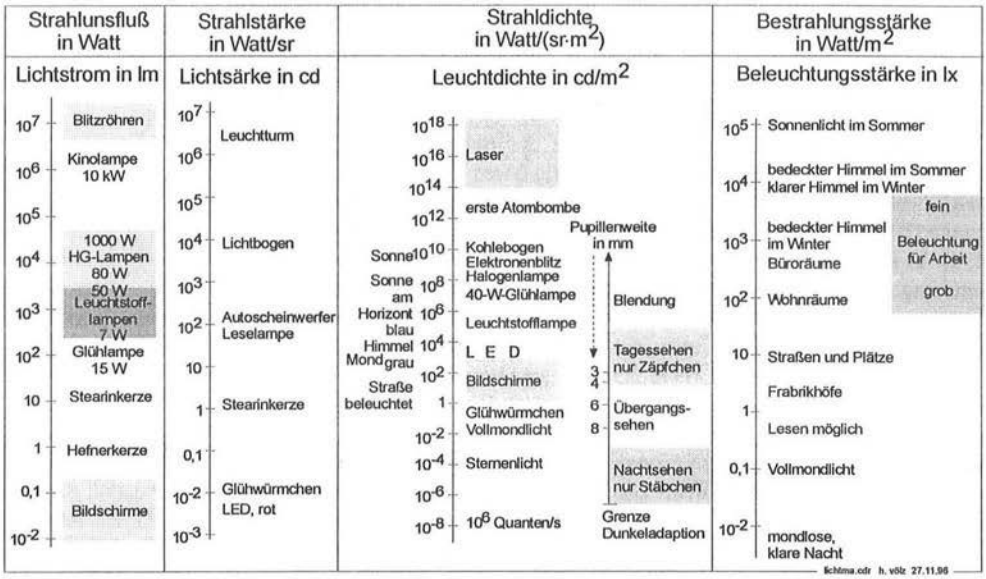


Bild 3.4 Überblick zu den wichtigsten Lichtmaßen (graue Flächen deuten Streubereiche an)

3.2 Wichtige Größen

3.2.1 Lichtmaße

Lichtmaße beruhen primär auf physikalischen Strahlungsmessungen. Für unser Sehen werden sie mit einer genormten Spektralkurve (s. S. 30) bewertet und führen so zu den speziellen Einheiten. Typische Zahlenwerte zeigt **Bild 3.4** [VÖA]. Der physikalische Strahlungsfluß einer Quelle wird in Watt angegeben. Über die Bewertung entsteht daraus der Lichtstrom in Lumen (lm). Viele Lichtquellen, wie Scheinwerfer oder Leuchttürme, bündeln ihr Licht in bestimmte Richtungen. Das im Raumwinkel abgestrahlte sichtbare Licht wird in Candela gemessen (1 cd = 1 lm/sr; sr = Stereoradient). Bei üblichen Glühlampen entsprechen die cd-Werte grob ihrer Watt-Zahl. Aktiv und passiv strahlende Flächen besitzen eine bestimmte Leuchtdichte, die in cd/m^2 gemessen wird. Da dieses Maß für unser Sehen besonders wichtig ist, wurde die Skala im Bild etwas ausführlicher gehalten. Sie zeigt u. a., ab wann wir überhaupt etwas sehen, ab wann Farbe, und ab wann wir geblendet werden. Nur bei mittlerer Helligkeit erfolgt eine Änderung der Pupillenweite. Für die Beleuchtung von Gegenständen und Flächen ist die Beleuchtungsstärke in Lux (lx) wichtig. Physikalisch entspricht sie Watt/m^2.

3.2.2 Abbildungsgüte

Die Abbildung der Umwelt mittels der Linse auf unserer Netzhaut ist keineswegs ideal. Es treten dabei viele Mängel auf. Durch neuronale Verarbeitung werden sie allerdings meist so gut kompensiert, daß wir sie im Normalfall nicht wahrnehmen. Einen Überblick zu den möglichen Fehlern gibt **Bild 3.5**. Wie alle optischen Materialien besitzt auch unsere Linse eine Dispersion des Brechungsindexes. Hierdurch werden blaue Lichtstrahlen stärker als rote gebrochen (Bild 3.5a und b). Dies bewirkt, daß Ränder zuweilen mit einem scheinbaren Farbrand sichtbar werden. Relativ deutlich ist das dann zu bemerken, wenn man die Pupille durch ein Blatt etwa zur Hälfte abdeckt, und das Auge so auf einen Helligkeitssprung (z. B. Fensterkante) blickt.

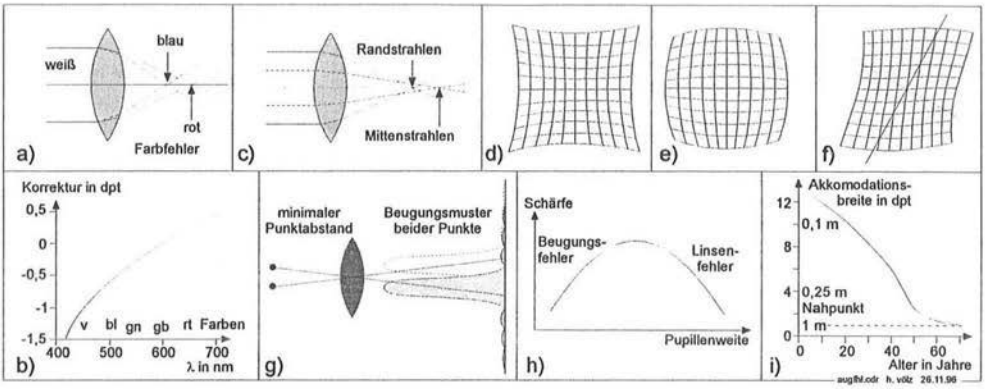


Bild 3.5 Zusammenstellung der wichtigsten optischen Fehler des Auges sowie seine Akkomodation (i)

Bei einer dicken Linse, wie sie in unserem Auge vorliegt, werden Randstrahlen stärker als Mittenstrahlen gebrochen (Bild 3.5c). Hierdurch entsteht eine unscharfe Abbildung. Zusätzlich können kissen- und tonnenförmige Verzerrungen auftreten (Bild 3.5d und e). Weiter ist unsere Linse nicht völlig rotationssymmetrisch. Daher ist ihre Brennweite richtungsabhängig. Es gibt je eine Achse der kleinsten und größten Brennweite. Durch diesen Astigmatismus wird u. a. ein quadratisches Raster gemäß Bild 3.5f verformt. Neben diesen strahlenoptischen Fehlern gibt es Störungen, die von der Wellennatur des Lichtes herrühren. Durch die Interferenz von Licht entsteht aus einem Lichtpunkt ein Beugungsmuster mit komplexer Helligkeitsstruktur (Bild 3.5g). Zwei Punkte sind nur dann zu unterscheiden, wenn die beiden zugehörigen Maxima einen hinreichend großen Abstand besitzen. Insgesamt treten sowohl für kleine Pupillen infolge der Beugung als auch für große Pupillen infolge der strahlenoptischen Unzulänglichkeiten Fehler auf (Bild 3.5h). Bei einem mittleren Wert ist also die Schärfe am besten. Für das Auge liegt er bei etwa 3 mm Pupillenweite.

Zusätzliche Unschärfe kann durch mangelhafte Scharfeinstellung auftreten. Für verschiedene Entfernungen wird ja die Brennweite unserer Linse geändert. In der Jugend kann dabei ein Entfernungsbreich von etwa 10 cm bis ∞ erreicht werden. Mit dem Alter läßt die Fähigkeit der Linse zur Akkomodation deutlich nach (Bild 3.5i). Es werden meist eine, teilweise sogar mehrere Brillen (z. B. für das Lesen, das Fernsehen und im Freien) benötigt.

3.2.3 Adaption

Reale Lichtverhältnisse ändern sich bis zu etwa 15 Zehnerpotenzen (vgl. Bild 3.4). Die Änderung der Pupille von 2,5 bis 8 mm gleicht aber nur ein Verhältnis von 1:10 aus. So ergäbe sich der Verlauf der gestrichelten Kurve „voller Ausgleich" in **Bild 3.6a**. Der wirklich auftretentende Verlauf sieht deutlich anders aus, sogar dann, wenn er für kleine Testobjekte mit 30 bzw. 6 Winkelminuten (strichpunktiert) ermittelt wird. Einmal trägt hierzu die neuronale Steuerung der Empfindlichkeit der Sehzellen bei (s. S. 22) und zum anderen zwei Bewegungen in der Retina (Bild 3.6b). Bei dunklem Licht tauchen die Zäpfchen tiefer in die Pigmentzellen hinein, während die Stäbchen sich herausbewegen. Außerdem wandern die Mealinkörner aus den Fortsätzen der Pigmentzellen heraus. Bei hellem Licht erfolgt genau die umgekehrte Bewegung. Beide Prozesse benötigen einige Minuten. So ergibt sich die Adaptionskurve von Bild 3.6c. Sie zeigt unterschiedliches Zeitverhalten für die Stäbchen und Zäpfchen. Dabei ist zwischen dem Tagessehen mit nur Zäpfchen und dem Nachtsehen mit nur Stäbchen zu unterscheiden. Die bestmögliche Position der Stäbchen ist bereits bei einer Leuchtdichte von etwa 10^{-5} cd/m^2 nach grob 20 Minuten erreicht.

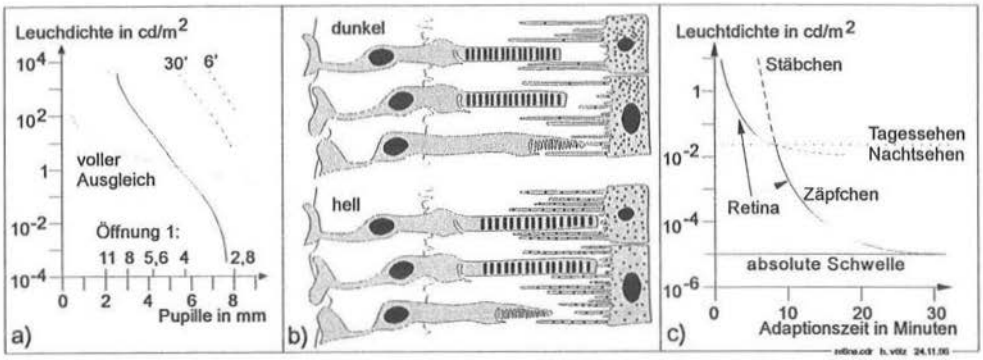


Bild 3.6 Geschehen bei der Helligkeitsadaption des Auges

3.2.4 Auflösungsschwellen

Erfolgt eine periodische Änderung der Helligkeit|Farbe eines Objektes langsam, so nehmen wir das als Flimmern wahr. Mit wachsender Frequenz verschwindet es, und wir nehmen schließlich einen konstanten Mittelwert wahr. Diese Grenze ist auch von der Leuchtdichte abhängig. Einen Überblick dazu gibt **Bild 3.7a**. Beim Fernsehen und bei Monitoren ist ein Bildwechsel von etwa 75 Hz die untere Grenze, bei der auch bei größerer Helligkeit das Flimmern nicht mehr auftritt.

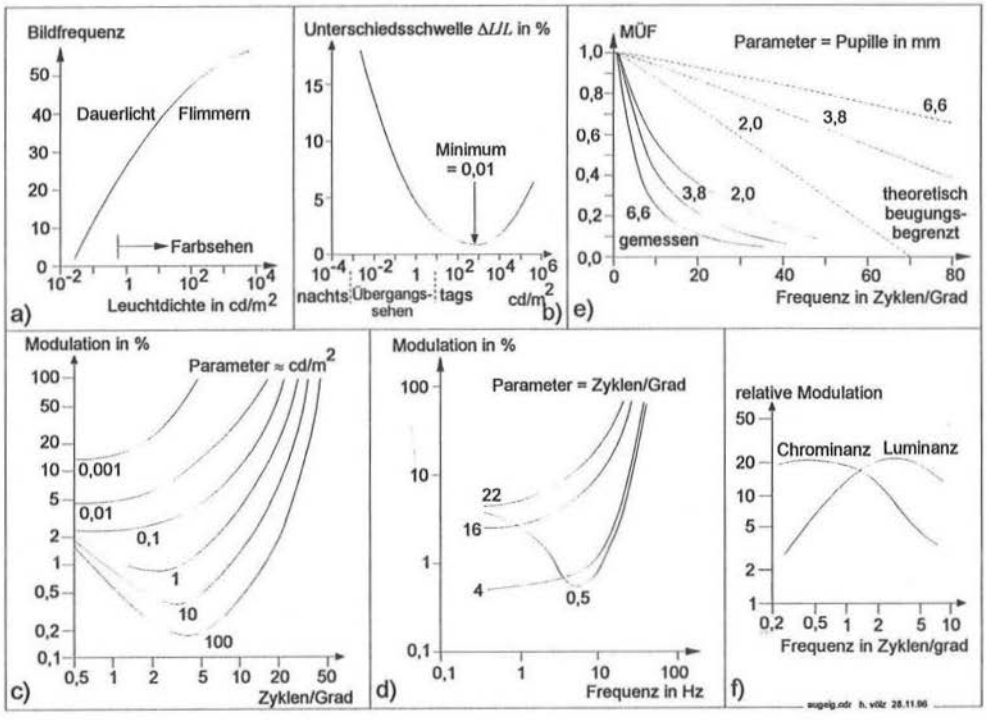


Bild 3.7 Schwellen- und Frequenzeigenschaften des Auges

Neben der zeitlichen Änderung von Helligkeit und Farbe hat auch eine lokale Änderung Bedeutung. Hier gilt jedoch die umgekehrte Fragestellung: Wie groß muß die relative Änderung $\Delta L/L$ sein, damit sie gerade erkennbar wird? Für zwei großflächige aneinander grenzende Helligkeiten gilt dann Bild 3.7b. Dabei gehen die örtliche Periodenlänge und die Modulationstiefe (-grad) ein. Sinnfälliger ist es jedoch, den Wert in Zyklen je Winkelgrad anzugeben (Bild 3.7c). Wenn sich Werte auch noch zusätzlich in der Zeit ändern, gilt Bild 3.7d. In der Informationstheorie ist die Modulations-Übertragungs-Frequenz (MÜF) üblich. Sie ist ein Maß dafür, um wieviel schwächer eine periodische Kontraständerung wahrgenommen wird. Hierbei läßt sich besonders gut der Einfluß der Pupillenweite berücksichtigen. So ergibt sich Bild 3.7e. Die gemessenen Kurven sind also deutlich schlechter als jene Werte, die sich aus der Beugung an der Pupille ergeben. Folglich sind die strahlenoptischen Abbildungseigenschaften der Linse nicht besonders gut. Bild 3.7f zeigt schließlich, daß die Auflösung für Helligkeitswerte (Luminanz) deutlich besser als die für Farbe (Chrominanz) ist. Hierauf wird im folgenden noch genauer eingegangen (s. S. 42).

3.3 Farben

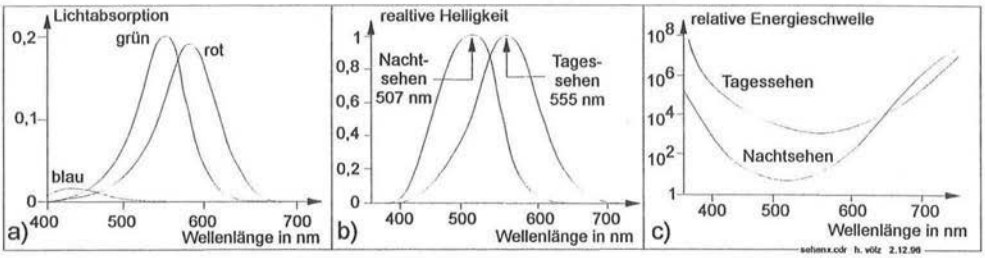
Für die Beschreibung unseres Farbsehens müssen drei Ebenen unterschieden werden:

1. Die *Physik* benutzt zur Beschreibung des Lichtes (klassisch) elektromagnetische Wellen und quantentheoretisch Photonen. Für unser Auge ist nur der Zusammenhang von Wellenlänge λ (Photonenenergie) und Leistung E (Photonen/s), also der *Verlauf* $E(\lambda)$ wichtig. Hieraus kann (s. S. 31f.) eindeutig der **Farbreiz** berechnet werden. Weitere physikalische Größen, wie z. B. die Polarisation des Lichtes, sind für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar.
2. Die *Wahrnehmung* der Strahlung wird *physiologisch* beschrieben. Die entsprechenden Verfahren und Methoden werden als Farbmetrik bezeichnet. Die Grundlage hierzu bilden u. a. die Absorptionskurven der Farbpigmente, die in den Stäbchen | Zäpfchen bewirkten Zellpotentiale oder die Frequenzen ihrer Aktionspotentiale. Die daraus abgeleitete numerische Bewertung der Strahlung führt zu den **Farbvalenzen**.
3. Der *Sinneseindruck* ist schließlich *psychologisch* bestimmt und führt u. a. zu Aussagen wie „Rot" oder „Blau". Sie betreffen also unsere **Farbempfindung** und sind genauso subjektiv wie Schmerz und Emotionen. Jeder Mensch hat daher seine eigene, persönliche Farbmetrik, in die u. a. auch seine Erfahrung und physiologische Fähigkeit zum Farbsehen eingehen.

Im allgemeinen kann von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes mit großer Sicherheit auf die Farbvalenz und von dort auf die Farbempfindung geschlossen werden. Der umgekehrte Weg von der Farbe auf die Farbvalenz und von einer Farbvalenz auf die spektrale Zusammensetzung des Lichtes ist dagegen praktisch unmöglich. Einmal führen nämlich viele spektrale Verteilungen zur gleichen Farbvalenz. Außerdem können verschiedene Farbvalenzen ununterscheidbare Farbempfindungen bewirken.

3.3.1 Wahrnehmung und Lichtwellenlänge

Die Absorptionskurven der drei Zäpfchenarten zeigt **Bild 3.8a**. Die üblichen Bezeichnungen „grün" und „rot" sind nur bedingt richtig. Das Absorptionsmaximum dieser Zäpfchen befindet sich nämlich im gelben Spektralbereich. Die in der Literatur genannten Zahlenwerte variieren für die Maxima leicht: für blau: 445, 440, 420; für grün: 535, 545 und für rot: 570, 580, 565 nm. Auffällig ist die relativ geringe Absorption der blauen Zäpfchen. Die Addition der drei Kurven führt zur *Helligkeitsempfindlichkeit* $V(\lambda)$ (Bild 3.8b; Tagessehen), welche die Reaktion des Auges auf Licht verschiedener Wellenlängen aber konstanter Intensität anzeigt. Besonders gut nehmen wir also gelb-grünes Licht wahr. Beim Nachtsehen (dunkel adaptiertes Auge) sind nur die Stäbchen wirksam. Dann gilt die zweite Empfindlichkeitskurve in Bild 3.8b. Der reziproke Verlauf beider führt schließlich zu den Schwellenkurven des Auges von Bild 3.8c.



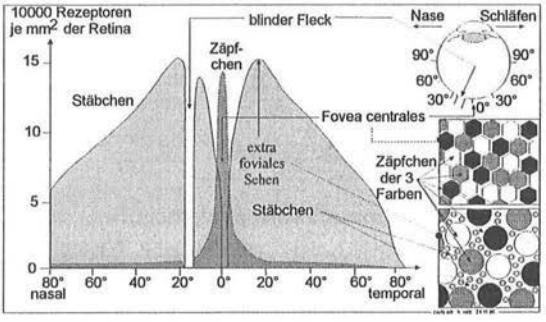


Bild 3.8 Wellenlängenkurven für das menschliche Auge (oben)

Bild 3.9 Verteilung von Zäpfchen und Stäbchen in der Retina (links)

Die Dichte der Stäbchen und Zäpfchen hängt erheblich vom Betrachtungswinkel ab (**Bild 3.9**). In der Fovia centrales fehlen neben den Stäbchen auch weitgehend die blauen Zäpfchen (gelber! Fleck). Deshalb gelten die obigen Kurven für ein Gesichtsfeld von 2° (≈114·Bildhöhe/Entfernung) und für Spektralintervalle von 5 nm. In der Normung wird noch ein zweiter Betrachtungswinkel von 10° benutzt (s. S. 38). Die Kurven sind weiterhin die Mittelwerte von vielen normal farbtüchtigen Versuchspersonen. In jeder Population gibt es immer einen Anteil nicht normal farbtüchtiger Personen. Für Europäer gilt die unten stehende Tabelle. 95 % aller Menschen sind also normal-sichtig. Nur für sie gilt die Theorie und Praxis der Farbmessung. Von der Farben-„blindheit" gibt es mehrere Varianten. Abweichungen vom typischen Wellenlängenmaximum kommen besonders häufig bei grün vor (4,9 % Männer; 0,4 % Frauen). Wenn nur zwei Zäpfchentypen vorhanden sind, fehlt ganz selten blau. Nur 0,003 % der Menschen sind echt farbenblind und sehen daher gar keine Farben.

3.3.2 Physiologische Farbmessung

Die typische Farbmessung beruht auf einem Vergleich (**Bild 3.10a**). Auf eine durch eine Trennwand halbierte Mattscheibe wird einmal (links) die zu untersuchende Testfarbe projiziert und rechts additiv je eine rote, grüne und blaue Meßlichtquelle. Sie sind z. B. durch Irisblenden einzeln in ihrer Helligkeit einstellbar. Oft werden dafür international genormte und möglichst gut monochromatische Primärfarben von 700 nm für Rot, 546 für Grün und 435 für Blau verwendet. Für spektral reine Testquellen ergeben sich die Einstellungen von Bild 3.10b. Um 500 nm sind für Rot „negative" Werte erforderlich. Sie werden bei der Messung dadurch verwirklicht, daß dieser Anteil auf der linken Seite zur Testfarbe hinzuaddiert wird. Je nach den verwendeten Meßlichtquellen und der Testfarbe können negative Werte für alle Farben auftreten. Deshalb sind im Bild 3.10a auch links drei Meßlichtquellen vorhanden. Die Kurven von Bild 3.10b können auch folgendermaßen interpretiert werden: Sie geben an, wieviel rotes, grünes und blaues Licht ein durchschnittlicher Beobachter braucht, um eine Spektralfarbe konstanter Luminanz wahrzunehmen.

Art der Fehlsichtigkeit	Betroffene Rezeptoren	männlich | weiblich ‰
Farbschwäche		
Protanomalie	rot	10 | 0
Deuteranomalie	grün	49 | 3,8
Tritanomalie	blau	<0,01 | <0,01
Farbblindheit		
Protanopie	rot	10 | 0,2
Deuteranopie	grün	11 | 0,1
Tritanopie	blau	0,02 | 0,01
Achromasie	keine Zäpfchen	0,03 | 0,02

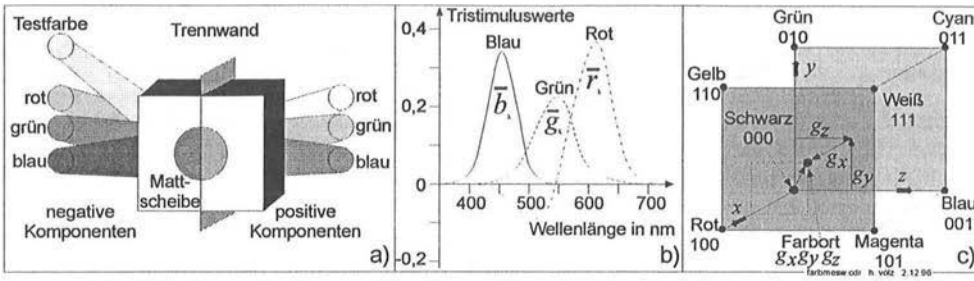


Bild 3.10 Übliche Methode der Farbmessung (a) und Definition eines Farbraums (c) über Bewertungen (b)

Das dargestellte Meßprinzip beruht auf einem Gesetz, das bereits 1853 H. Grassmann gefunden hat. Danach reichen drei ziemlich frei wählbare Primärfarben additiv dazu aus, um (fast) alle auftretenden Farben eindeutig zu bestimmen. Wegen der drei Farben wird auch von einer Tristimulus-Theorie gesprochen. Mit den Primärfarben x (Rot), y (Grün) und z (Blau) sowie zugehörigen Faktoren (Gewichten) g_x, g_y und g_z gilt daher für eine beliebige Farbvalenz:

$$f = g_x \cdot x + g_y \cdot y + g_z \cdot z$$

Dies läßt sich gut im dreidimensionalen Raum (RGB-Raum; Bild 3.10c) veranschaulichen. Jede Farbvalenz ist dann ein Farbort in diesem Raum. Bereits in den 20er Jahren übernahm die CIE (Commision Internationale de l'Éclairage) das Prinzip, wobei als Primärfarben reine Spektralfarben dienten. 1931 wurden für das CIE-RGB-Modell drei physikalisch nicht existierende, *virtuelle* Primärfarben eingeführt (s. u.). Anschaulicher ist es, von einer Lichtquelle mit beliebiger spektraler Energiedichte $S(\lambda)$ auszugehen. Dazu werden experimentell bestimmte *Normalspektralwertfuktionen*

$$\bar{x}(\lambda),\ \bar{y}(\lambda),\bar{z}(\lambda)$$

gemäß **Bild 3.11a** benutzt. Wenn zusätzlich $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ gilt (vgl. S. 28 Helligkeitsempfindlichkeit), gelingt es mit definierten Primärfarben, daß die obigen Werte stets positiv bleiben. Das Ergebnis der Bewertung führt dann zu den *Normalfarbenwerten X, Y, Z* gemäß

$$X = k \cdot \int S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad Y = k \cdot \int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad Z = k \cdot \int S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \,.$$

Bei Selbstleuchtern gilt $k = 580$ lm/Watt. Bei reflektierenden Objekten wird k so gewählt, daß helles Weiß $Y = 100$ ergibt. So wird für alle normalsichtigen Personen eine gute Übereinstimmung der subjektiven Bewertungen von Farbvalenzen erreicht. Gleiche Werte X, Y, Z garantieren dann also unabhängig vom spektralen Verlauf des Lichtsignals die sensorisch gleiche Farbe. Da eine dreidimensionale Darstellung „unhandlich" ist, wird weiter die Summe

$$A = X + Y + Z,$$

die der *absoluten* Helligkeit entspricht, eingeführt. Die Erfahrung zeigt nämlich, daß sie für die Farbvalenzen vernachlässigbar ist. Daher genügen die *Normfarbanteile*

$$x = X/A;\ \ y = Y/A \ \text{ und } \ z = Z/A,$$

deren Werte immer zwischen 0 und 1 liegen. Weil weiter ihre Summe immer 1 ist, reichen sogar zwei von ihnen zur Darstellung der Farbvalenzen aus. Ausgewählt wurden x und y, und es ergibt sich das Diagramm von Bild 3.11b. Die beiden virtuellen Primärfarben sind dabei der linke obere und rechte untere Eckpunkt (schwarze Quadrate) des rechtwinkligen gleichseitigen Dreiecks. Auf der gestrichelten Hypothenuse ist $z = 0$. Es nimmt in Richtung $x = 0$, $y = 0$ zu. Die Spektralfarben liegen auf der hufeisenförmigen Randkurve. Ihre Farbvalenzen heißen gesättigt. Die beiden unteren Endpunkte sind durch die Purpurgerade verbunden. Ihre Farbvalenzen sind nur durch Mischung von Rot und Blau zu erzeugen. Alle üblichen Farben befinden sich innerhalb der so geschlossenen Grenzkurven, dem

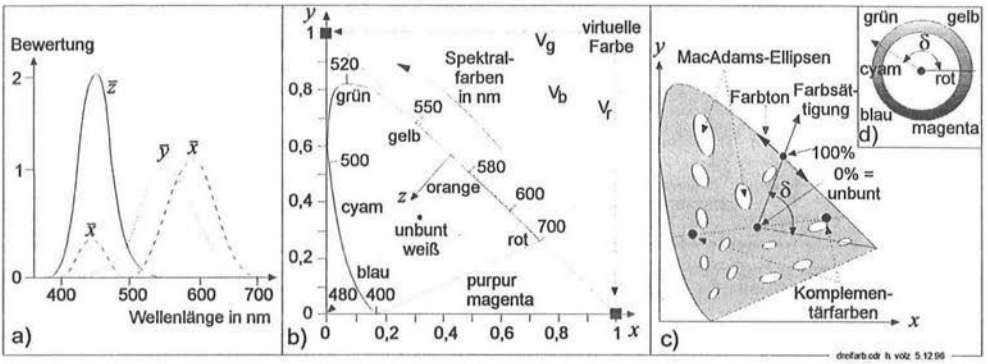


Bild 3.11 Das Farbdreieck und seine Zusammenhänge

„Farbdreieck". Sie lassen sich entsprechend der obigen Ableitung durch eine additive Mischung mindestens zweier Lichtquellen erzeugen. Dazu sind ihre Farborte durch eine Gerade zu verbinden. Die neue Farbvalenz liegt dann an einem Ort, der sich aus dem Verhältnis ihrer mit $V(\lambda)$ bewerteten Leistungen ergibt. Prinzipiell können auf diese Weise beliebig viele Lichtquellen miteinander zu einer Farbvalenz gemischt werden. Etwa im Zentrum der Fläche, genauer bei $x = y = z \approx 0{,}333$, befindet sich weißes Licht, dessen Farbe besser mit unbunt oder illuminant bezeichnet wird. Infolge der auf 1 normierten Intensität handelt es sich nämlich um ein neutrales Grau. Infolge der Additivität kann Unbunt stets aus zwei Farbvalenzen erzeugt werden, die mit ihm auf einer Geraden liegen. Sie müssen sich aber zusätzlich etwa gleichweit in entgegengesetzter Richtung vom Unbuntpunkt befinden. Diese beiden Farbvalenzen (Farben) heißen dann Komplementärfarben.

Von jedem Farbort auf dem Rand der Hufeisenkuve kann eine Linie zum Unbuntpunkt gezogen werden. Die Werte auf dieser Geraden entsprechen der Farbsättigung. Nahe Unbunt liegen pastellfarbene Farbvalenzen. Auf der Geraden sind subjektiv meist 20 verschiedene Sättigungswerte unterscheidbar. Lediglich in Richtung Grün und Gelb hin sind es knapp zehn. Auf der gesättigten Randkurve sind fast 150 gesättigte (Spektral-) Farben zu unterscheiden.

Für jede Farbvalenz kann untersucht werden, wie groß die Abweichung vom Ort sein darf, bevor sie wahrgenommen wird. So entstehen die MacAdam-Ellipsen. Einige, etwa linear 10fach vergrößerte Beispiele zeigt Bild 3.11c. Sie sind also in der Flächenausdehnung und in der Richtung ihrer Hauptachse recht unterschiedlich. Besonders groß sind die Ellipsen in der Nähe von Grün. Es wurde mehrfach versucht, den Farbraum so zu transformieren, daß alle Ellipsen gleich groß sind. Dabei geht aber die Additivität der Komponenten verloren. Recht einfach ist noch eine lineare Umrechnung nach CIE-USC (Uniform Chromaticity Scale). Dabei sinkt der Fehler von 1:20 auf 1:2. Noch bessere Werte können nur mit nichtlinearen Transformationen erreicht werden [MEY1, VÖL2].

Eine andersartige Abwandlung des Farbdreiecks ist das HSI-Modell. Es verwendet die drei Komponenten: Farbton (hue), Sättigung (saturation) und Helligkeit (intensity = Luminanz = Leuchtkraft). Auch hier kann zunächst von der Helligkeit abgesehen werden. Dann ist leicht ein Übergang vom Farbdreieck gemäß Bild 3.11d zu vollziehen. Der Vektor (Chrominanz, Chroma) beginnt im Unbuntpunkt und weist als „Radius" zum Rand des Einheitskreises. Seine Länge ist die Sättigung und seine Richtung der Farbton. Dabei ist Rot die „Richtfarbe" mit dem Winkel 0° bzw. 360°. Auch hierbei schrumpfen die großen MacAdam-Ellipsen besonders stark.

Wie sich die Vielzahl verschiedener physikalischer Spektren auf eine einzige Farbempfindung reduzieren kann, zeigt **Bild 3.12**. Die drei Spektren aus den Linien 1a +1b sowie den drei Linien 2a bis 2c und das kontinuierliche Spektrum 3 erzeugen den gleichen Farbton. Trotz solcher erheblicher

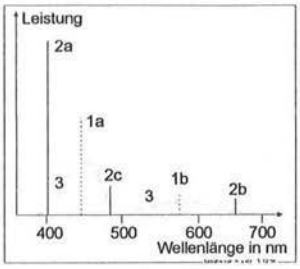


Bild 3.12 Drei Spektren mit etwa gleicher Farbempfindung

Reduzierungen bleibt die Anzahl der unterscheidbaren Farbvalenzen (Farben) sehr groß. Wir können immerhin knapp 150 *gesättigte* Farbvalenzen in jeweils im Mittel 10 Sättigungswerten und 600 Helligkeitsstufen mit einem Kontrast von nur 1:200 unterscheiden. Dabei liegen aber die einzelnen Helligkeitsstufen nicht äquidistant, sondern sind gemäß dem Weber-Fechnerschen Gesetz etwa logarithmisch mit $dy/y \approx 0{,}01$ bis 0,02 verteilt. Abgeschwächt ist unser Unterscheidungsvermögen zusätzlich bei sehr hellem und noch mehr bei dunklem Licht.

3.3.3 Lichtquellen und Farbtemperatur

Licht erreicht unser Auge von zwei Objektklassen mit deutlich verschiedenen Farbeigenschaften, den selbstleuchtenden und den beleuchteten. Relativ leicht verständlich sind die Farben der selbstleuchtenden Objekte, wie der Sonne oder der technischen Lichtquellen. Sie besitzen ein Strahlungsspektrum, dessen Grundlagen bisher betrachtet wurden. Zum anderen geht auch Licht von an sich „dunklen" Objekten (Tische, Pflanzen, Häuser, Papier usw.) dann aus, wenn sie beleuchtetet werden. Auf sie wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Die physikalische Grundlage vieler Selbstleuchter ist der thermische Strahler, im Idealfall ein sogenannter Schwarzer Körper. Für sein Spektrum, das ausschließlich durch seine Temperatur bestimmt ist, gilt das Plancksche Gesetz. **Bild 3.13a** zeigt im Vergleich mit der Augenempfindlichkeit drei Spektren für die Temperatur der Oberfläche der Sonne, für einen Strahler auf Zimmertemperatur und für die kosmische Reststrahlung (Rudiment des Urknalls). Jeder Körper strahlt also bei jeder Temperatur in gewissem Umfang. Sichtbares Licht entsteht aber erst ab einer gewissen Temperatur. Dieses Licht besitzt dann eine gewisse Färbung, die gemäß Bild 3.13d bei etwa 1000 K mit tiefem Rot beginnt, bei etwa 5000 K nahezu unbunt ist und darüber leicht bläulich wird. Das auf der Erde selbst bei klarem Himmel ankommende Sonnenlicht ist aber bereits erheblich verändert (Bild 3.13e).

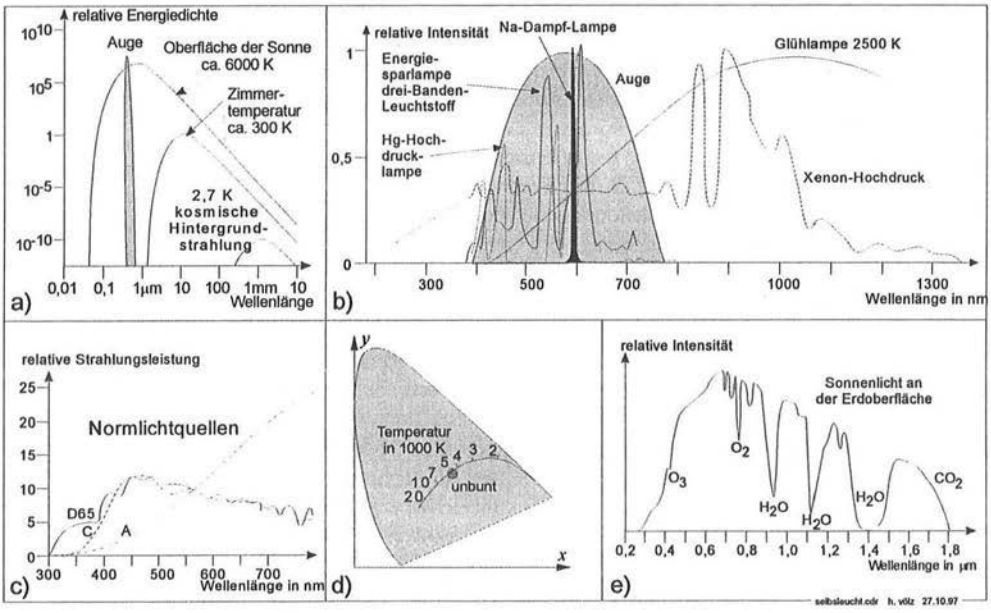


Bild 3.13 Vergleich verschiedener Strahlungsquellen und zugehörige Farbtemperatur

Die Gase in der Atmosphäre absorbieren bestimmte Anteile des Spektrums. Noch komplizierter ist das Spektrum gebräuchlicher Lichtquellen. Beispiele zeigt Bild 3.13b. Nur die üblichen Glühlampen haben einen Verlauf, der dem Planckschen Strahler gut ähnelt. Die meisten anderen Quellen haben ein komplex zusammengesetztes Spektrum. Es wird teilweise so gewählt (Drei-Banden-Spektrum), daß der subjektive Eindruck in etwa dem Tageslicht entspricht. Ein sehr schmalbandiges Spektrum haben Natrium-Dampflampen. Wegen der Vielfalt dieser Spektren wurden für die Farbmessung Normlichtquellen eingeführt. Beispiele zeigt Bild 3.13c. Für Normlicht A wurden übliche Glühlampen mit der Farbtemperatur 2856 K gewählt. Dem Tageslicht ähneln die Dxx-Quellen, wobei xx die Farbtemperaturen in je 100 K angibt, also bedeutet D65 6500 K. Da entsprechende Temperaturstrahler jedoch wenig UV (ultraviolett) enthalten, wird oft gefiltertes Xenonlampenlicht verwendet. Weitere Lichtarten nach DIN 5033 betreffen B für Sonnenlicht, G für Glühlampenlicht und P für Petroleum- und Kerzenlicht.

So wie verschiedene Lichtquellen in der Farbe abweichen, ist auch unser Tageslicht Schwankungen unterworfen. Es ist bei Sonnenauf-/ bzw. -untergang deutlich rot gefärbt. Dieser Einfluß wird insbesondere bei der Photographie (störend) deutlich. Die verschiedenen Lichteigenschaften lassen sich genauer über die Farbtemperatur bestimmen. Dabei wird die Energie des Spektrums bei 555 nm auf 1 normiert. So ergeben sich die Kurven von **Bild 3.14** oben. Eine Skala für auftretende Farbtemperaturen zeigt der untere Bildteil.

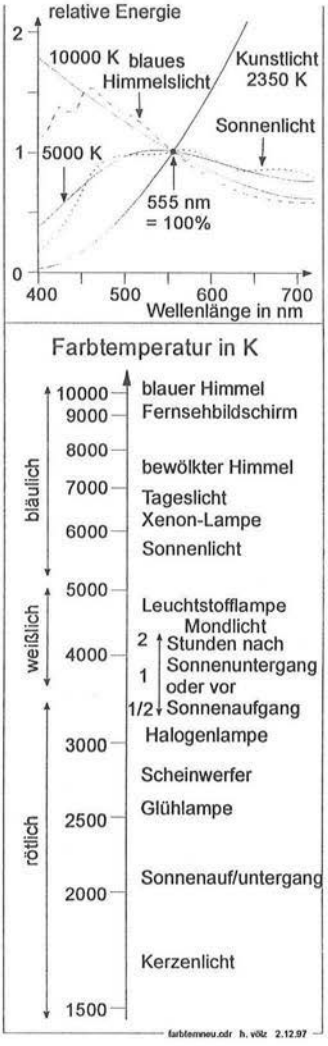


Bild 3.14 Zur Definition der Farbtemperatur und typische Werte

3.3.4 Körperfarben

Die Erfahrung vermittelt uns den (trügerischen) Eindruck, daß Objekte eine Farbe besitzen. Eine Zitrone besitzt ein genau definiertes Gelb, eine Tomate ein Rot, das anders als das Rot der Möhre ist usw. Dies gilt sogar, wenn sich das bestrahlende Licht erheblich ändert. In der Psychologie wird von der *Konstanz unserer Farbempfindungen* gesprochen, die offensichtlich auf recht hoher Nervenebene vollzogen wird. In der Technik müssen wir statt dessen einen zusätzlichen (automatischen) Weißabgleich vornehmen. Nur bei extremer Beleuchtung wird eine Abweichung deutlich bemerkt. Bei der Beleuchtung mit Natriumdampflampen – sie besitzt fast nur Licht um 600 nm – sind eigentliche Farben kaum vorhanden. Leuchtendes Rot erscheint dann z. B. oft nur als dunkles Braun. Mit einigen Leuchtstoffröhren kann es sogar geschehen, daß ein bei Tageslicht rotes Material dunkelgrün erscheint. Genau genommen gibt es also keine Körperfarben. Bei beleuchteten Körpern sind für ihr farbliches Aussehen eigentlich immer drei Eigenschaften wesentlich:

1. Das eingestrahlte Licht wird bei der Absorption und | oder Reflexion wellenlängenabhängig verändert. Das Objekt besitzt also eine meßbare Absorptionskurve, die mit dem Spektrum der Lichtquelle „multipliziert" einen neuen Spektralverlauf ergibt. Für die subjektive Farbwahrnehmung ist er noch mit den *Normalspektralwertfuktionen* $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$,$\bar{z}(\lambda)$ zu bewerten.
2. Das reflektierte bzw. durchgelassene Licht hat eine Richtungscharakteristik, die Farben weiter modifiziert und z. B. für metallischen Glanz oder changierenden Stoff typisch ist.

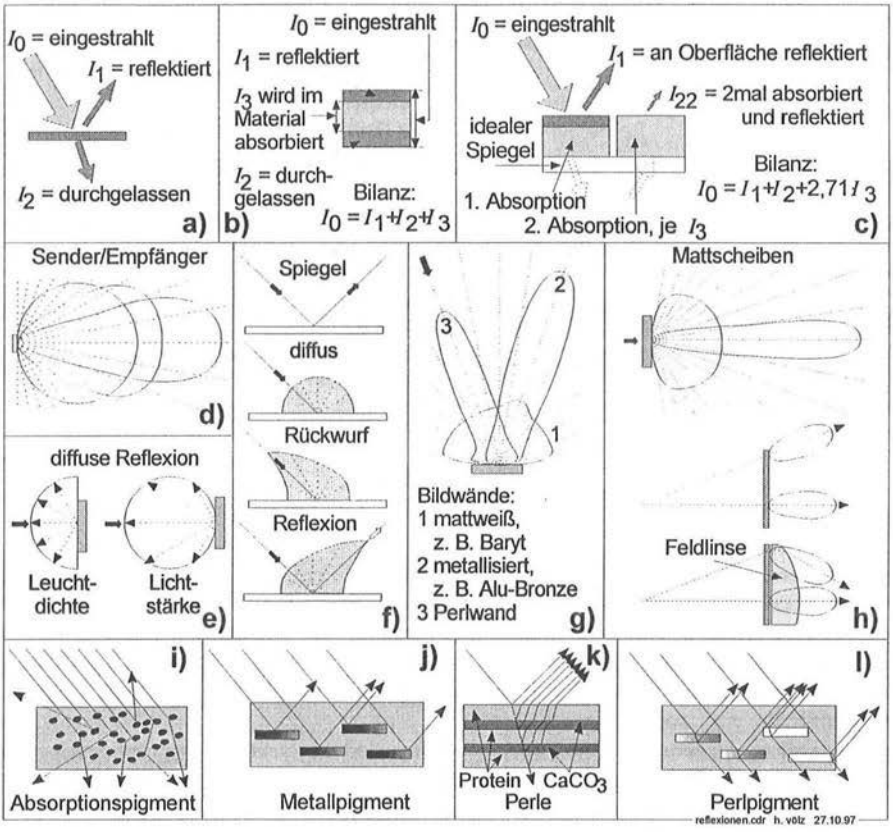


Bild 3.15 Eigenschaften von Stoffen bezüglich Reflexion und Absorption

3. Eingestrahlte Energie, die auch von einem Elektronenstrahl oder von UV-Licht herrühren kann, wird absorbiert und in sichtbare Strahlung umgesetzt. Das tritt z. B. bei den Leuchtstoffen der Bildröhren und Leuchtstofflampen auf.

Die wichtigsten Möglichkeiten des zweiten Punktes sind im **Bild 3.15** zusammengefaßt. Teilbild a zeigt die einfachste Annahme, wie nämlich einfallendes Licht teilweise das Objekt durchdringt und teilweise passiert. Teilbild b schlüsselt dazu die Energiekomponenten auf. Der Teil I_3 wird im Material absorbiert. In einigen Fällen befindet sich an der Rückseite des Objektes ein Spiegel (Bild 3.15c). Dann wird der durchgelassene Lichtanteil reflektiert und addiert sich nach nochmaliger Abschwächung zum direkten Reflexionsanteil. Dieser Effekt ist oft mehr oder weniger ausgeprägt vorhanden. Es wird nämlich – z. B. an der rückwärtigen Seite einer Glasscheibe – ebenfalls etwas Licht durchgelassen und reflektiert.

Alle bisher geschilderten Effekte sind für jede Lichtwellenlänge und jede Richtung etwas anders. Am übersichtlichsten sind die Winkeleinflüsse bei einem Sender. Infolge des Reziprozitätstheorems gelten sie genauso bei einem Empfänger (Bild 3.15d). In ähnlicher Weise werden die Verhältnisse auch für die Lichtreflexion wirksam. Dabei ist aber zu unterscheiden, ob man die Leuchtdichte oder Lichtstärke betrachtet. Die typische Lambert-Streuung zeigt Bild 3.15e. Die Leuchtdichte bleibt dabei deshalb für alle Richtungen konstant, weil die wirksame (scheinbare) Fläche mit dem Winkel abnimmt.

Wichtige nicht-Lambertsche Rückstrahlungen faßt beispielhaft Bild 3.15f zusammen. Bild 3.15g zeigt typische Eigenschaften von Projektionswänden.

In ähnlicher Weise zeigen sich Richtwirkungen auch für hindurchgehendes Licht. Praktisch bedeutsam sind „Mattscheiben" und ähnliches für die Durchlicht- bzw. Rückprojektion. Hier ist eine zusätzliche Randstreuung zum Beobachter hin erwünscht (Bild 3.15h). Dazu dient eine „Feldlinse".

Bei speziellen Materialien – z. B. Druck- oder Farbpigmenten – treten noch zusätzliche Effekte auf. Bild 3.15i zeigt, wie ein typisches Absorptionspigment sowohl für die Rückstreuung als auch für das Passieren das Licht auf unterschiedliche Weise in mehrere Winkelbereiche streut. Verwendet man dagegen relativ gut spiegelnde Pigmente (Bild 3.15j), so wird neben der Absorption bestimmter Wellenlängen (Farbe) das Licht ziemlich exakt gespiegelt. Es entsteht die Wahrnehmung eines metallischen Effekts. Perlpigmente reflektieren und absorbieren gleichzeitig und sind zugleich in mehreren Schichten angeordnet (Bild 3.15l). Sie bilden auf diese Weise die typische Schichtenstruktur natürlicher Perlen nach. In ihnen ist schichtenweise Protein und $CaCO_3$ übereinander gestapelt (Bild 3.15k).

Für das primär reflektierte Licht hat die Schichtdicke so gut wie keinen Einfluß. Nur bis zu einer relativ geringen Dicke wirkt ein aufgetragener Farbstoff intensiver und erreicht dann einen Grenzwert. Die Reflexion erfolgt im wesentlichen an der Oberfläche. Für das durchgelassene Licht geht dagegen die Schichtdicke d exponentiell mit einer Absorptionskonstanten f ein

$$I_2 = (I_0 - I_1) \cdot e^{-f \cdot d}.$$

Dieser Einfluß ermöglicht im Durchlicht, also für DIAs und Filme, einen deutlich höheren Kontrast als bei der Reflexion, z. B. bei Papierbildern. Bei dünnen Farbschichten mit darunter befindlicher spiegelnder Fläche kann das eingestrahlte Licht den Farbstoff vor- und rückwärts durchdringen. Dabei wird das Licht zweimal spezifisch absorbiert. So erklärt sich der Faktor in Bild 3.15c. Weiter wird so bei dünnen Farbaufträgen verständlich, daß in das Aussehen deutlich die Eigenschaften der Unterlage eingehen.

Für das farbliche Aussehen von Stoffen und Objekten sind die spektralen Absorptionseigenschaften natürlich noch wichtiger als die Winkel- und Reflexionseffekte. **Bild 3.16a** zeigt Absorptionskurven einiger biologischer Substanzen wie Chlorophyll-Arten und Carotin. Bild 3.16b ergänzt das durch Reflexionskurven einiger Früchte und Beispiele der drei wichtigen Druckfarben. Bei Gelb und Magenta ist der für gute Druckfarben typische steile Übergang bei etwa 500 und 600 nm zu erkennen. Bild 3.16c zeigt weiter einige „Reflexions"-kurven, die dem obigen dritten Punkt entsprechen. Optisch aufgehelltes Papier absorbiert unsichtbares, immer etwas vorhandenes UV-Licht und hebt dadurch Elektronen im „Farbstoff" auf höhere Bahnen. Wenn sie zurückfallen, bewirken sie eine zusätzliche blaue Strahlung bei etwa 450 nm. Da hier mehr Licht „reflektiert" als eingestrahlt wird, erscheint das Papier „überweiß". Noch ausgeprägter ist dieser Effekt bei den Signierstiften. Die stark leuchtenden Farben entstehen hier durch Absorption von vorwiegend blauem Licht, das anschließend zusätzlich in der Farbe des Signierstiftes abgestrahlt wird. Daher sind diese „Farben" nicht innerhalb des Farbdreiecks darstellbar.

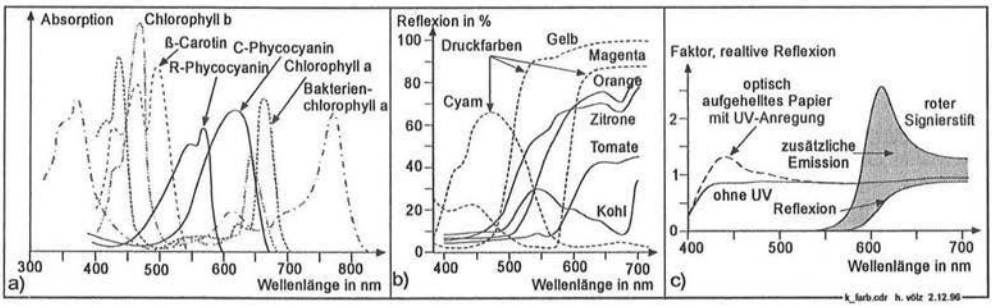


Bild 3.16 Absorptions- und Reflexionskurven für einige Substanzen

3.3.5 Additive und subtraktive Farben

Aus den bisherigen Betrachtungen lassen sich zwei Fälle der Mischung von Farben ableiten. Bei der *additiven Farbmischung* wirken mehrere Lichtquellen verschiedener Farbe zusammen. Standardgemäß wird dabei von den Prozeßfarben Rot, Grün und Blau ausgegangen. Gemäß **Bild 3.17** (links) werden sie, sich teilweise überlappend, auf eine weiße Fläche projiziert. Bei der 1:1-Mischung ergeben sich die Farben Cyan, Gelb und Magenta (≈ Purpur ≈ Violett). Treffen alle drei Farben zusammen, so entsteht Weiß. Günstig zur Beschreibung ist wieder das RGB-Modell von Bild 3.10c. Praktisch angewandt wird dieses Prinzip u.a. bei Farbfernsehern bzw. Farbmonitoren. Die drei Lichtquellen sind dabei die von den drei Elektronenstrahlen getroffenen Leuchtstoffe. Die Orte der zugehörigen Leuchtphosphore sind genormt und zwar unterschiedlich für Europa durch die EBU (European Broadcasting Union) und für die USA durch das FCC (Ferderal Communications Commission). Die links stehende Tabelle benennt die Orte im Farbdreieck. Als Vergleich sind die, mit den Normlichtquellen D65 und C empfohlenen, Unbunt-Werte eingetragen. Diese Betrachtung macht sofort klar, daß mit der additiven Mischung nur Farbvalenzen zu erzeugen sind, die innerhalb des durch die drei Phosphore festgelegten Dreiecks liegen (**Bild 3.18**). Deutlich besser wäre es also, mit spektral reinen (gesättigten) Prozeßfarben zu arbeiten. Sie werden jedoch erst bei Laserquellen möglich. Aber auch dann ist mit drei Quellen nicht das ganze Farbdreieck zu erreichen.

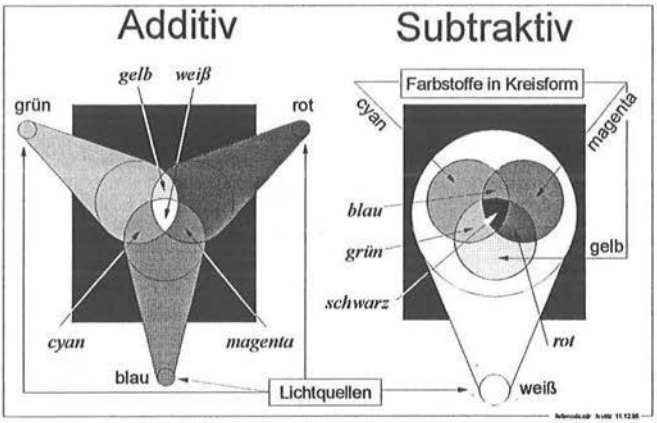


Bild 3.17 Vergleich von additiver und subtraktiver Farbmischung

EBU | FCC	*x*	*y*	*z*
R	0,64 | 0,67	0,33 | 0,33	0,03 | 0,00
G	0,29 | 0,21	0,60 | 0,71	0,11 | 0,08
B	0,15 | 0,14	0,06 | 0,08	0,79 | 0,78
D65 | C	0,313 | 0,310	0,329 | 0,316	0,358 | 0,374

Völlig andere Verhältnisse treten dann auf, wenn Objekte, Bilder, DIAs usw., mit einer (weißen) Lichtquelle betrachtet werden. Die aufgetragenen Farbstoffe überlagern sich dabei z. T., und jeder Farbstoff entfernt (subtrahiert) Licht entsprechend seiner spektralen Absorptions- bzw. Reflexionskurve. Es liegt also die *subtraktive Farbmischung* nach Bild 3.17 (rechts) vor. Die üblichen Prozeßfarben dafür sind Cyan, Gelb und Magenta. Werden je zwei von ihnen übereinander angeordnet, so ergeben sich die Mischfarben Rot, Grün und Blau. Wer Farben zum Malen mischt, der kennt diesen Effekt. Sind alle drei Farbstoffe übereinander gedruckt, so sollte (theoretisch) alles Licht absorbiert werden und Schwarz entstehen. Infolge der auf S. 35 besprochenen Tiefenwirkung der Absorption entsteht jedoch beim Auflicht (nicht beim Durchlicht) bestenfalls ein dunkles Grau. Deshalb wird meist beim Farbdruck die Farbe Schwarz zusätzlich verwendet. Die Übertragung der subtraktiven Mischung auf das Farbdreieck führt zu sechs Eckpunkten, die sowohl durch die Prozeßfarben Cyan, Magenta und Gelb als auch durch deren Mischungen Rot, Grün und Blau gegeben sind. Je nach der Qualität der Farbstoffe und den Technologien entstehen so Farbflächen, wie sie ebenfalls Bild 3.18 zeigt. Jedes Verfahren gestattet also nur, einen Teil aller sichtbaren Farben zu erzeugen. Er wird als

Farbskala bzw. Farbumfang bezeichnet. Spezielle Farbeffekte – auf sie wurde bereits im Zusammenhang mit Bild 3.15 hingewiesen – verlangen darüber hinaus Sonderlösungen. Es seien hier nur golden, kupfern, metallic, perlenglanz sowie Texturen wie changierender Samt oder dünne Anlauffarben (Öl auf Wasser) genannt.

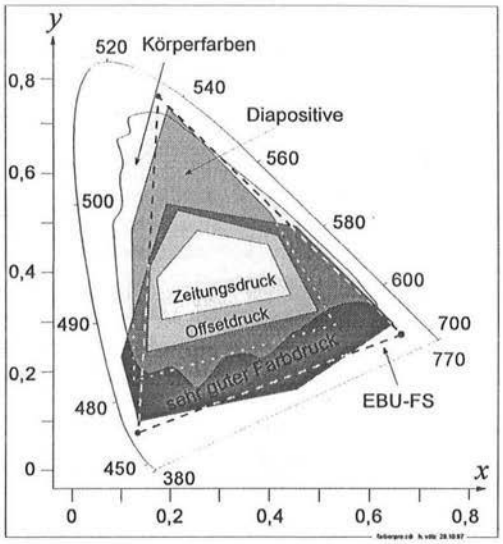


Bild 3.18 Arbeitsflächen einiger Farbverfahren

3.3.6 Farbräume

Die bisherigen Farbbetrachtungen benutzen drei Modelle: das RGB-System nach Bild 3.10c, das CIE-Farbdreieck von 1931 gemäß Bild 3.11c und 3.13d, sowie die Kreisform (YIQ s. u.) nach Bild 3.3f und 3.11d. Außerdem wurden bereits einige Varianten des Farbdreiecks im Zusammenhang mit Bild 3.11c bezüglich der MacAdams-Ellipsen betrachtet. Eine weitere wichtige Änderung geht auf die Verteilung der Zäpfchen und Stäbchen gemäß Bild 3.9 zurück. Die bisher dargestellte Form – sie ist u. a. fest in DTP Postscript Level 2 implementiert – beruht auf einen Betrachtungswinkel von 2° und berücksichtigt daher nur einen sehr kleinen Sichtbereich. Deshalb wurden von der CIE 1976 die Modelle CIELAB und CIELUV für einen Winkel von 10° definiert. Sie führen zu einem etwas abweichenden Farbdreieck, das schematisch **Bild 3.19**b zeigt. Statt der x- und y-Achsen verwendet es u'- und v'-Achsen, zu denen dann neue Normalspektralwertfunktionen (Bild 3.19a) gehören. Es konnte sich bisher kaum behaupten.

Beim Vergleich von additiver und subtraktiver Farbmischung fällt auf, daß jeweils die „Mischfarben" des einen Verfahrens die Prozeßfarben des anderen Systems sind. Gleichzeitig sind die Prozeßfarben beider Systeme zueinander Komplementärfarben. Daher gilt für beide die Betrachtung im Bild 3.10c. Beim additiven System ist der Ursprung Schwarz (000); beim subtraktiven Weiß (111). Damit kann die Umrechnung zwischen den Systemen durch Matrizengleichungen erfolgen:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Bei der subtraktiven Mischung ist es (s. o.) vielfach notwendig, als vierte Farbe Schwarz hinzuzunehmen. Folglich wird dann vom Vierfarbenmodell bzw. von CMYK (k von black = schwarz, y von yellow = gelb) gesprochen. Im deutschen Sprachraum wird zuweilen auch CMGS bzw. CMG verwendet.

Mit der zunehmenden Anwendung von Farben ist im Laufe der Zeit eine so große Vielfalt von

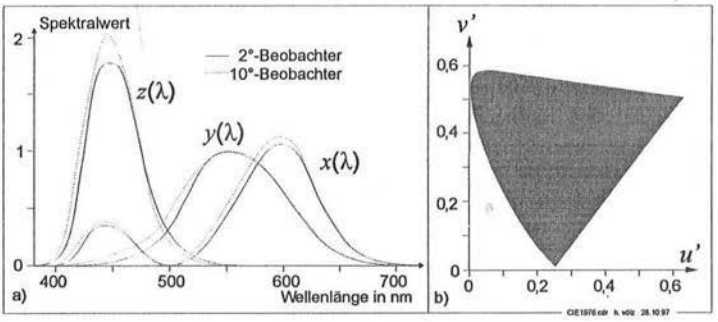


Bild 3.19 Übergang zum 10°-System des CIE-Dreiecks

Physikalisch	Wahrnehmungs-bezogen	Uniform/ Druckbezogen
RGB CYMK EBU: YUV NTSC: YIQ	HSI Gegenfarben	CIELAB CIELUV
Farbdreieck	Farbkreis	Pantone Schmuckfarben
$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}299 & 0{,}587 & 0{,}114 \\ -0{,}418 & -0{,}289 & 0{,}437 \\ 0{,}615 & -0{,}515 & -0{,}100 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}299 & 0{,}587 & 0{,}114 \\ 0{,}596 & -0{,}274 & -0{,}322 \\ 0{,}211 & -0{,}523 & 0{,}312 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$ $I = -U \cdot \sin(33°) + V \cdot \cos(33°)$ $Q = U \cdot \cos(33°) + V \cdot \sin(33°)$	$H = \begin{bmatrix} \delta \\ 360° - \delta \end{bmatrix}$ falls $\begin{bmatrix} B \le G \\ B > G \end{bmatrix}$ $\delta = \arccos\left(\frac{1/2 \cdot [(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B) \cdot (G-B)}} \right)$	für CIELAB gilt $\alpha = 0{,}008856$, $\beta = 7{,}787$, $\gamma = 0{,}138$ X_n; Y_n; Z_n ist der Unbuntpunkt $X^* = \begin{bmatrix} \sqrt[3]{X/X_n} \\ \beta \cdot X/X_n + \gamma \end{bmatrix}$ falls $X/X_n \begin{bmatrix} > \\ \le \end{bmatrix} \alpha$ dito für Y und Z $L^* = 116 \cdot Y^* - 16$; $a^* = 500 \cdot (X^* - Y^*)$; $b^* = 200 \cdot (Y^* - Z^*)$ farbmod.cdr h. völz 17.8.97

Systemen entstanden, daß ein Überblick recht schwierig ist. Generell sind jedoch drei Typen zu unterscheiden (vgl. oben):

1. *Physikalische* Systeme, die vor allem beim Fernsehen und bei der Darstellung auf Monitoren genutzt werden. Sie sind also besonders für elektronische Signale geeignet.
2. *Wahrnehmungsbezogene* Systeme, die sich bemühen, den subjektiven Empfindungen möglichst nahe zu kommen. Sie benutzen z. B. Farbsättigung und Farbton.
3. *Uniforme, druckbezogene* Systeme, die es ermöglichen, immer die gleichen festgelegten Farben zu erzeugen. Sie verwenden bevorzugt feststehende Tabellenwerte.

Bisher wurden eigentlich nur physikalische Modelle behandelt. Für die Farbmischungen sind jedoch die rechtwinkligen Koordinaten des RGB- bzw. CMYK-Modells wenig geeignet. Beim Farbdreieck fehlt weiter ein leichter Übergang zu Signalen. Noch wichtiger für die Praxis sind einfache Transformationen, die den technischen Speicheraufwand verringern lassen. So hat unser Auge für Helligkeitsänderungen eine weitaus höhere Auflösung als für die reinen Farbanteile. Daher wird aus den drei RGB-Signalen einmal das Helligkeitssignal (Luminanz) $Y \approx (R+G+B)/3$ gebildet. Hinzu kommen zwei Farbdifferenzsignale (etwa Y-B und Y-B). Sie sind die Chrominanz, auch kurz nur Chroma genannt. Die genormten Formeln stehen oben. Praktisch ohne erkennbaren Verlust genügt es dann, die Differenzsignale mit halber Bandbreite zu übertragen. Dies wird u. a beim PAL-Farbfernsehen und bei der JPEG-Komprimierung angewendet.

Eine genauere Analyse des Modells führt wieder zum Farbkreis von Bild 3.3f und 3.11d. Unter Berücksichtigung der Helligkeit ergeben sich dann Zylinderkoordinaten. Das zugehörige Modell heißt HSB (**Bild 3.20**b) gemäß hue (Farbton), saturation (Sättigung) und brightness (Helligkeit). Der Richtungsvektor (Chrominanz) beginnt am Unbuntpunkt (Kreismitte). Seinem Winkel δ zugeordnet ist: 0^o = rot = „Richtfarbe"; 60^o = gelb; 120^o = grün; 180^o = cyam; 240^o = blau; 300^o = magenta. Der Winkel kann auch als Farbton $F = H$ bezeichnet werden. Die Länge des Richtungsvektors entspricht der Farbsättigung S. Die zugehörige Formel steht in der obigen Tabelle. Ergänzend muß hinzugefügt werden:

$$S = 1 - 3 \cdot \frac{\min(R,G,B)}{R+G+B} \qquad I = \frac{R+G+B}{3}$$

Andere Bezeichnungen für dieses Modell sind HSV bzw. HSI von value bzw. intensity (Helligkeit). Da es hier z. T. an Normung mangelt, gibt es in der Literatur verschiedene geometrische Darstellun-

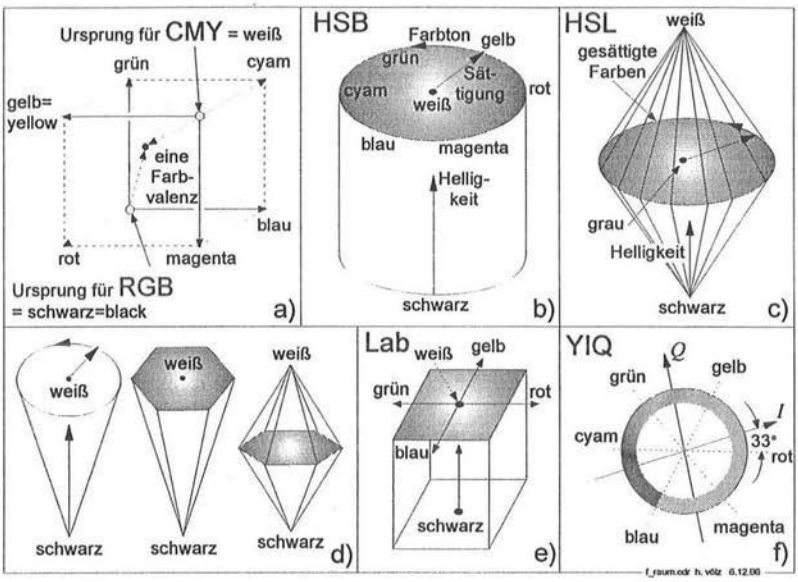


Bild 3.20 Raumdarstellungen einiger Farbmodelle

gen und damit Berechnungsmethoden. Einige typische Beispiele zeigt Bild 3.20d. In einem Fall ist Schwarz als Kegelspitze gewählt. Andere Varianten ersetzen den Kreiszylinder bzw. -kegel durch sechseckige Polyeder mit den Ecken rot, gelb, grün, cyam, blau und magenta. Durch sie wird eine bessere Übereinstimmung mit der im Farbdreieck erreichbaren Fläche erreicht (vgl. Bild 3.18). Eine weitere Abwandlung ist das HSL- bzw. HLS-Modell von Bild 3.20c (hue, lightness, saturation). Bei diesem Doppelkegel (bzw. sechseckigem Polyeder in Bild 3.20d) werden weiß und schwarz als Punkte an beiden Spitzen betrachtet. Dadurch besitzen die maximal gesättigten Farben den Helligkeitswert 0,5 (statt sonst 1).

Das 1976 von der CIE entwickelte L*a*b-Modell (CIE LAB) ist geometrisch zwischen den kartesischen und zylindrischen Modellen angesiedelt (Bild 3.2.e). Zuweilen wird es auch zylinderförmig dargestellt. Statt der sonst üblichen drei Farbkanäle (vgl. Bild 3.19b) verwendet es je nach der geforderten Qualität 10 bis 512 Farbkanäle. Aus den so mit speziellen Spektralphotometern ermittelten Ergebnissen werden dann die drei Werte L, a, b berechnet. Sie werden als Luminanz (Helligkeit) mit $0 \leq L \leq 100$ und den Balancen a zwischen Rot und Grün und b zwischen Blau bis Gelb, mit jeweils $-120 \leq a, b \leq +120$, erfaßt. Nehmen beide Balance-Werte Null an, so liegt der Unbuntpunkt vor. Durch diese komplexe Methode ist die Gleichabständigkeit der Farben gesichert (vgl. S. 32). Es sind folglich gute Aussagen zur Ähnlichkeit von Farben möglich. Als Ähnlichkeitsmaß (Gütemaß) ist ΔE eingeführt. Beträgt sein Wert 10, so fällt die Abweichung auch einem Laien sofort auf. Bei einem Wert um 1 bemerkt dagegen nur der Fachmann etwas. U. a. wird dieses System bei PostScript Level 2 und intern beim Programm Photoshop verwendet.

Weitere Farbmodelle entstanden mit dem Farb-Fernsehen. Dabei war Abwärtskompatibilität gefordert. Die Farbsendungen mußten auf den alten Schwarzweiß-Fernsehern zumindest ein brauchbares Grauton-Bild erzeugen. Dazu wird ein Helligkeitssignal = Luminanz Y (nicht verwechseln mit yellow) gewählt, das annähernd der Helligkeitsempfindlichkeit $V(\lambda)$ folgt (vgl. S. 30). Zur Einsparung von Übertragungsbandbreite wurde außerdem die Eigenschaft unseres Auges genutzt, Farben weniger gut als Helligkeiten aufzulösen. Die beiden Farbdifferenz- bzw. Chrominanzsignale (Chroma) C_b und C_r brauchen daher nur mit der halben Bandbreite (Auflösung) übertragen zu werden. Das digitale Fernsehen legt (CCIR 601) für das entsprechende YCC-Signal die Umrechnung fest:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_r \\ C_b \end{bmatrix} = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 77 & 150 & 29 \\ 151 & -110 & -21 \\ 44 & -87 & 131 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Bei der analogen Übertragung gilt für das zugehörige YUV-Signal die folgende Umrechnung:

$$Y = 0{,}299 \cdot R + 0{,}587 \cdot G + 0{,}114 \cdot B,$$
$$U = 0{,}493 \cdot (B - Y),$$
$$V = 0{,}877 \cdot (R - Y).$$

Sie läßt besonders klar die Bildung des Helligkeitssignals Y erkennen. Die Rückrechnung lautet:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1{,}140 \\ 1 & -0{,}394 & -0{,}581 \\ 1 & 2{,}028 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix}.$$

Ähnlich wie bei HSB und HSL werden auch beim Fernsehen (z. B. bei PAL) die Komponenten U und V bzw. C_b und C_r zu einem Vektor mit Länge und Richtung zusammengefaßt. Dann wird vom Y/C-Signal gesprochen (Helligkeit und Color). Der Richtungsbezug ist Rot gleich 0°. Für die Länge und Richtung des Vektors gelten dann

$$|C| = \sqrt{U^2 + V^2} \text{ und } \varphi = \arctan\left(\frac{V}{U}\right).$$

Die Farbsättigung berechnet sich daraus zu $S = 0{,}7 \cdot |C|/Y$.

Das amerikanische NTSC-Farbfernsehen geht noch einen Schritt weiter. Es dreht den Richtungsbezug um 33° von Rot weg. Statt R-Y und B-Y entstehen so die Koordinatenachsen I (in-phase) und Q (quadrature; vgl. Bild 3.20f). Es wird daher auch vom YIQ-Modell gesprochen. Wird Y mit 4 MHz übertragen, so genügen für I etwa 1,5 MHz (0,375). Q weist in die Richtung grün/gelb. Dort sind die MacAdams-Ellipsen (Bild 3.11c) besonders groß. So genügen hier sogar 0,6 MHz (0,15). Für die Umrechnung gilt die Umrechnung gemäß der Tabelle auf S. 39.

Es folgt eine kurze Zusammenstellung:

CIE-Farbsystem (Commission International de l'Eclairage) 1931, implementiert in DTP Postscript Level 2

CIELAB; CIELUV 1976 von der CIE festgelegt, 2° und 10°; CIELAB: L=Helligkeit; stimmt mit Munsell-Farbordnungssystem überein, für nicht selbst leuchtende Objekte; CIELUV: ermöglicht bessere Mischungsberechnungen: Geraden bleiben Geraden

CMY; CMYK; CMG: cyam, magenta, yellow =gelb + black; subtraktiv für Druck

DIN-Farbkarte etwa 1950 (Deutsche Industrie Norm)

HSB; HSI: Hue (Farbton), Saturation (Sättigung), Brightness (Helligkeit), I = intensity ;Farbtüte; Rot = 0° bzw. 360°

NTSC: National Television System Committee, 33° gedreht, berücksichtigt Geschwindigkeit der Farbänderung

PAL: phase altenation line

RGB: Rot, Grün Blau, an Auge angelehnt, additiv drei monochromatische Komponenten.

SECAM: Séquentiel couleur à Mémoire, Fernsehsystem, Farben wie bei PAL, aber andere Übertragungstechnik

YCC: Helligkeit und Farbdifferenzen, Anwendungen: Fernsehen, Photo-CD und JPEG

YIQ: I = in-phase; Q=quadrature, Anwendung NTSC-Fernsehen

YUV: Farbfernsehen PAL; $U \approx$ Rot-Blau; $V \approx$ Grün-Magenta

3.3.7 Unterscheidbare Farben

Wie viele Farben der Mensch unterscheidet, kann mittels mehrerer Methoden abgeschätzt werden. Die Werte sind dabei um Größenordnungen verschieden. Aus dem RGB-Modell folgen bei 24 Bit Tiefe $2^{24} = 16\,772\,216$ Farbvalenzen. Beim Lab-Modell sind es nur noch $200 \times 200 \times 128 = 5\,120\,000$. Beide Modelle sind aber bewußt so angelegt, daß sie technisch mehr Farben ermöglichen als wir unterscheiden können. Wie bereits auf S. 32f gezeigt wurde, können wir etwa unterscheiden:

600 Helligkeiten, bei einem maximalen Kontrast von 1:200,
150 gesättigte Farbvalenzen und
20 Sättigungswerte, jedoch nur 10 in Richtung grün.

Im dazu passenden HSL-Modell (Bild 3.20c) bedeutet dies eine dreidimensionale Erweiterungen der MacAdam-Ellipsen zu Ellipsoiden, die möglichst dicht in den Kegel gepackt werden. Zur Vereinfachung werden sie durch Farbkugeln ersetzt, deren Radius abzuschätzen ist. Der größtmögliche Kegelradius sei r. Auf dem Umfang ($2 \cdot \pi \cdot r$) sind 150 Kugeln als gesättigte Farbvalenzen unterzubringen. Folglich beträgt ihr Radius $r_f \approx 2 \cdot \pi \cdot r/(2 \cdot 150) \approx r/50$. In Richtung des Radius sind 20 Farbkugeln als unterscheidbare Sättigungen unterzubringen. Dafür gilt $r_s \approx r/(2 \cdot 20) \approx r/40$. Ein brauchbarer Mittelwert für den Farbkugelradius ist als $r/45$. Damit dieser Wert weiter benutzt werden kann, muß eine passende Höhe des Kegels bestimmt werden. Hier sind maximal 600 Farbkugeln vorhanden: $h \approx 2 \cdot 600 \cdot r/45 \approx 25 \cdot r$. Das Kegelvolumen beträgt daher $V_k = \pi \cdot r^2 \cdot h/3 \approx \pi \cdot 25 \cdot r^3 \approx 25 \cdot r^3$, das Farbkugelvolumen $V_f \approx 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 \approx r^3/20000$. Es folgen also etwa 500 000 unterscheidbare Farben.

Die Praktiker stellen dagegen in Tests fest, daß wir nur etwa 50 000 Farbvalenzen zu unterscheiden vermögen. Somit gilt die folgende Vergleichstabelle. Sie zeigt, wie erheblich der technische Aufwand bewußt (Sicherheit, Reproduzierbarkeit) übertrieben wird. Sie zeigt auch, wie groß dann die Möglichkeiten zur „verlustbehafteten" Komprimierung sind und wie wichtig die Wahl angepaßter Farbmodelle ist. Es sei aber noch ergänzt, daß meist angenommen wird, daß unser Auge etwa 200 Grautöne (Kontrast) unterscheiden kann und eine flächige Helligkeitsauflösung von ca. 1500×1500 Punkten besitzt.

Modell	Farben
RGB 24 Bit	16 772 216
Lab	5 120 000
HSL, physiologisch	500 000
Praktisch, Messung	50 000
Guter Vierfarbdruck	10 000

3.3.8 Farbmanagement

Bild 3.18 zeigte, daß die darstellbaren Farbbereiche für Monitore und Drucker recht unterschiedlich sind. Bildbearbeitungsprogramme müssen dies beachten und Lösungen bereitstellen. Besonders einfach ist eine Warnung, wenn Farben außerhalb der Druckmöglichkeit liegen. Leistungfähiger sind CMM-Verfahren (color management method). Hierbei existieren drei Prinzipien der Farbumrechnung. Bei der *colometrischen* werden die nicht druckbaren Farben durch nächstliegende ersetzt. Bei *wahrnehmungsbasierten* Verfahren werden alle Sättigungen gleichmäßig solange reduziert, bis alle Farben druckbar sind. Hierbei bleiben die Verhältnisse zwischen den Farben stimmig. Das ist vor allem bei Photographien vorteilhaft. Beim ICM (image color matching) von Kodak wird der Farbton geändert, und es bleiben die Sättigungen erhalten. Angewendet wird es u. a. bei Windows 95 und bei PostScript-Druckertreiber sowie als ColorSync von Linotype-Hell u. a. bei Apple.

Die meisten Drucker können nur eine genau definierte Punktgröße in den Prozeßfarben erzeugen, also in Schwarz und bei Farbe zusätzlich in Cyam, Magenta und Gelb. Um daraus alle gewünschten Grauwerte und | oder Farbvalenzen zu erzeugen, ist ein Dithern notwendig (to dither engl. = sich nicht entscheiden können, schwankend, seine Meinung ändern). Die Anzahl der Drucker-Farbpunkte muß dann deutlich größer als die Anzahl der zu erzeugenden „sichtbaren" Farbpixel sein. Jedes Pixel wird mittels der Belegung einer Matrix erzeugt. **Bild 3.21a** demonstriert die Möglichkeiten mit einer 4×4-Matrix. Sie ermöglicht fünf Grauwerte. Mit einem quadratischen Raster aus $n \times n$ Punkten lassen sich bei nur Schwarz n^2+1 Grauwerte bzw. mit den 3 Prozeßfarben etwa $3 \cdot n^2$ Farben erzeugen. Die Druckerauflösung sinkt dadurch auf $1/n$. Außerdem besteht die Gefahr, daß Flächen gleicher Helligkeit | Farbe durch die periodische Wiederholung der Matrixstruktur sichtbare Störungen (Moiré) zeigen (Bild 3.21b). *Gestreutes* Dithern nutzt daher die Möglichkeit aus, gleiche Helligkeit | Farbe durch verschiedene Anordnungen der Drucker-Punkte in der Matrix zu erreichen. Für 25 % Schwärzung zeigt dies Bild 3.21c. Bei Farben ist es zusätzlich üblich, die Matrizen der Ditherzellen für die Prozeßfarben in der Richtung um 20° bis 45° zu drehen (Bild 3.21c). Dadurch wird sowohl das Moiré deutlich gemildert als auch die Auflösung des Druckers weniger reduziert. Einige neuere Drucker verwenden sieben statt vier Prozeßfarben. Die zwei zusätzlichen Farben entsprechen anderen

Prozeßfarben, sind jedoch stark verdünnt. So können wesentlich bessere Pastelltöne erzeugt werden. Bei sehr guten Industriedrucken existieren auch mehr als vier Prozeßfarben, hinzu kommen z. B. braun oder rosa. Dann sind natürlich ganz spezielle Farbräume notwendig.

Zum Farbmanagement gehört auch der Gradationsausgleich zwischen den verschiedenen Geräten. Bei den Farbbildröhren folgt z. B. infolge des Raumladungsgesetzes von Elektronenröhren die abgegebene Helligkeit etwa mit der Quadratwurzel der angelegten Steuerspannung. Bei Druckern, Belichtern und Scannern gelten je nach Prinzip andere Gesetzmäßigkeiten. Typische Kennlinien im doppelt logarithmischen Maßstab zeigt **Bild 3.22**. Der Punktzuwachs (Tonwertzunahme) beim Drucker entsteht dadurch, daß sich stärker aufgetragene Farben im Papier unerwünscht nach den Seiten hin ausbreiten (ausbluten). Bei Scannern ist es üblich, die Kennlinie bereits im Gerät bzw. im Treiber durch Umrechnung anzupassen. Hierzu wird eine Kalibrierung durchgeführt. Bei Filmbelichtern geht die Gradationskurve des jeweiligen Films und seiner Bearbeitung ein. Typisch sind hier die Schwelle, die Sättigung in der Schwärzung und z. T. der dann erfolgende Abfall (Solarisation).

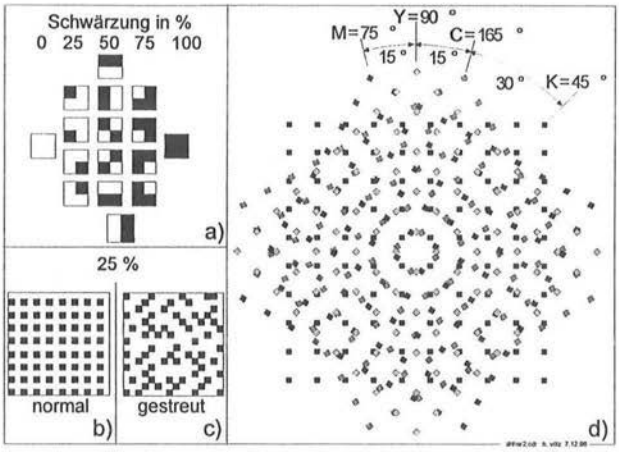


Bild 3.21 Dithern zum Erzeugung mehrerer Graustufen | Farben

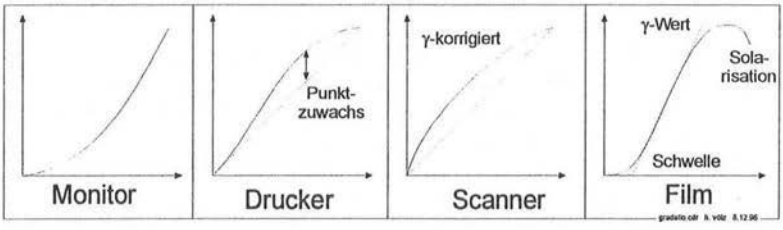


Bild 3.22 Gradationskurven verschiedener Bildverfahren

Schließlich gibt es absolute Referenzfarbenmodelle, die, wie z. B. PANTONE, mit nur numerisch genau festgelegten Standardfarben (z. B. 700) operieren. Es kommen dann also keine Farbmodelle und Farbvalenzen zur Anwendung, sondern nur genau definierte Farbtabellen, die auf dem Monitor kein Äquivalent besitzen.

3.3.9 Zum Gebrauch von Farben

Farben werden nicht nur objektiv wahrgenommen (Farbvalenzen), sondern lösen auch stark subjektive Empfindungen aus, die z. T. symbolischen Charakter tragen. So steht im europäischen Kulturkreis z. B. Weiß für Unschuld und Reinheit, Gelb für Neid, Rot für Liebe, Grün für Hoffnung und Schwarz für Trauer. In anderen Kulturkreisen gelten teilweise andere Farbzusammenhänge, z. B. steht im Asiatischen für Trauer Weiß und dunkles Gelb für heilig. Auf diese Weise besitzen Farben einen hohen Informationswert und vermitteln zugleich Gefühle. Während bei photorealistischen Bildern die üblichen Regeln der Kunstwissenschaften gelten, sind für technische Belange, z. B. bei

Präsentationen, teilweise abweichende Regeln für die Wahl der Farben zu beachten. Der technisch nutzbare Symbolwert von Farben hat sich international vereinheitlicht und weicht etwas gegenüber den Gefühlswerten ab. So steht meist Rot für Nein, Gefahr und Halt; Gelb für Vorsicht und Warnung; Grün für Gehen, freie Fahrt.

Farben bereiten oft Freude und machen oft Kompliziertes übersichtlicher, daher besteht die Gefahr, mit ihnen zu üppig umzugehen. Generell sollten nicht zu viele verschiedene Farben benutzt werden. Es ist zu bedenken, daß auch Weiß, Grau und Schwarz Farben sind. Helle Farben wirken oft blaß. Ein dunkler Hintergrund läßt sie deutlicher hervortreten. Farben verändern durch ihre Umgebung bzw. durch Wechselwirkung mit anderen Farben leicht ihren Charakter. Für die richtige Anwendung kann der Farbkreis (rot, gelb, grün, cyam, blau, magenta, rot) hilfreich sein. Werden gezielt nur zwei Farben benutzt, so gilt etwa: Die sich gegenüberliegenden Komplementärfarben neigen zum Vibrieren und lenken das Auge ab. Dicht beieinander liegende Farben wirken harmonisch. Werden zwei Farben genutzt, zwischen denen eine fehlt, so erzeugen sie einen Kontrast. Bei Strichzeichnungen und Schrift muß für Farben oft die Strichstärke größer gewählt werden. Bei Projektion von farbigen Bildern ist es vorteilhaft, wenn in dunklen Räumen auch ein dunkler Hintergrund gewählt wird, in hellen ein heller.

3.4 Bilderkennung

Bilder haben für uns meist einen Inhalt, einen Sinn, eine Bedeutung. Es ist bisher technisch nicht gelungen, diesen Inhalt automatisch zu erfassen. Offensichtlich handelt es sich hierbei um eine spezifische Leistung unseres Gesichtsinns auf höherer Nervenebene. Zur Verdeutlichung wurden in **Bild 3.23** wenige Beispiele zusammengestellt. (a) zeigt, wie fehlende Details oft problemlos ergänzt werden. Dabei beeinflussen Detailunterschiede kaum die Wiedererkennung der hinter dem Gesicht stehenden Person. (b) demonstriert die Kontextabhängigkeit einfacher Bildreize. Das jeweils in der Mitte gezeigte Strichbild wird je nach den Umständen u. a. mit dem rechten oder linken Inhalt interpretiert. Bei den Umschlagbildern (c) ist das noch ausgeprägter. Die Frau (oben) erscheint uns einmal als alte Frau aus dem Pelz zur linken Seite blickend, dann als junge Frau mit Schleier. Am Hals trägt sie ein schwarzes Samtband. Es wird im anderen Fall zum zahnlosen Mund der alten Frau. Ihre große Nase ist sonst das schlanke Kinn der jungen Frau. Wichtig ist, daß immer nur eine Variante, niemals beide zugleich, zu sehen sind. Das untere Bild in (c) kann entweder als schwarze Vase oder als zwei sich von den beiden Seiten nähernde Gesichter gesehen werden. Völlig anders verhalten sich die „unmöglichen" Konstruktionen (d). Es sind „scheinbar" räumliche Gestalten, die aber im Raum nicht widerspruchsfrei existieren können. Deckt man beim oberen Bild die linke Hälfte zu, so sieht man drei Rohre, deckt man die rechte Seite zu, so erscheint ein U-förmiges Stück mit rechteckigem Profil. Beim mittleren Bild werden die Widersprüche deutlich, wenn man die obere bzw. die untere Hälfte verdeckt. Beim unteren Penrose-Dreieck muß man bereits über die Hälfte verdecken, um einen brauchbaren räumlichen Eindruck zu erreichen. Eine Vielzahl dieser Varianten hat M. C. Escher künstlerisch gestaltet.

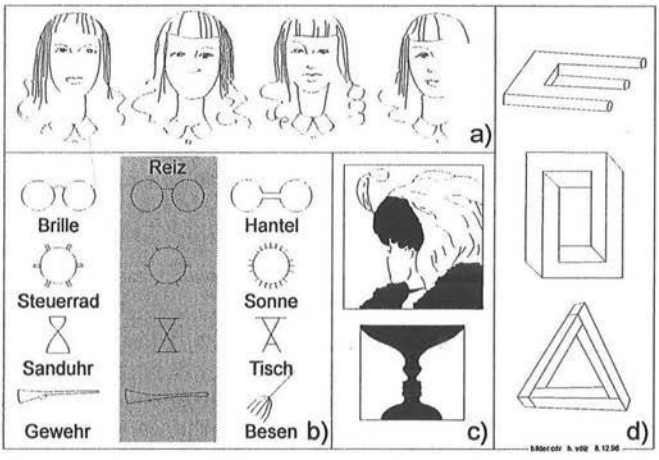


Bild 3.23 Zu Möglichkeiten und Problemen der Bilderkennung

4 Hören

4.1 Strukturen des Gehörs

Wesentliche Teile unseres Gehörorgans befinden sich im Kopf etwa hinter den Augen (**Bild 4.1**a). Die wichtigsten Details des anatomischen Aufbaus zeigt im Schnitt Bild 4.1b. Zum *Außenohr* gehören Ohrmuschel, Gehörgang und Trommelfell. Das *Mittelohr* – sein Hohlraum mit 2 cm^3 heißt Paukenhöhle – ist fast vollständig durch das Felsenbein begrenzt. Über das Trommelfell besteht eine Verbindung zum Außenohr. Das runde und das ovale Fenster stellen die Verbindung zum Innenohr her. Die Eustachische Röhre führt über den Nasenraum zur Außenwelt. Sie wird durch einen Muskel verschlossen. Er öffnet den Zugang kurzzeitig beim Gähnen und Schlucken. So bleibt einerseits das Mittelohr vor Bakterien geschützt und andererseits wird in gewissen Zeitabständen dafür gesorgt, daß im Mittelohr der Außendruck vorliegt. Funktionell sind für das Mittelohr die drei Gehörknöchelchen (Hammer, Amboß und Steigbügel) wichtig. Das *Innenohr* besteht aus der Schnecke (cochlear) und dem Gehörnerv. Nicht zum Gehör zählen die *Bogengänge*. Sie sind Grundlage des Gleichgewichtsorgans (s. S. 64ff). Die hier vorhandene Flüssigkeit, die Lymphe, kommuniziert teilweise mit der Flüssigkeit in der Schnecke.

Die Ohrmuschel hat für die reine Schallübertragung keine wesentliche Bedeutung. Selbst beim Fehlen | Entfernen tritt ein kaum meßbarer Unterschied auf. Da sie nach hinten abschirmt, unterstützt sie aber die Entscheidung vorn|hinten und das Richtungshören. Dies wird noch durch Reflexionen an den Eindellungen verstärkt.

Der Gehörgang ist bei einem Durchmesser von 0,9 cm etwa 2,5 cm lang. Er endet am Trommelfell. Dadurch wirkt er wie eine gedackte Pfeife mit einer Resonanzfrequenz von etwa 4 kHz ($\lambda/4$). Mit der Schallgeschwindigkeit in Luft $v \approx 340$ m/s, der Frequenz f und Wellenlänge λ gilt wegen $\lambda = v/f$ die nebenstehende Tabelle. Alle Frequenzen tiefer als etwa 2 kHz werden dabei fast unverändert vom Eingang des Gehörganges zum Trommelfell übertragen. Die zuerst von Wiener und Ross gemessene Kurve von Bild 4.1g zeigen, daß die Schalldrucküberhöhung nur 12 dB beträgt (etwa 4-fach) und den Frequenzbereich von 2 bis 6 kHz betrifft. Das Trommelfell überträgt nämlich einen großen Ener-

f/Hz	λ/cm	$\lambda/4$·cm
20	1700	430
100	340	85
1000	34	8,5
10000	3,4	0,85
20000	1,7	0,43

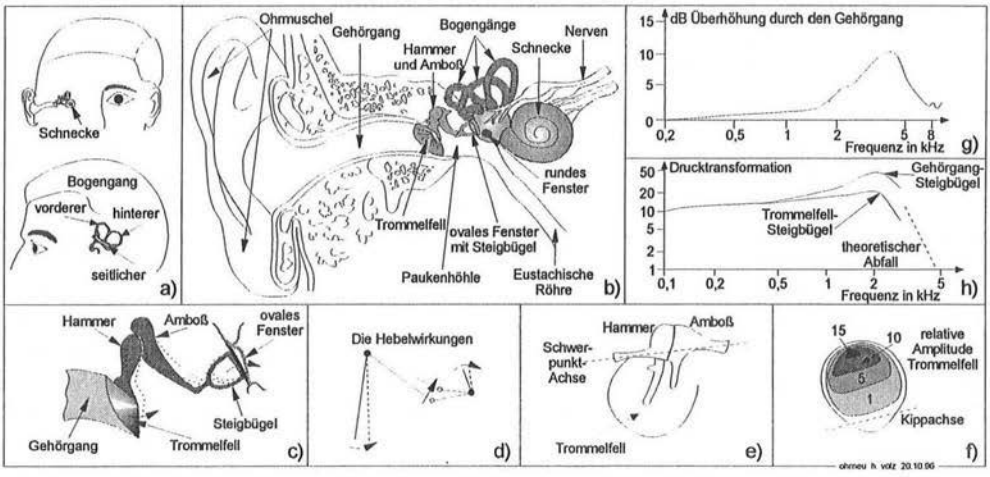


Bild 4.1 Das Ohr und wichtige Eigenschaften des Mittelohres

gieanteil an die Gehörknöchel. Bei etwa 2 kHz – der höchsten Empfindlichkeit des Ohres – besteht außerdem eine gute Anpassung an den Wellenwiderstand der Luft. Daher wird hier fast die gesamte Schallenergie vom Trommelfell übernommen. Zu den höheren | tieferen Frequenzen ist die Anpassung schlechter, Schall wird daher reflektiert. Bei 100 Hz gehen so 20 dB verloren. Es wird nur noch 1 % der möglichen Schallenergie vom Trommelfell aufgenommen und weitergeleitet.

Das Trommelfell besitzt eine Fläche von ca. 70 mm^2 (9,2 × 8,5). Es schwingt nicht wie eine Membran, sondern kippt starr als Ganzes – fast wie eine Tür – um die rechte untere Kante. Erstmalig wurde dieser Effekt 1941 von Bekesy bei 2,5 kHz gemessen (Bild 4.1f). Die stärkste Amplitude (15) befindet sich links oben. Auf diese Weise nimmt das Trommelfell dreimal soviel Energie als bei einer Membranschwingung auf. Die ungewöhnliche Schwingungsform wird sowohl durch den angewachsenen Hammer (Bild 4.1e) als auch durch die trichterförmige Gestalt des Trommelfelles mit 2 mm Trichtertiefe erzwungen (Bild 4.1c). Durch falschen Druck im Mittelohr wird allerdings das Trommelfell aus seiner Normallage verschoben und so der Schwingungsmechanismus nachteilig verändert (vgl. Eustachische Röhre). Dadurch treten deutliche Hörverluste auf. Sie sind besonders beim Landen und Starten in Flugzeugen zu spüren. Bei Überdruck im Mittelohr sinkt die Energieaufnahme bei 1 kHz bis auf 1 % ab. Über 4 kHz kann dabei allerdings auch eine Empfindlichkeitssteigerung auftreten. Bei 100 Hz beträgt der Verlust etwa 20 %. Befindet sich im Mittelohr ein Unterdruck (z. B. beim Landen), so sind die Verluste noch größer. Für hohe Frequenzen tritt dann kein Gewinn ein.

Die drei Gehörknöchelchen des Mittelohres – Hammer (Malleus, 25 mg), Amboß (Incus, 25 mg) und Steigbügel (Stapes 2,5 mg) – übertragen die vom Trommelfell aufgenommene Schallenergie als Bewegungsenergie zum ovalen Fenster. Der Übertragungsmechanismus wird dabei durch die räumliche Anordnung der Gehörknöchelchen bestimmt (Bild 4.1c). Die Kette schwingt um ihren Schwerpunkt, der durch den Kopf des Hammers geht (Bild 4.1 e). Hierdurch ist die Gehörknöchelchenkette völlig unempfindlich gegen Bewegungen des Kopfes, also u. a. auch gegenüber Stößen, die vom Gehen oder Hüpfen herrühren. Nur so konnte die Empfindlichkeit des Ohres extrem weit gesteigert werden. Eine weitere Steigerung hätte bereits das Rauschen des Blutes hörbar gemacht. Die Schallfortleitung der Knöchelchenkette gehorcht den Hebelgesetzen (Bild 4.1d). Der Hammer folgt dem Trommelfell. Das führt zu einer ähnlichen Kippung des Ambosses. Infolge der elastischen Bindung zwischen Amboß und Steigbügel führt auch der Steigbügel eine Kippung um seine Aufhängung aus. So kommt es zur Bewegung des ovalen Fensters. Die gesamte Übersetzung des Doppelhebels beträgt etwa 1:1,3. Ihr überlagert ist die Kraftübersetzung (Druck ist Kraft/Fläche) durch das Flächenverhältnis von Trommelfell (70, wirksam 55 mm^2) und ovalem Fenster (3,2 mm^2). Dadurch liegt insgesamt eine rund 20-fache Drucküberhöhung vor. Sie entspricht gut dem Verhältnis der Schallwellenwiderstände von Luft und Lymphe. Diese wirkliche Übersetzung fällt jedoch für Frequenzen über 2 kHz sehr steil ab. Die Bewegung der Masse der Gehörknöchelchen erfordert mit wachsender Frequenz mehr Energie. Im elektrischen Modell entspricht der Masse eine Kapazität. Die elastischen Bindungen zwischen den Knöchelchen wirken wie Induktivitäten. Daher kann die Kette als dreigliedriger Tiefpaß mit 2,4 kHz Grenzfrequenz und einer Dämpfung von 18 dB/Oktave beschrieben werden. Den zugehörigen Frequenzgang zeigt Bild 4.1 h. Wenn z. B. durch Krankheit die Knöchelchenkette blockiert oder unterbrochen ist, dann kann der Schall nur direkt auf das runde Fenster (2 %) wirken. Dabei kann aber höchstens $^1/_{30}$-stel der Energie zum ovalen Fenster gelangen.

Der Schwingmechanismus der Knöchelchen, insbesondere der des Steigbügels, kann durch zwei Muskeln beeinflußt werden. Der Muskel Tensor tympanie greift am Hammer an und kann so die Spannung des Trommelfells ändern. Der Muskel stapides greift am Steigbügel an. Er ist mit 6 mm Länge und 5 mm^2 Querschnitt der kleinste menschliche Muskel überhaupt. Er verändert die Schwingungsrichtung des Steigbügels auf das ovale Fenster. Beide Muskeln realisieren einen Schutzreflex, der bei großen Schalldrucken wirksam wird.

In geringem Umfang können im Mittelohr auch Kombinationstöne durch Nichtlinearitäten in den elastischen Bindungen entstehen. Das ist für das musikalische Gehör, für das Intervallhören und beim Klavierstimmen wichtig. Stärkere Verzerrungen treten jedoch bei der neuronalen Verarbeitung auf.

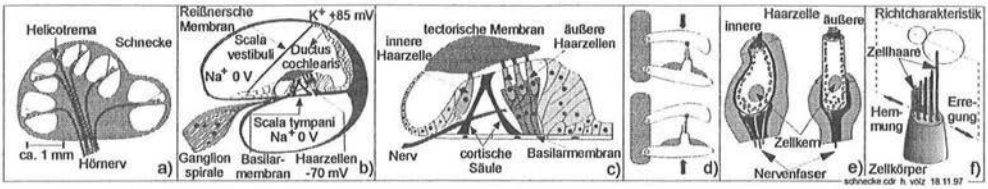


Bild 4.2 Innerer Aufbau der Schnecke und die Wirkung der Hörzellen

Die Schnecke (cochlear; **Bild 4.2**a) besitzt etwa 2,7 Windungen. Der typische Querschnitt des Schneckenhohlraumes (Bild 4.2b) besteht aus drei Teilräumen: 1. der mit dem ovalen Fenster verbunden Scala vestibuli; 2. die Scala media = Cochlear duct und 3. der mit dem runden Fenster verbundene Scala tympani. Am (oberen) Ende der Schnecke, dem Helicotrema, sind die Scala vestibuli und tympani miteinander verbunden. Die Scala vestibuli steht außerdem mit den Bogengängen in Verbindung. Die Lymphe in der Scala media besitzt sehr spezielle Eigenschaften. So ist in ihr die K^+-Konzentration mit 150 mmol/l extrem hoch. Dadurch hat sie ein statisches Potential von etwa +85 mV. Die trennende Reißnersche Membran (Vestibulier-Membran) ist so fein und weich, daß sie für die Schallwellen keinen wesentlichen Widerstand besitzt. Akustisch liegt also nur eine Zweiteilung des Schneckenganges vor. Zu etwa $^2/_3$ erfolgt sie durch das Felsenbein. Den Rest überbrückt die gallertartige Basilarmembran. Sie ist in der Querrichtung durch ca. 25 000 Fasern verstärkt. Ihre Länge vom runden bzw. ovalen Fenster bis zum Helicotrema beträgt etwa 32 mm. Ihre Breite nimmt dabei von 40 µm auf 500 µm (am Helicotrema) zu, ihre Steifigkeit etwa exponentiell von 10^{-7} auf 10^{-5} cm/dyn. Auf der Basilarmembran befindet sich das Cortische Organ (Bild 4.2c). Die Cortischen Säulen verleihen ihm eine relativ hohe Festigkeit. Als Sinneszellen sind Haarzellen vorhanden. Sie tragen an ihrem oberen Ende ca. 80 bis 100 feinste Härchen, deren Länge von innen nach außen zunimmt. Die Länge der Haarzellen nimmt in Richtung Helicotrema von 50 auf 90 µm zu. Die 3 500 inneren Haarzellen stehen einzeln in Reihe und besitzen einen Durchmesser von 12 µm. Die ca. 20 000 äußeren Haarzellen stehen in Dreierreihen und sind etwa 8 µm dick. Über den Haarzellen befindet sich die gelantineartige tectorische Membran. Sie berührt die längsten Fortsätze der Haarzellen bzw. ist mit ihnen verwachsen. Die Steife des Cortischen Organs und der Reißnerschen Membran bleibt über die gesamte Länge konstant. Von den Schallwellen wird also vor allem die Basilarmembran bewegt. Dadurch werden die Fortsätze der Haarzellen scherend ausgelenkt (Bild 4.2d). Hierdurch wird ihr Rezeptorpotential geändert. Die höchste beobachtete Geschwindigkeit liegt dabei bei etwa 5 kHz. Die inneren und äußeren Haarzellen unterscheiden sich deutlich im Aussehen (Bild 4.2e). In beiden Fällen besteht die Richtcharakteristik gemäß Bild 4.2f. Die äußeren Haarzellen besitzen ein Ruhepotential von ca. -70 mV und sind viel empfindlicher als die inneren. Bei den inneren liegt das Potential bei -40 mV. Sie werden auch zusätzlich durch efferente Fasern beeinflußt.

4.2 Die Schallanalyse

Bereits die Anatomie weist darauf hin, daß die erste Schallanalyse in der Schnecke erfolgt. Helmholtz nahm deshalb um 1860 an, daß die Fäden der Basilarmembran auf die einzelnen Frequenzen ähnlich wie beim Zungenfrequenzmesser abgestimmt seien. Diese Theorie widerspricht jedoch erheblich den Leistungen unseres Gehörs. Bereits nach zwei Schwingungen können wir die dargebotene Frequenz angeben. Selbst bei großen Zeitabständen erfolgt dies auf 1 ‰, bei kurzen sogar auf 0,3 ‰ genau. Bei Resonanzerscheinungen gilt andererseits bezüglich der Frequenzgenauigkeit Δr, der Mittenfrequenz f und der Meßzeit ΔT

$$\Delta r \cdot f \cdot \Delta T \approx 2.$$

Daraus errechnet sich die zur Erkennung notwendige Schwingungsanzahl zu

$$n \approx 2/\Delta r.$$

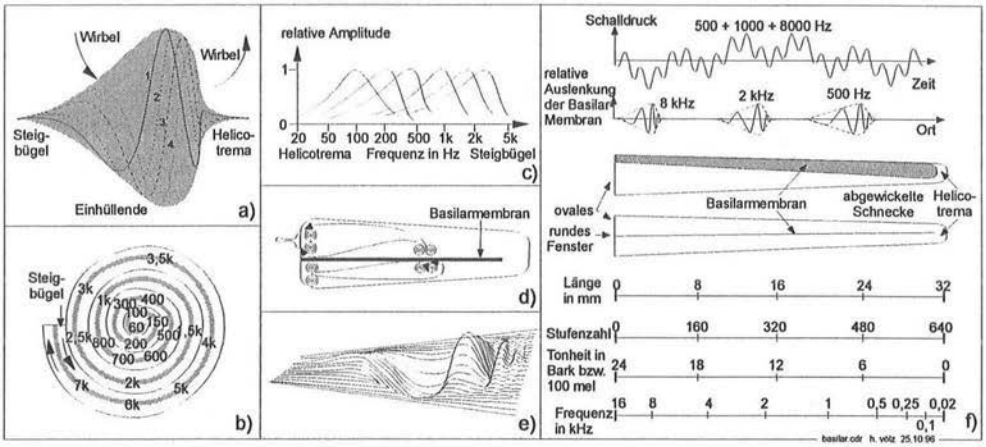


Bild 4.3 Zur Frequenzanalyse in der Schnecke des Ohres

Statt zwei Schwingungen wären also mindestens 50 notwendig. Noch heute gilt die schon 1930 von Fletcher, Ranke, Zwislocki und anderen entwickelte hydrodynamische Wanderwellentheorie (s. u.). Sie wurde in den vierziger Jahren experimentell von Bekesy bestätigt. U. a. erhielt er hierfür 1961 den Nobelpreis. Danach wirken die Basilarmembran und die Schneckenflüssigkeit als Tiefpaß, der zum Helicotreme hin immer tiefer abgestimmt ist. Der Steigbügel erregt eine Wanderwelle, die in Richtung Helicotrema läuft. Die Amplitude der Ausbiegung der Basilarmembran nimmt dabei zunächst resonanzartig zu. An der Stelle, wo sich die zugehörige Grenzfrequenz in der Basilarmembran befindet, fällt sie steil ab. Diesen Verlauf zeigt **Bild 4.3**a für vier Zeitpunkte, die einen zeitlichen Abstand von $^1/_8$ Periode haben. Die grau unterlegte Hüllkurve zeigt die örtliche Maximalerregung der Basilarmembran. Bild 4.3e zeigt in einer dreidimensionalen Darstellung eine typische Auslenkung der Basilarmembran. Beginnend am Steigbügel breiten sich die Schallwellen über das ovale Fenster in der Scala tympani hin zum Helicotrema aus. Am Ort der „Resonanzfrequenz" gelangen sie durch die Basilarmembran hindurch in die Scala tympani, um sich dann wieder zurück zum runden Fenster zu bewegen. Dort erfolgt der Druckausgleich zum Innenohr. Die Wanderwelle nimmt bei ihrer Fortpflanzung auch Lymphe mit. Dabei entstehen in der Umgebung der Maximalauslenkung Wirbelpaare, die durch Pfeile in Bild 4.3a angedeutet sind. Für die abgewickelte Schnecke zeigt sie Bild 4.3d deutlicher. Bild 4.3c weist die Lage der Hüllkurven für mehrere Frequenzen aus. Der Ort des Schwingungsmaximums auf der Schnecke bestimmt also die Frequenzanalyse (vgl. Bild 4.3b). Die Resonanzgüte beträgt nur etwa 1,7 und erklärt recht gut die schnelle Frequenzanalyse, aber keineswegs ihre hohe Genauigkeit. Sie entsteht erst durch die Kopplung von Neuronen mittels Kontrasterhöhung. Das konnte Bekesy 1956 durch einen interessanten Versuch bestätigen. Er schuf ein wesentlich vergrößertes, lineares abgewickeltes Modell der Schnecke und ließ es auf den Unterarm einwirken. Die Idee war aus der Entwicklungsgeschichte des Gehörs entstanden. Die Basilarmembran ging nämlich ursprünglich aus einer Hautfalte hervor. Obwohl die Schwingungsformen im Modell nicht sehr genau denen in der Schnecke entsprachen, ließ sich subjektiv für jede Frequenz ein sehr genauer Ort auf dem Unterarm angeben. Die Schnecke ermöglicht also auf hydrodynamischem Wege eine schnelle Grobanalyse des Schalles. Die Feinanalyse bewirkt die Schaltung der Nervenzellen.

Die Wirbel ermöglichen zusätzlich eine gute Analyse von Einschwingvorgängen. Sie sind also für den zeitlichen Verlauf von Schallereignissen zuständig. Wirkt auf das Ohr ein Frequenzgemisch ein, so entstehen auf der Basilarmembran mehrere Maximalerregungen (vgl. Bild 4.3f oben). Die Hüllkurve einer Frequenz mit großer Amplitude kann dabei leicht Maxima benachbarter Frequenzen

überdecken (vgl. Verdeckungseffekt S. 55). Entsprechend der Gestalt der Hüllkurve werden dabei mehr tiefe als hohe Frequenzen unhörbar.

4.3 Grundzüge der Wanderwellentheorie

Die folgende Betrachtung gibt nur die wichtigsten Zusammenhänge der Theorie wieder. Für genauere Betrachtungen sei auf [RAN] verwiesen.

Bild 4.4 zeigt schematisch die abgewickelte Schnecke. Darin bedeuten: Q Scalenquerschnitt; ρ Dichte der Lymphe; v Schallgeschwindigkeit in der Lymphe; b Breite der Basilarmembran; p Druck in der Scala; y Auslenkung der Basilarmembran und v Geschwindigkeit ihrer Auslenkung. Dann folgt

$$\frac{\partial(Q_i, vi_1)}{\partial x}dx + \frac{Q_i dx\,\partial\rho}{\rho\ \partial t} + vbdx = 0.$$

Die Gleichung gilt mit i=1 für die Scala vestibuli und mit i=2 für die Scala tympani. Das erste Glied betrifft die Differenz aus ein- und austretender Flüssigkeit, das zweite die Dichteänderung und das dritte das Zusatzvolumen der Basilarmembran. Mit dem Newtonschen Gesetz $K = m \cdot b$ und Division durch die Länge dx folgt

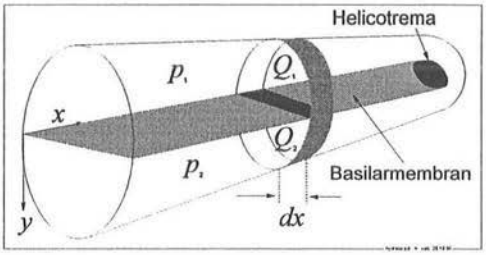


Bild 4.4 Modell der Schnecke

$$-\frac{\partial(Q_i, v_i)}{\partial x} = \rho Q_i \frac{\partial v_i}{\partial t}$$

und somit

$$v_i = -\frac{1}{\rho Q_i}\int_{\tau=0}^{t} \frac{\partial(Q_i p_i)}{\partial x} d\tau .$$

Über die Schallgeschwindigkeit ist die Druckänderung mit einer Dichteänderung verknüpft

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t} .$$

Durch Einsetzen und Division mit dx folgt dann

$$-\frac{1}{\rho}\int_{\tau=0}^{t} \frac{\partial^2\left(Q_i p_i\right)}{\partial x^2} d\tau + \frac{Q_i}{\rho c^2}\frac{\partial p_i}{\partial t} + vb = 0 .$$

Zur Vereinfachung kann $Q_1 = Q_2 = Q$; $p_1 - p_2 = p$ und $Q_1 p_1 - Q_2 p_2 = Q_p$ gewählt werden. Für die Auslenkung gilt dann

$$y = \int_{\tau=0}^{t} v\, d\tau .$$

Der Widerstand der Basilarmembran beträgt

$$Z(x) = \frac{p}{y} = S(x) + j\omega R(x) - \omega^2 M(x),$$

wobei die Teilglieder ihre Steife, ihren Widerstand und ihre Masse betreffen. Da sich Q und Z nur langsam ändern, gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c \approx \sqrt{\frac{QZ}{2b\rho}} .$$

Somit folgt weiter

$$\frac{\partial^2(Qp)}{\partial x^2}-\left(\frac{1}{c^2}+\frac{2b\rho}{QZ(x)}\right)\frac{\partial^2(Qp)}{\partial t^2}=0\,.$$

Die additiven Glieder in der Klammer betreffen die Wellengeschwindigkeit und die Kompressibilität. So kommt es zur Verschiebung der Basilarmembran gemäß

$$\frac{\partial^2(QZy)}{\partial x^2}-\left(\frac{1}{c^2}+\frac{2b\rho}{QZ(x)}\right)\frac{\partial^2(QZy)}{\partial t^2}=0\,.$$

4.4 Die Hörbahn

Hören erfolgt über eine besonders komplexe Nervenbahn, die frühestens nach 6 Neuronen zum Großhirn gelangt (**Bild 4.5**). Dazu gehören viele afferente und efferente Verknüpfungen. Zu den efferenten Verbindungen gibt es noch relativ wenige Kenntnisse. Die äußeren Haarzellen dienen überwiegend der Frequenzanalyse bei kleinen und mittleren Lautstärken. Die inneren Haarzellen treten dagegen bei den großen Lautstärken und den Einschwingvorgängen in Aktion. 90 % der äußeren Haarzellen wirken auf je eine afferente Nervenfaser. Hier erfolgt also keine wesentliche unmittelbare Signalverarbeitung. Dafür spricht auch, daß vom Ganglion spinale noch verständliche Sprache abgeleitet werden kann. Auf dem efferenten Weg wird dagegen eine Vielzahl innerer Haarzellen beeinflußt. Die Axons des Ganglion spinale werden zunächst im Nucleus cochlearis (dorsalis und ventralis) umgeschaltet. Bereits im Olivenkern werden teilweise Nerven beider Ohren gekreuzt. Die weitere neuronale Verknüpfung erfolgt dann im Kern der lateralen Schleife und im Collicus inferior, hier wieder mit Verknüpfung der rechten und linken Signale. Über den Corpus geniculatum mediale gelangen die Signale schließlich zur primären Hörrinde. Dort erfolgt die besonders komplexe Aufbereitung. Die meisten akustischen Neuronen schalten besonders schnell. Je Neuron beträgt die Verzögerung um 1 ms. Für die Hörbahn ist spezifisch, daß mit jeder Stufe der Verarbeitung die einbezogene Neuronenanzahl zunimmt. Erst hierdurch werden die vielfältigen Leistungen unseres Gehörs möglich. Dazu gehören z. B. Richtungshören (s. S. 56), Sprachverstehen und musikalisches Rezipieren. In den verschiedenen Nervenzentren gibt es Neuronen, die weniger auf Frequenzen oder Frequenzverhältnisse, sondern auf zeitliche Sequenzen, Änderung der Frequenz | Lautstärke usw. reagieren. Bereits bei der Katze konnte Keidel nachweisen, daß es im Corpus geniculatum Neuronen gibt, die unmittelbar auf Oktaven und Terzen ansprechen.

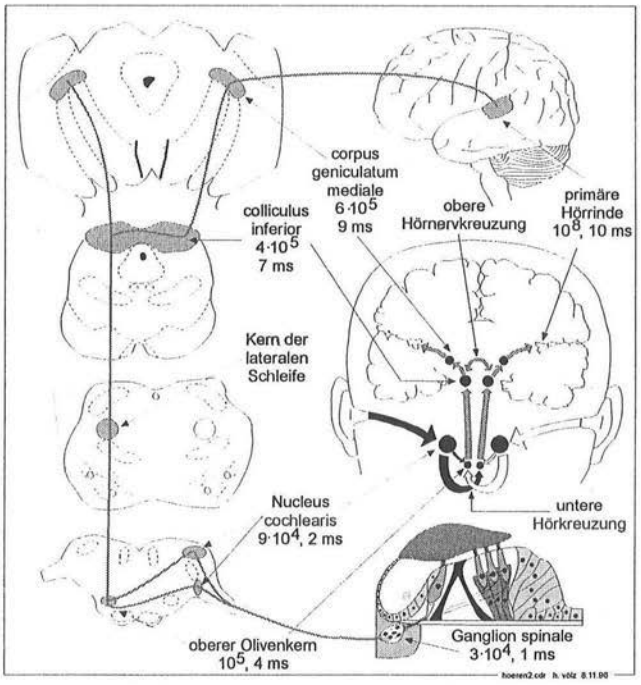


Bild 4.5 Verlauf der Hörbahn

Wir erkennen Sprache unabhängig von ihrem Grundtonbereich. Bei Musik hören wir aus dem harmonischen Spektrum stets den Grundton als Hauptton,

selbst dann, wenn er im Schallspektrum nicht vorhanden ist. Der Abstand der Maxima der einzelnen Oberwellen auf der Basilarmembran könnte dazu ausreichen. Generell dürfte den örtlichen Erregungsmustern auf der Basilarmembran große Bedeutung zukommen. So kann z. B. ein melodischer musikalischer Ablauf für das Gehirn in räumliches Geschehen umgesetzt werden. Hierfür spricht auch, daß Musikalität im Gegensatz zur Sprache bevorzugt in der rechten Gehirnhälfte lokalisiert ist. Auch das Erkennen von Phonemen könnte hier einzuordnen sein. Wenn es z. B. durch Ausfall höherer Zentren nicht mehr möglich ist, bleibt das Erkennen von Frequenzen erhalten. Wird dagegen die primäre Hörbahn zerstört, so stellt sich Taubheit ein. Ist die sekundäre Hörrinde vom Ausfall betroffen, so kann der Kranke zwar noch alles hören, ihm aber keinen Sinn zuordnen. Dennoch sind diese Menschen auf averbalem Gebiet z. T. hoch leistungsfähig. Der russische Komponist W. Schebalin wurde von einer Blutung des linken Schläfenlappens betroffen. Sie führte zu einer starken sensorischen Aphasie. Dennoch schuf er weiterhin wertvolle Symphonien. Auch die Taubheit von Beethoven und Dvorak sind dafür ein Beleg.

4.5 Schallmessungen

Schall kann als physikalische Größe akustisch, als physiologische auditiv gemessen werden. Physikalisch wird der Schalldruck in Pa (Pascal) bzw. N/m gemessen. Als relativer Pegel wird er in dB angegeben. Wird er auf $2 \cdot 10^{-5}$ Pa bezogenen, dann wird SPL (sound pressure level) hinzugefügt. Der Wert 0 dB SPL entspricht unserer Hörschwelle bei 1 kHz. In Luft gehören bei 1kHz und zu einem Schalldruck von 1 Pa: eine Schallamplitude von $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ m, eine Schallschnelle von $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ m/s und eine Schallintensität (= Schalleistungsdichte) von $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ W/m^2. Unser Hörbereich reicht von 10^{-16} bis 10^{-4} W/cm^2 (das Trommelfell ist fast 1 cm^2 groß).

Die auditiven Größen berücksichtigen zusätzlich die stark frequenzabhängigen Einflüsse (s. S. 45ff.). Mit Bezug auf das Weber-Fechnersche Gesetz (s. S. 18ff.) führte 1926 Heinrich Barkhausen das Phon als Maß für den Lautstärkepegel ein. Der Bezug war die Hörschwelle und eine gerade noch wahrnehmbare Lautstärkeänderung von 1 Phon. Die Hörschwelle ist aber individuell recht verschieden. Daher wurde international zu ihrer Bestimmung festgelegt, daß eine repräsentative Mädchengruppe mit einem Alter um 20 Jahre zu wählen ist. In guter Näherung entspricht heute das Phon bei 1 kHz dem Wert in dB SPL. Für andere Frequenzen wird experimentell bestimmt, wann sie beim Umschalten mit einem 1-kHz-Bezugton uns gleich laut erscheinen. So ergeben sich die Kurven von **Bild 4.6**a. Die zusätzlichen Verformungen in Bild 4.6b im freien Schallfeld entstehen vor allem durch die Ohrmuscheln und das neuronale Zusammenfassen beider Ohrensignale. Das Phon wird auch auf Frequenzgemische, also Klänge und Geräusche, angewendet. So entsteht die Lautstärkeskala von Bild 4.6c. Genauere Untersuchungen zeigten, daß der logarithmische Abstand nur näherungsweise gilt. Daher führte 1958 E. Zwicker das Son als Maß für die Lautheit ein. Eine Erhöhung um 1 Son tritt genau dann ein, wenn gleichzeitig zwei gleich lautstarke Schallquellen auftreten. n Son liegen dann vor, wenn der Hörer die Lautheit einer Quelle n-mal so laut einschätzt. Den Zusammenhang zwischen Phon und Son zeigt Bild 4.6d im linearen (a) und im logarithmischen Maßstab (b). Bei der Kurve b ist gerade noch die Abweichung vom logarithmischen Verlauf erkennbar. Oberhalb von 40 Phon entspricht jede Verdopplung der Lautheit einem Zuwachs der Laustärke um etwa 10 Phon. Daher wird meist die folgende Zahlenwertgleichung zwischen der Lautheit N in Son und dem Lautstärkepegel L in Phon empfohlen:

$$L = 40 + 10 \cdot \mathrm{ld}(N) \approx 33 \log N$$

Es gilt also 40 phon ≈ 1 Son und 130 Phon ≈ 512 Son. Lautstärke und Lautheit werden auch von den Schallereignissen beeinflußt (vgl. **Bild 4.7**a). Zur Umrechnung des physikalischen Schalldrucks (elektrischen Signals) in die subjektiven Werte existieren daher Bewertungskurven, beispielsweise die von Bild 4.7b. Sie heißen Ohrkurvenfilter und führen zum Meßwert dBA. Bei kurzen, impulsartigen Schallsignalen sind die Zusammenhänge noch komplizierter. Hierbei geht u.a. deutlich die Dauer des Schalls ein. Entsprechende Bewertungskurven sind daher noch unsicherer. Relativ gut gelingt es,

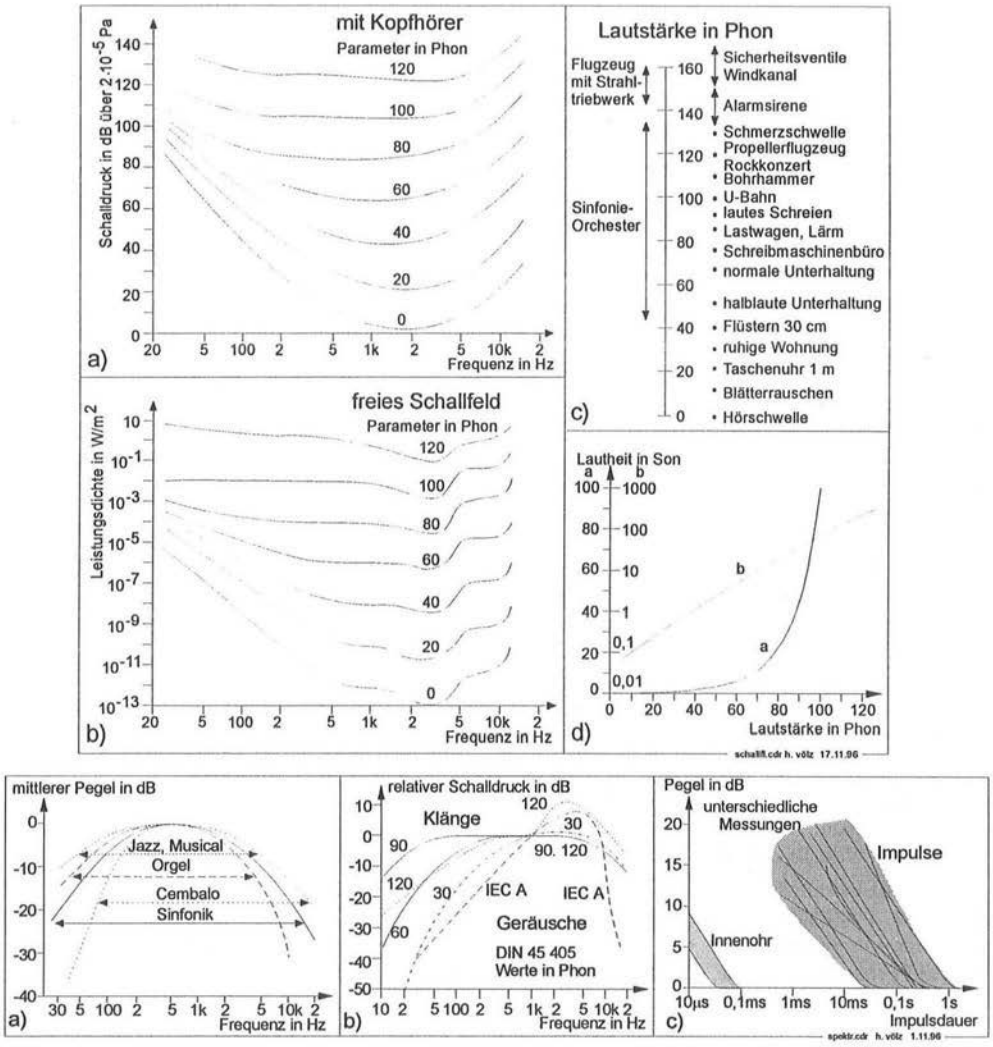


Bild 4.6 (oben) Zum Einfluß vom Spektrum und von Impulsen auf die Lautstärke
Bild 4.7 (unten) Lautstärke und Lautheit sowie deren Frequenzabhängigkeit

wenn eine objektive Bestimmung über das Innenohr erfolgt (Bild 4.7c). Das graue Feld gibt den Streubereich aller subjektiven Messungen an. Die eingezeichneten Linien sind Meßwerte verschiedener Autoren. Die linke Grenze gilt mehr für junge, die rechte mehr für ältere Personen. Allgemein gilt, je kürzer die Impulse sind, desto leiser erscheinen die Schallsignale. Eine Verdopplung der Signaldauer erhöht den empfundenen Pegel meist um 3 dB. Ferner liegen im Gehör offensichtlich mehrere Integrationszeiten vor. Für das Außen- und Mittelohr gelten je 50 µs, für den Muskel des Steigbügels 300 ms, für die Schnecke 30 µs und für das Gehirn 35 ms.

In der Audiometrie wird meist eine spezielle Darstellung benutzt. Die normale, standardisierte Hörschwelle wird als Gerade dargestellt. Da medizinisch nur Hörverluste interessieren, ergeben sich dafür frequenzabhängige Abweichungen zu den notwendigen größeren Schalldrucken. Sie werden als Absenkung in dB HL (hearing level) von der Gerade aufgetragen.

4.6 Hörbereich und Kenngrößen

Alter	kHz
Kind	21
35 Jahre	15
50 Jahre	12
Greis	5

Unser Hörbereich ist nach unten durch die Hörschwelle begrenzt. Sie weist eine maximale Empfindlichkeit um 1 kHz auf. Für hohe und tiefe Frequenzen ist deutlich mehr Energie erforderlich (vgl. Bild 4.6 a u. b). Bei sehr lautem Schall geht das Hören in eine Schmerzempfindung über (**Bild 4.8**a). Diese Grenze ist erheblich subjektiv und hängt auch vom Schallereignis selbst ab. Man denke nur an Diskos und Rockkonzerte. Als weitere Grenze wird in der Literatur zuweilen der Beginn der Lästigkeit (oft 110 Phon) genannt. Deutlich niedriger ist jener Wert, ab dem eine irreversible Schädigung des Gehörs, besonders bei hohen Frequenzen, auftritt. Durch die Hör- und Schmerzschwelle ist Hören auf eine Hörfläche bezüglich Frequenz und Energie begrenzt. Insbesondere die obere Hörgrenze ändert sich erheblich mit dem Alter. Die typischen Werte sind im Bild und in der obenstehenden Tabelle eingetragen. Im Bild 4.8a sind weiter die Bereiche einiger typischer Schallquellen eingetragen.

Wird ein Sinuston in seiner Lautstärke | Frequenz geändert, so bemerken wir dies erst ab einer bestimmten Stärke | Unterschiedsschwelle. Faßt man 25 Amplituden- und 100 Frequenzstufen zusammen, so entsteht das Bild 4.8b. Es geht teilweise auf eine Darstellung von Jacobson (1952) zurück. Heute wird oft die vereinfachte Einteilung in Rechtecke bevorzugt. Aus verschiedenen Quellen läßt sich die gestrichelte Kurve konstruieren, welche die Anzahl der Amplitudenstufen in Abhängigkeit von der Frequenz zeigt. Die maximal 350 Stufen werden um 1 kHz erreicht. An den Hörgrenzen besteht nur noch die Möglichkeit: Ton oder nicht Ton. Die Größe der einzelnen Unterschiedsflächen hängt weiter deutlich von der Lautstärke ab. Für 1 kHz zeigt dies Bild 4.8c. Die geringsten Änderungen können wir also bei 80 bis 100 Phon feststellen. Hierauf beruht die relativ hohe Abhörlautstärke der Studios um 70 Phon. Bei ihr sind eben die kleinsten Feinheiten im Musikgeschehen festzustellen.

Das Wahrnehmen von Frequenzänderungen wird durch noch mehr Einflüsse als bei der Amplitude verändert. Infolge der Einschwingvorgänge auf der Basilarmembran liegt erst nach etwa 100 ms die hinreichende Frequenzsicherheit vor (**Bild 4.9**a, umseitig). Der dann erreichte Wert hängt auch von der Frequenz selbst ab. Für 10 % der Sicherheit gilt Bild 4.9b. Von erheblichem Einfluß ist der zeitliche Abstand zweier Wahrnehmungen. Aus Bild 4.9c ist ersichtlich, daß wir besonders sicher Frequenzen bis ca. 4 kHz bestimmen können. Menschen mit absolutem Gehör können durch die Nennung der musikalischen Note auf 1 cent (= ±1 % Frequenz) genau entscheiden. Oberhalb von 4 kHz fehlen hierzu Noten. Menschen mit „normalem" Gehör vermögen deutlich weniger. Für die Frequenzerkennung besteht auch ein geringer Lautstärkeeinfluß: 30 und 80 Phon in Bild 4.9d. In dieses Bild wurden ergänzend Werte der Sensibilität unserer Haut und des Goldfisches eingetragen. Alle genannten Werte lassen sich gut mittels der Wanderwellentheorie (s. S. 48ff.) erklären. Hierzu wurde die Maßeinheit *Tonheit* in Bark (nach Barkhausen) eingeführt. Ein Bark entspricht sowohl der Maxi-

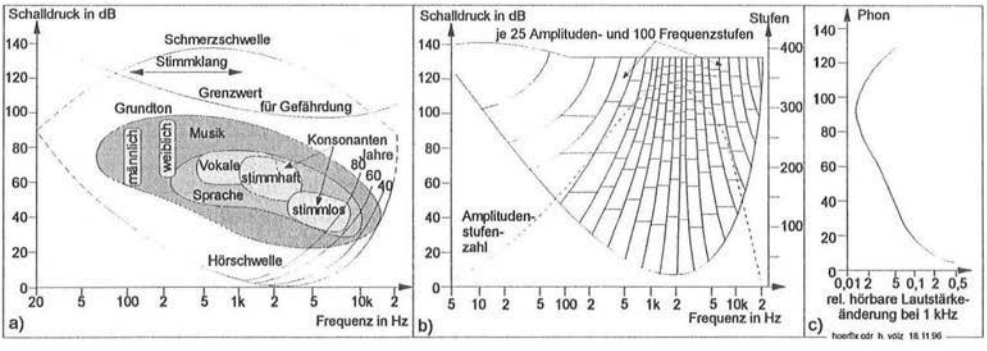


Bild 4.8 Die Hörfläche und hörbare Unterschiede

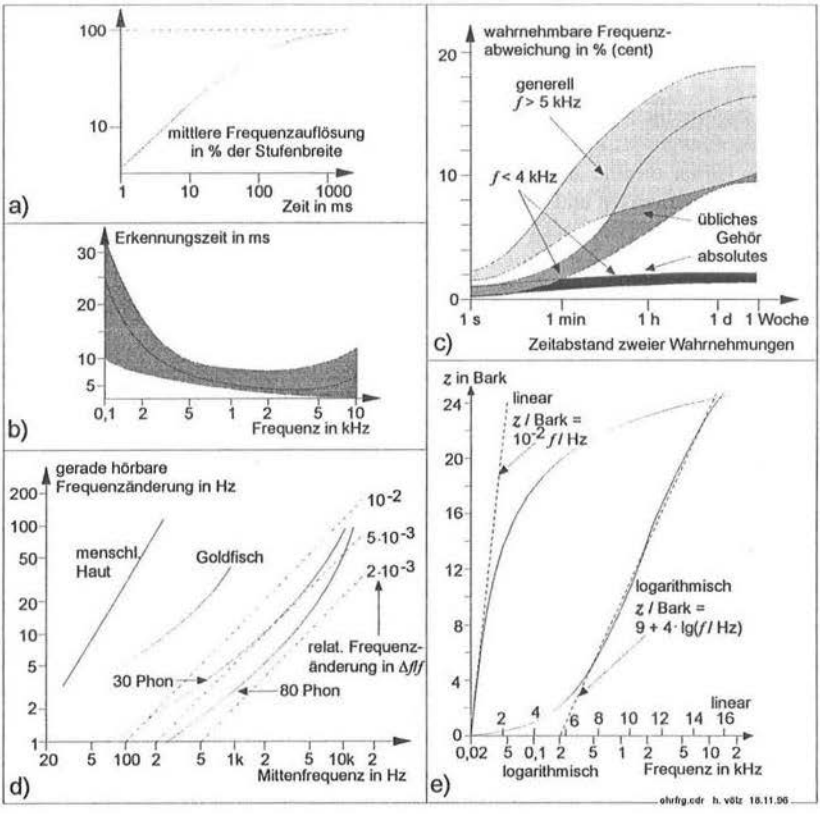


Bild 4.9 Zur möglichen Frequenzdifferenzierung des Gehörs

mumlokalisierung auf der Basilarmembran als auch den unterscheidbaren Frequenzstufen (Bild 4.9e). Bis etwa 200 Hz liegt eine annähernd lineare und darüber eine gut logarithmische Verteilung vor. Zur besseren Übersicht sind beide Skalen gleichzeitig auf der x-Achse eingetragen. Den maximal möglichen 24 Bark entsprechen 640 unterscheidbare Frequenzstufen bzw. den 32 mm der Basilarmembran, also 3600 Haarzellen (vgl. auch Bild 4.3f, S. 48). Auf eine Frequenzstufe entfallen also 50 µm mit 5,6 Haarzellen bzw. 0,038 Bark. Zuweilen wird noch die alte Maßeinheit mel (100 mel = 1 Bark) verwendet.

Nach der Wanderwellentheorie (vgl. S. 48ff.) erzeugt jeder Ton auf der Basilarmembran eine Resonanzkurve. In ihrer Hüllkurve gehen leisere, benachbarte Töne (kleinerer Amplitude) unter. Dieser Effekt ist beim Hören deutlich nachzuweisen. Besonders übersichtlich ist die Darstellung mit der Hörschwelle. Sie verändert sich dadurch zu einer dynamischen Verdeckungsschwelle. Beispiele zeigt **Bild 4.10**a. Für 1 kHz sind die Kurven unterschiedlicher Pegel gewählt. Je lauter der Ton wird, desto mehr und lautere Nachbarfrequenzen macht er unhörbar. Mittels Fouriertransformation wird der Effekt zur Audiodatenkompression (MPEG, MUSICAM, ATRAC usw.) benutzt. Neben diesem Amplitudeneffekt existiert noch ein zeitlicher, der sich aus den Einschwingvorgängen der Basilarmembran verstehen läßt. Einige ms vor einem lauten Ton werden andere, leisere unhörbar (Bild 4.10b). Auch nach dem Aufhören des lauten Tones klingt die Verbiegung der Basilarmembran nicht sofort ab. Daher bleiben fast hundert ms leisere Töne unhörbar. Nur im Bereich der gegenseitigen Maskierung gelten die Kurven von Bild 4.10a.

Bei der akustischen Übertragung entsteht eine Vielzahl von Störungen. Es ist daher praktisch wichtig, ab wann und wie stark sie zu hören sind. Hierzu existiert eine Vielzahl von Messungen. In **Bild 4.11** sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengestellt. Für hörbare Lautstärkeänderungen gilt Bild 4.11a. In der Nähe der Hörschwelle sind Amplitudenmodulationsgrade um 10 % zulässig, bei großen Lautstärken aber nur etwa 2 %. Für die zulässigen Frequenzänderungen gilt Bild 4.11b. Typische Werte liegen also bei nur wenigen ‰. Diese Werte hängen auch von der Geschwindigkeit der Änderung ab. Bild 4.11c gilt für die Änderungsfrequenzen der Frequenz und zeigt, daß ein Maximum bei ca. 4 Hz vorliegt. Schnellere und langsamere Änderungen dürfen deutlich größer sein. Für die Amplitudenänderungen gilt Bild 4.11d. Hier liegt die größte Empfindlichkeit des Ohres bei etwa 50 bis 200 Hz Änderungsfrequenz. Die Werte sind weiter von der Lautstärke und der übertragenen Frequenz abhängig. Bei manueller Änderung der Lautstärke soll meist das Klangbild erhalten bleiben. Infolge der unterschiedlichen „Steigung" der Kurven gleicher Lautheit (vgl. Bild 4.6 a u. b) ist es dann notwendig, auch den Frequenzgang zu ändern. Diese gehörrichtige Lautstärkeregelung zeigt Bild 4.11 e. Für die wahrnehmbaren Klirrkoeffizienten zweiter und dritter Ordnung gelten schließlich Bild 4.11f und g.

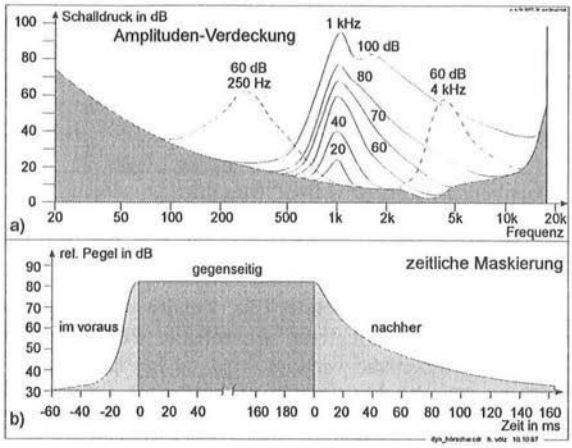


Bild 4.10 Zu den beiden Verdeckungseffekten

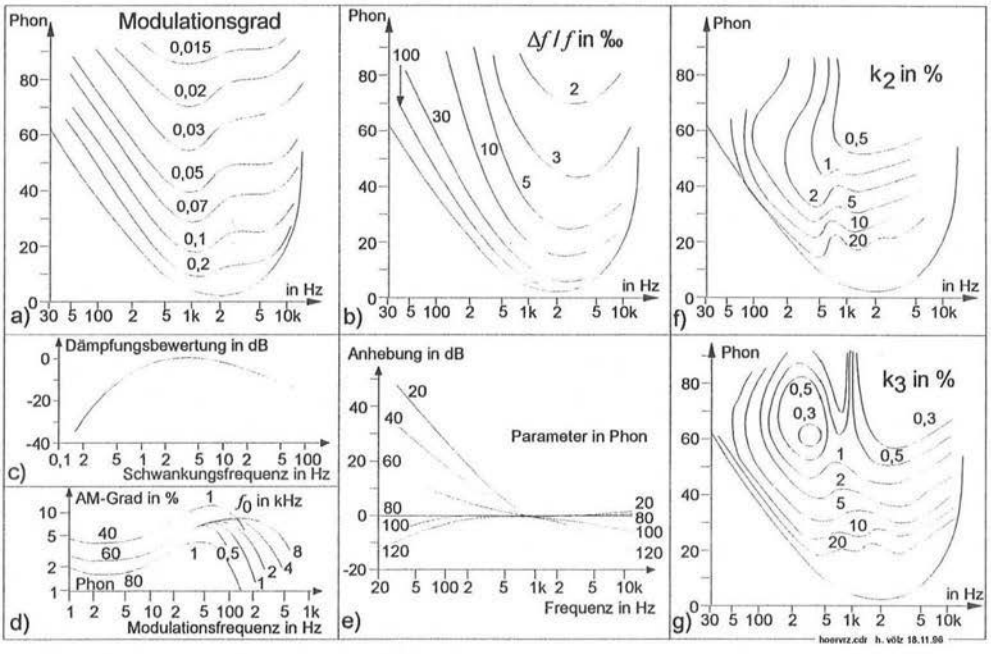


Bild 4.11 Empfindlichkeiten des Gehörs gegenüber Änderungen und Verzerrungen

Für die Beurteilung von Schall kennen wir Qualitätsmaßstäbe. Bei Sprache z. B. die Silbenverständlichkeit und für Musik die subjektive Qualität im Vergleich zum Original. Den Einfluß von Begrenzungen des Frequenzbereiches zeigt hierzu **Bild 4.12**. Bereits der Fernsprechkanal ermöglicht danach etwa 90 % Silbenverständlichkeit. Die wesentlichen Verluste sind durch die obere Grenzfrequenz gegeben. Bei Musik werden bereits mit 100 Hz als unterer Grenzfrequenz 90 % der Qualität erreicht. Dazu gehört eine obere Grenzfrequenz von 8 kHz. Zunächst sind bei Musik die Höhen wichtiger. Wenn heute aber immer mehr Baßwiedergabe verlangt wird, so hat das zwei Gründe. Einmal bereitet es keine Schwierigkeiten mehr, auch die allerhöchsten Frequenzen zu übertragen. Zum anderen sind oft die direkten Schalleinwirkungen auf das vegetative System wegen ihrer emotionalen Wirkungen wichtig geworden (z. B. Disco).

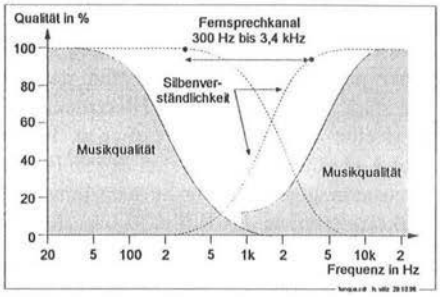


Bild 4.12 Zur Qualität von Schallübertragungen bei Bandbegrenzung

4.7 Richtungs-, Entfernungs- und Raumhören

Wir sind recht gut in der Lage, eine Schallquelle im Raum zu orten. Lange Zeit wurde angenommen, daß hierzu der Laufzeit- und Lautstärkeunterschied, ΔT_L bzw. ΔL, zwischen den beiden Ohren genügt (**Bild 4.13**b). Messungen ergeben dabei etwa die Werte von Bild 4.13a. Die Laufzeitdifferenz ist also praktisch unabhängig von der Frequenz. Die Intensitätsunterschiede sind dagegen frequenzabhängig und bei hohen Frequenzen infolge der Ohrmuschel auch leicht unsymmetrisch. Insgesamt können wir Pegelunterschiede bis herab zu 1 dB und Laufzeitunterschiede herab bis zu 30 µs für das Richtungshören nutzen. Bei einem Abstand der Ohren von ca. 20 cm ergibt sich eine maximale Laufzeitdifferenz vom fast 600 µs. Die erreichbare Auflösung liegt zwischen 3° und 8°. Vögel erreichen bis zu 1,5°, Fledermäuse noch kleinere Werte. Nach dieser einfachen Auffassung könnten wir aber nicht oben von unten, vorn von hinten unterscheiden. So sind in den letzten Jahren Ergänzungen hinzugekommen. Zum einen wurde die Form der Ohrmuschel einbezogen. Sie schirmt einmal den hinteren Schall stärker als den vorderen ab. Sie hat außerdem 2 Hautfalten. An ihnen finden bei höheren Frequenzen Reflexionen statt. Auffällig ist dabei, daß die zweite Falte erst beim Menschen auftritt und in einigen Populationen fehlt. Hierdurch konnte ihre Bedeutung zum Richtungs- und Entfernungshören aufgeklärt werden. Mit Spezialmikrophonen wurden am Eingang der Gehörgänge die Frequenzgänge des rechten und linken Ohres gemessen. Die Bilder 4.13d bis f zeigen sie für verschiedene Schallrichtungen. Sie sind schwer zu interpretieren, deuten aber die Vielfalt der Einflüsse an. Erst in den letzten Jahren wurde dann deutlich, daß ein weiterer Effekt für das Hören im Raum noch wichtiger ist. Der Schall dringt nämlich auch über die Nase in die zugehörigen Hohlräume ein. Von dort breitet er sich im Kopf vor allem über die Knochen zum Mittel- und Innenohr hin aus (Bild 4.13c). Hierdurch entsteht ein zusätzlicher Zeitunterschied ΔT_K. Die Schallgeschwindigkeit im Kopf beträgt etwa 680 m/s und ist somit deutlich größer als die in Luft mit ca. 340 m/s. Daher erreicht der von vorn kommende, über die Nase eindringende Schall das Gehör vor dem Luftschall am Ohr. Beim Schall von hinten ist die Reihenfolge umgekehrt. Der durch die Nase eindringende Schall ist dann sogar zweimal verzögert. Aus der Laufzeitdifferenz ΔT_L - ΔT_K kann so sogar die „Höhe" der Schallquelle erfaßt werden. Eine weitere Verbesserung der Richtungsbestimmung ermöglichen zusätzlich auftretende Intensitätsunterschiede. Experimentelle Untersuchungen zeigten weiter, daß für die Raumlokalisation sehr kurze Schallimpulse genügen. Es wird offensichtlich nur das Eintreffen der ersten Schallfront ausgewertet. Für eine technische Simulation ist zu beachten, daß alle Größen infolge der Kopfform und -größe sowie der Nase und deren Hohlräume recht individuell sind.

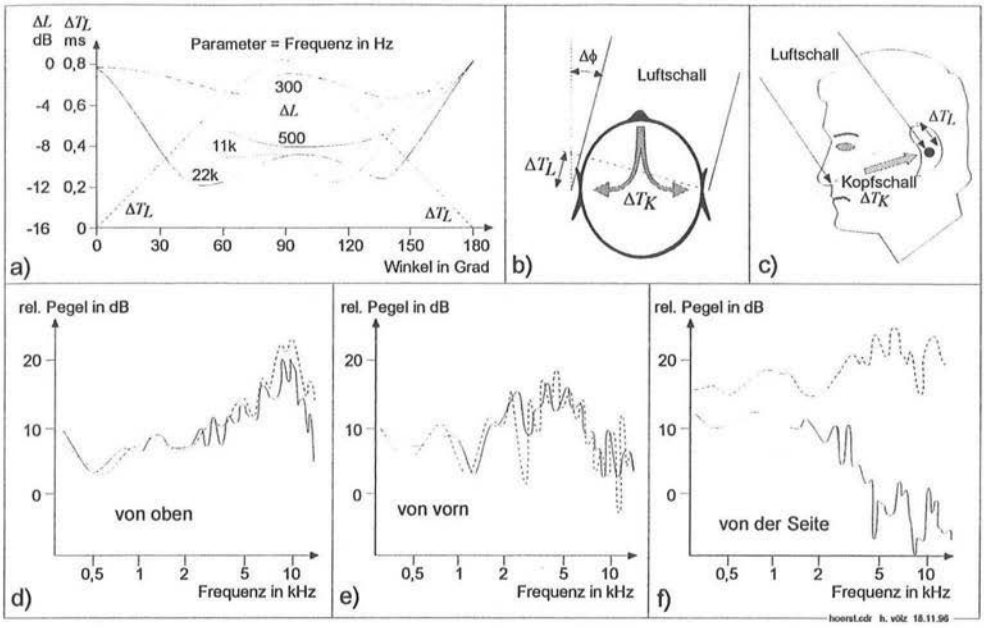


Bild 4.13 Zum Richtungshören: auch die Nase wirkt mit

In gewissem Umfange können wir auch die Entfernung einer Schallquelle einschätzen. Dieses Entfernungshören hängt eng mit dem Wahrnehmen von Nachhall (s. u.) zusammen. Hier konnte nachgewiesen werden, daß wir maximal 15 Stufen unterscheiden können. Zumindest muß sich der Nachhall um 2 dB im Hallabstand ändern.

4.8 Zur Raumakustik

Mit jedem Schall nehmen wir auch vielfältige, typische Eigenschaften des Raumes wahr. Sie sind vor allem durch Reflexionen an den Wänden, der Decke und an im Raum vorhandenen Objekten gegeben. Vereinfacht zeigt dies **Bild 4.14**a (nächste Seite). Von einem kurzen Schallimpuls ergibt sich so ein Intensitätsverlauf wie ihn Bild 4.14b zeigt. Zunächst erreicht uns der Direktschall. Er ist die erste Schallfront. Hiermit bestimmen wir die Richtung der Schallquelle. Dann folgen einige frühe, meist einmalige Reflexionen. Sie geben uns Auskunft über die Beschaffenheit und Geometrie des Raumes. Schließlich erreichen uns viele Mehrfachreflexionen, die ineinander übergehen und so ein diffuses Klangbild ergeben. Sie geben uns u. a. Aufschluß über die Raumgröße. Wie unterschiedlich solche Verläufe sein können, zeigen die Beispiele in Bild 4.14c. Sieht man vom Direktschall und den einzelnen frühen Reflexionen ab, so erfolgt das Abnehmen eines Schalls in guter Näherung exponentiell (Bild 4.14d). Besonders gut wird der Verlauf nach dem Abschalten eines länger anhaltenden Tones oder Geräusches erreicht. Hierauf beruht die Definition der Nachhallzeit. Bei ihr ist die Schallintensität auf $^1/_{1000}$-tel (-60 dB) der direkten Schallintensität abgeklungen. Zu ihrer Abschätzung werden die Wandfläche S_i und die zugehörigen Wandabsorptionskoeffizienten $\alpha_i \leq 1$ benötigt. Daraus kann die wirksame (totale) Absorptionsfläche bestimmt werden

$$A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i \cdot$$

Über das Raumvolumen V folgt mit der Sabine-schen Nachhallformel die Nachhallzeit zu

$$T[\mathrm{s}] = 0{,}161 \cdot [\mathrm{m}] \cdot V / A \cdot$$

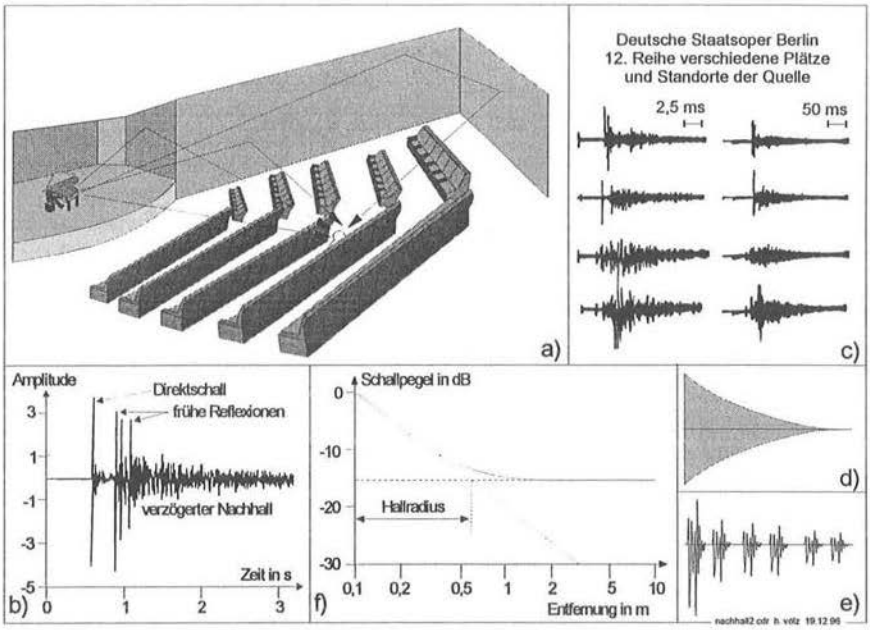


Bild 4.14 Zu Hallerscheinungen und zur Nachhallzeit eines Raumes

Zur einfachen subjektiven Abschätzung der Nachhallzeit klatscht man einmal kräftig in die Hände und wartet, bis der Schall verklungen ist. Für den geübten sind so auch grob andere Eigenschaften eines Raumes zu erkennen, z. B. das störende Flatterecho (Bild 4.14e). Hier werden die einzelnen Reflexionen deutlich einzeln nacheinander gehört. Für die Aufnahmetechnik ist der Hallradius eines Raumes wichtig. Hierbei wird vorausgesetzt, daß der direkte Schall etwa quadratisch | kubisch mit der Entfernung von der Schallquelle abnimmt (Bild 4.14f). Ursache ist die Absorption der Luft. Andererseits ist in relativ großer Entfernung von der Schallquelle der Schall überall gleich laut. Dort, wo beide Schallarten übereinstimmen, liegt der Hallradius. Nur innerhalb des Hallradius sind mit üblichen Mikrophonen gute Aufnahmen zu machen.

In der Praxis nehmen wir über hundert Reflexionen, wenn auch nur mittelbar, wahr. Mit der höheren Ordnung der Reflexionen wächst auch die Anzahl der Wege. Die einzelnen Schalle überlappen, addieren und interferieren daher. Hierbei gehen natürlich viele individuelle Merkmale des Raumes ein. So ist die Nachhallzeit zur Kennzeichnung eines Raumes sehr global. Deshalb werden weitere, vor allem subjektive Kennzeichen verwendet. Ein Raum mit sehr kurzer Nachhallzeit klingt „trokken", ihm fehlt „Atmosphäre", er klingt „kalt". Nur bei mittlerer Nachhallzeit erscheint er „warm". Besitzt ein Raum eine lange Nachhallzeit, so wirkt er hallig; es mangelt ihm an „Durchsichtigkeit". Für gute Sprachverständlichkeit muß die Nachhallzeit gering sein. Für jedes Musikgenre gibt es je nach Raumgröße optimale Nachhallzeiten. Die meist als typisch angenommenen Werte sind in **Bild 4.15**a zusammengefaßt. Die Nachhallzeit kann auch selektiv für einzelne Frequenzen bestimmt werden. Beispiele hierzu zeigt Bild 4.15b. Die beiden Kirchen besitzen eine beachtlich große Nachhallzeit, insbesondere bei tiefen und mittleren Frequenzen (wenig Luftabsorption). Die Studios sollen dagegen eine um 0,7 s für alle Frequenzen aufweisen. Auffällig ist es weiter, daß bei einem Musikgenre die aufgeführte Geschwindigkeit sich mit dem Nachhall ändert (Bild 4.15c).

Es gibt heute zwar mehrere Methoden zur Vorausbestimmung der Klangqualität von Räumen, z. B. mittels Messungen an Modellen. Dennoch ist herausragende Klangqualität immer noch eine be-

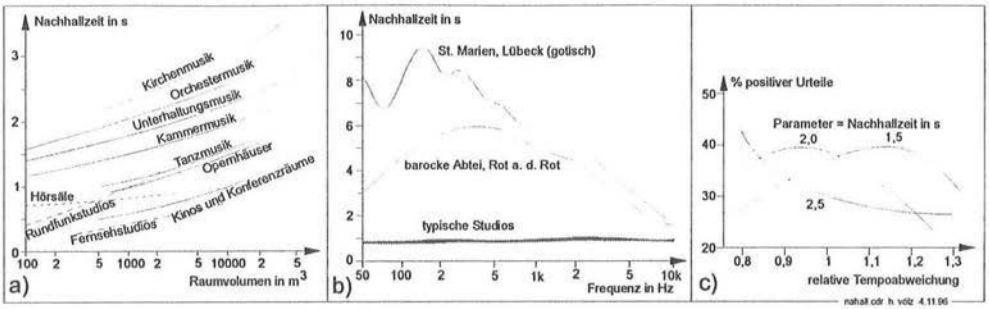


Bild 4.15 Typische | ausgewählte Nachhallzeiten und ihr Einfluß auf das Tempo einer Aufführung

sondere Leistung des Architekten. In der Praxis ist es folglich erforderlich, an dem fertiggestellten Raum akustische Korrekturen durch zusätzliche, nachträgliche Maßnahmen durchzuführen. U. a. erfolgt das durch den Einbau von Schallabsorbern und Schallreflektoren. Bei einer Übertragung aus zu trocknen Räumen kann man teilweise durch Hinzufügen von künstlichem Nachhall eine bessere Qualität bewirken. Zuviel Hall bei der Aufnahme ist dagegen bestenfalls durch Richtmikrophone zu reduzieren.

Für die akustische Meßtechnik wurden spezielle Räume entwickelt. Ein schalltoter Raum soll möglichst die Nachhallzeit Null besitzen. Dies wird, wie **Bild 4.16**a zeigt, durch eine extrem starke Absorption erreicht. Hierzu sind alle Wände, die Decke und der Fußboden mit Keilen aus Absorptionsmaterial vollständig belegt. Die Meßapparaturen werden auf einem im Raum ausgespannten, dünnen, weitmaschigen Drahtnetz aufgestellt. Im Freien (freien Schallfeld), wo fast keine reflektierende Hindernisse oder Wände existieren, ist die Nachhallzeit ebenfalls praktisch Null. Ein Hallraum soll dagegen eine Nachhallzeit von vielen Sekunden besitzen. Hierzu werden im Raum mit stark reflektierenden Wänden noch zusätzlich viele Reflektoren als Platten aufgehängt (Bild 4.16b).

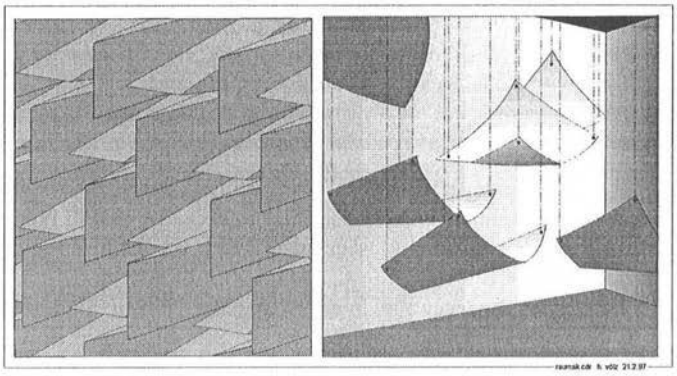


Bild 4.16 Schalltoter Raum (links) und Hallraum (rechts)

5 Weitere Sinne und Vergleich

Die Einteilung unsere Sinne – außer Sehen und Hören – erfolgt recht unterschiedlich. Dabei werden zuweilen auch für gleiche Wahrnehmungsqualitäten unterschiedliche Bezeichnungen benutzt. Die hier getroffene Wahl ist also nur eine von mehreren Möglichkeiten. Zum *Hautsinn* zählen vor allem der Tast- und Bewegungs- sowie der Temperatur- und Schmerzsinn. Die *chemischen Sinne* betreffen hauptsächlich das Riechen und Schmecken. Chemische Abläufe werten aber auch viele *Innensinne* (viscerale Sensibilität, Enterozeption) aus. Sie betreffen unsere inneren Organe, kennzeichnen also u. a. Hunger, Durst, Völlegefühl, Atemnot und Herzschmerz. Unser *Körpergefühl* (Körperbild) wird vor allem vom Tast-, Bewegungs-, Gleichgewichts- und Innensinn bestimmt. Der *Schmerzsinn* warnt uns vor inneren und äußeren Gefahren bzw. weist auf schon eingetretenen Schaden hin.

5.1 Mechanische Sinne

Die mechanischen Sinne (haptisch) bestehen hauptsächlich aus zwei Anteilen: Einerseits dem Tastsinn, auch Oberflächensensibilität bzw. Ektorezeption genannt. Seine Rezeptoren sind an und in der Hautoberfläche angesiedelt. Andererseits hat die Tiefensensibilität (Propriozeption, Kinästhetik) ihre Rezeptoren in und an den Muskeln, Sehnen und Gelenken. Durch sie erfahren wir die Haltung, Bewegung, Drehung und Beschleunigung unseres Körpers einschließlich der Extremitäten. Wesentlich für den Ganzheitseindruck ist auch der Gleichgewichtssinn. Mit dem Tastsinn, der die gesamte Körper*oberfläche* betrifft, be-greifen, er-tasten wir unsere Umwelt. Das **Bild 5.1** zeigt hierzu einige Möglichkeiten. Wir erkennen damit u. a. die Dinglichkeit der Umwelt. Notwendig sind dazu auch kombinierte, ausgewählte Muskelaktivitäten. Folglich erfordert dieses Erkennen die Mitwirkung des höheren Nervensystems. Zumindest teilweise stehen uns solche Aktivitäten von Geburt an zur Verfügung. Eine besonders perfekte Leistung vollbringen Blinde beim „Lesen" der Blindenschrift.

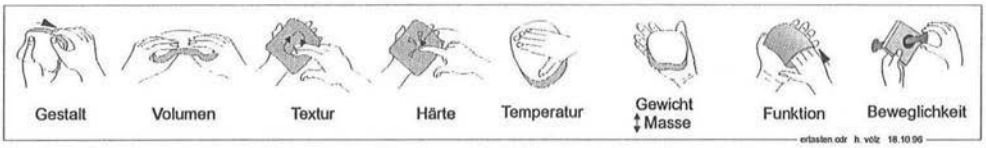


Bild 5.1 Möglichkeiten beim Er-Tasten der Umwelt

5.1.1 Hautsinn

Für den Hautsinn ist der Aufbau der Haut wesentlich. Sie besteht aus den folgenden drei Schichten:

- Die *Oberhaut* besteht aus verhornten, widerstandsfähigen Zellen. Sie enthält Pigmente und bietet Schutz gegen mechanische Beanspruchung. Abgenutzte Zellen werden hier von der Keimschicht ständig durch Neubildung ersetzt.
- Die *Lederhaut* ist ein straffes Bindegewebe, in das Blutgefäße, Nerven, Sinneszellen, Haarbälge sowie Drüsen (s. S. 79) zur Ausscheidung von Wasser und Salz eingelagert sind. Sie besitzt eine hohe Elastizität und dient der Wärmeregulierung.
- Die *Unterhaut* ist ein lockeres Bindegewebe mit Fetteinlagerungen. Sie enthält die Haarwurzeln und wirkt als Polster gegen Druck und Stoß sowie als Wärmeschutz.

Die Leistungsfähigkeit des Tastsinns läßt sich u. a. statisch über die örtliche (räumliche) Auflösung bestimmen. Hierzu wird mit zwei Zirkelspitzen (**Bild 5.2**) die Haut berührt und dabei festgestellt, ab wann die beiden Reize getrennt empfunden werden. Gemäß dem Bild ist diese *lokale Auflösung* (=

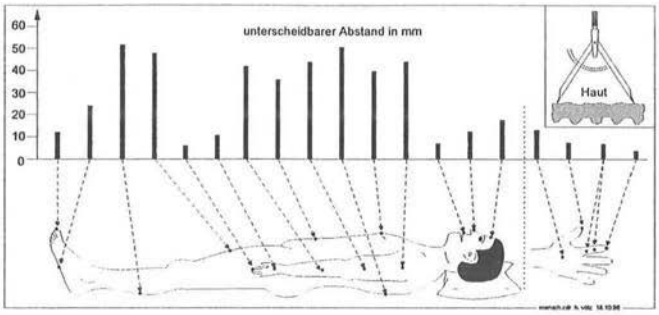


Bild 5.2 Typische Zweipunktschwellen des Menschen

simultane Raumschwelle = Zweipunktschwelle bzw. lokale Sensibilität) stark ortsabhängig. Ein Sensorkomplex erfaßt also ein typisches rezeptives Feld unterschiedlicher Größe. Eine andere Meßmethode ist die *Punktreizung*. Sie untersucht, ab welcher Energie wir einen Reiz wahrnehmen. In der rechts stehenden Tabelle gilt 1. = Zweipunktschwelle, 2. = Punktreizung und 3. = Vibration mit 1 cm^2 bei 200Hz. Bei der dritten Methode wird eine Sinusschwingung bestimmter Frequenz und Amplitude auf die Haut als Vibration übertragen. Durch Körperresonanz kann dabei für einige Frequenzen die Sensibilität deutlich erhöht werden. Beispiele für sitzende und stehende Haltung zeigt die nebenstehende Tabelle. Für den ganzen Körper liegt sitzend die Resonanz bei 4 - 7 Hz. Insgesamt ergeben sich Frequenzgänge, wie sie **Bild 5.3**a (nächste Seite) zeigt. Auffällig ist u. a. die hohe Empfindlichkeit bei etwa 300 Hz, also im unteren Hörbereich. Zum Vergleich sind für einige Tiere die Schwellen gestrichelt eingetragen. Für unsere Haut weisen die Abschnitte der Kurvenverläufe bei den tiefen Frequenzen – insbesondere ihre Steigung – auf unterschiedliche Sensoren hin. Sie werden deshalb in drei große Gruppen eingeteilt. Ihnen können spezielle Sensortypen zugeordnet werden:

Ort	1. mm	2. mg	3. µm
Zungenspitze	1		
Fingerspitze	2	40	0,07
Lippen	5		
Nasenspitze	7	5	5
Handfläche	10	80	0,07
Stirn	20	8	4
Handrücken	30		
Rücken	70	100	7

liegend	Hz	sitzend	Hz
Kopf	1 - 4	Wirbelsäule	3 - 5
Bauch	1,5 - 6	Magen	4 - 5
Fuß	1 - 3	Auge	20 - 25

- *SA-Sensor* (Slowly Adapting). Statischer Sensor mit etwa linearem Frequenzgang. Deshalb reagieren sie bevorzugt auf Druck. Nach einer schnellen Einschwingphase feuern sie solange, wie der Reiz anhält. Für sie gibt es zwei Typen: SA-I = Merkel-Zell-Komplex; SA-II-Sensor = Ruffini-Kolben.
- *RA-Sensor* (Rapidly Adapting). Dies sind Geschwindigkeitssensoren mit etwa linear steigender Empfindlichkeit zu höheren Frequenzen. Typisch hierfür ist der Meissnersche Zell-Axon-Komplex. Es handelt sich dabei im wesentlichen um Berührungssensoren, die sich schnell an den Reiz adaptieren. Deshalb merken wir z. B. nach kurzer Zeit unsere Kleidung nicht mehr.
- *Vater-Pacini-Körperchen.* Er besitzt eine quadratisch mit der Frequenz steigende Empfindlichkeit und reagiert daher im wesentlichen auf Beschleunigung. Besonders empfindlich ist er für Vibrationen.

Die Anordnung dieser Sinneszellen in der Haut und ihr Aussehen zeigt Bild 5.3b. Es gilt vorwiegend für die unbehaarte Haut. In der behaarten Haut gibt es nämlich kaum RA-Sensoren. Neben den Ruffini-Körperchen sind hier die Merkelzellen zu charakteristischen warzenähnlichen Hauterhebungen

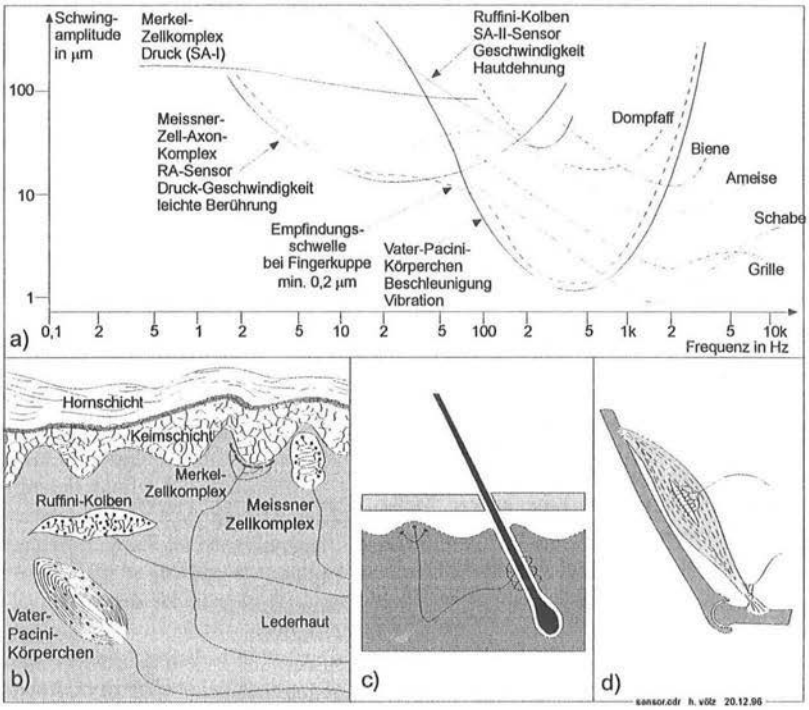


Bild 5.3 Frequenzgänge verschiedener Hautsensoren (a), Aufbau der Haut (b) sowie Sensor des Haares (c) und Sensoren im Muskel (d)

(Tastscheiben) mit etwa 0,5 mm Durchmesser zusammengefaßt. Die Funktion der RA-Sensoren wird von Haarfollikel-Sensoren übernommen, deren Aussehen Bild 5.3c andeutet. Sie reagieren auf leichte Berührung mit Verbiegung. Die Tasthaare erreichen durch die Hebelwirkung mit dem Drehpunkt in der verhornten Oberhaut eine recht hohe Empfindlichkeit. U. a. sprechen sie bereits auf Änderungen von etwa 5 % an. So können selbst Luftbewegungen durch sie wahrgenommen werden. Deshalb wird dann von einem Ferntastsinn im Gegensatz zum üblichen Nahtastsinn gesprochen.

5.1.2 Propriozeption

Die Propriozeption betrifft die Tiefensensorik, den Schwere- und den Kraftsinn sowie die für Bewegung zuständige Kinästhetik. Sie ist also kein einheitlicher Sinn, sondern integriert einmal Reizungen, die von den Muskeln, Sehnen (Golgi-Typ) und Gelenken weitergeleitet werden (Bild 5.3d). Außerdem berücksichtigt sie den Gleichgewichtssinn (s. S. 64) und teilweise Hautsensoren. Nur alles zusammen erzeugt unser Körpergefühl, das uns jederzeit, auch bei geschlossenen Augen, die Stellung (Lage), Bewegung und Drehung unseres Körpers und unserer Gliedmaßen vermittelt. Nur ein geringer Teil der damit zusammenhängenden Prozesse wird uns bewußt. Bei extremen Bewegungen werden auch die Schmerzrezeptoren einbezogen.

Insgesamt erreicht die Propriozeption eine beachtliche Genauigkeit. So nehmen wir bei den Schultergelenken noch Drehungen bis zu 0,2° und Geschwindigkeiten bis herab zu 0,3°/s wahr. Beim Fingergelenk sind es 1° und 12°/s. Der Kraftsinn ermöglicht es uns, Gewichte bzw. Kräfte in beiden Händen auf etwa 3 % Genauigkeit zu vergleichen. Diese Empfindlichkeit nimmt aber dann deutlich ab, wenn die Hände z. B. auf einem Tisch fest aufliegen.

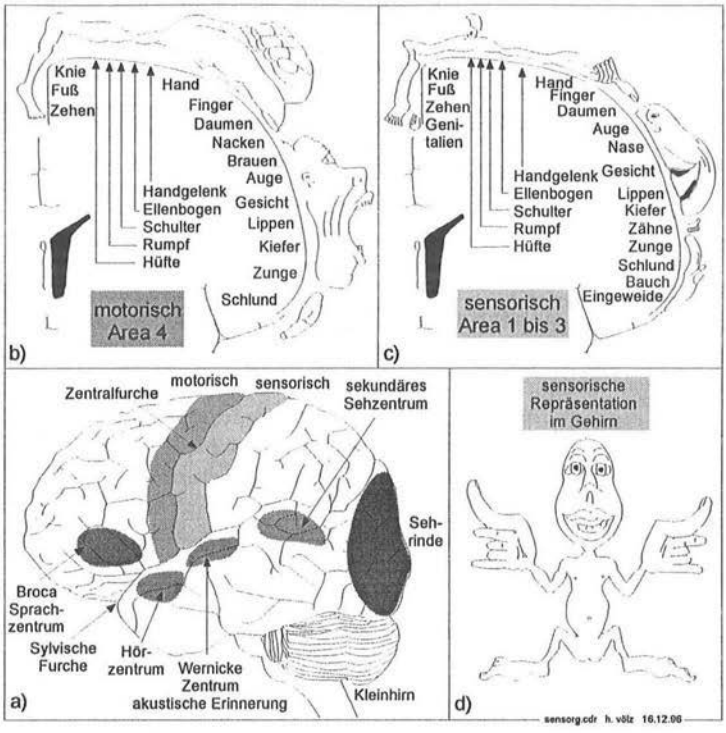


Bild 5.4 Die wichtigsten motorischen und sensorischen Zentren im Gehirn

In der virtuellen Realität bereitet die Propriorezeption oft Probleme. Wenn ich z. B. sitze, im Modell aber stehe bzw. mich bewege, entsteht leicht eine unangenehme kinästhetische Dissonanz. Auch beim Autofahren, auf einem Schiff oder beim Fliegen können Störungen auftreten. Die Seekrankheit und die bereits bei normalen Flügen auftretende Luftkrankheit beruhen zumindest z. T. auf sonst unüblichen Einwirkungen auf die Propriozeption. Bei Düsenjägern mit bis zu 10facher Erdbeschleunigung werden u. a. sogar beachtliche Sinnestäuschungen und arterieller Blutdruckabfall beobachtet. Noch komplexer sind die Auswirkungen infolge der Schwerelosigkeit bei der Raumfahrt.

5.1.3 Körperabbild im Gehirn

Unser Körper wird im Großhirn in der Umgebung der Zentralfurche recht präzise und nahezu eindeutig abgebildet. Wie **Bild 5.4**a zeigt, liegen dabei die motorischen Gebiete (Area 4) zur Stirnseite hin. Ihnen gegenüber befinden sich die sensorischen Gebiete (Area 1 bis 3). Bild 5.4a und b machen in einem dazu senkrechten Schnitt deutlich, wo und in welchem Umfang die einzelnen Organe abgebildet sind. Besonders viel Platz beanspruchen der Kopf und die Hände. Daher wird hier auch, wie auf S. 61 gezeigt wurde, die größte Auflösung erreicht. Wird das Gehirn an diesen sensorischen Stellen elektrisch gereizt, so haben wir den Eindruck, daß die entsprechende Körperstelle berührt wird. Übersetzt man die Größenverhältnisse der Sensorik von der Gehirnfläche auf ein „äquivalentes" Strichmännchen, so entsteht Bild 5.4d. Im motorischen Bereich ist die Verteilung jener der sensorischen ähnlich, jedoch sind noch stärker Kopf und Hand repräsentiert. Die Flächen entsprechen dann etwa der Anzahl der zugehörigen Muskeln zusätzlich der Feinheit ihrer Erregbarkeit. Reizt man diese Ge-

biete elektrisch, so treten die entsprechenden Muskeln selbst gegen unseren Willen in Aktion. In der letzten Zeit ist es sogar gelungen, ohne Sonden auszukommen. Mit speziellen schmetterlingsförmigen Magnetfeldern auf der Kopfhaut konnten mittels Induktion gleichartige Effekte erreicht werden. Hier deuten sich neue Möglichkeiten für die Virtuelle Realität und für Behinderte an.

5.2 Gleichgewicht

Unser Gleichgewichts- bzw. Vestibular-Organ befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Ohr (vgl. 4.1a u. b). Es ist entscheidend für unseren aufrechten Gang und ein zuverlässiges Stehen auf zwei Beinen. Normalerweise nehmen wir nichts von seiner Funktion wahr. Sobald aber Ausfälle auftreten, sind wird davon um so stärker betroffen. Wir erleben Unwohlsein, Schwindel, Übelkeit, Erbrechen, Schweißausbrüche, Pulsanstieg und Gangunsicherheit bis zur Unfähigkeit zum Gehen und Stehen. Es werden vielfältige, direkte Reflexe für unsere Körperhaltung und -bewegung und der Augenbewegung stark gestört.

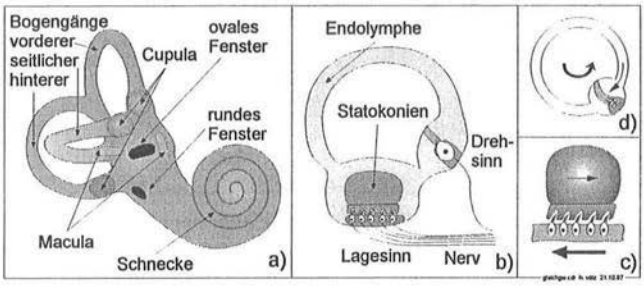


Bild 5.5 Ort, Aufbau und Funktion des Gleichgewichtsorgans

Das Gleichgewichtsorgan besteht aus mehreren Teilen, die sich in bzw. an den Bogengängen befinden. Sie enthalten die gleichen Lymphe (Flüssigkeit) wie die Schnecke des Ohres. In jedem der drei Bogengänge ist ein Cupula-Organ angeordnet, das Sinneszellen trägt. Außerdem existieren zwei Macula-Organe mit Sinneszellen (**Bild 5.5a**).

Die Macula utricula ist waagrecht angeordnet, so wie sie das Bild 5.5b zeigt. Über den 60 bis 80 Sinneshärchen der Nervenzellen und z. T. mit ihnen verwachsen, befindet sich eine gallertartige Masse, in der Kalziumkarbonatkristalle eingelagert sind. Sie sehen im Elektronenmikroskop wie Steine aus und werden daher Otolithen genannt. Dieser Block (Statokonie) ist schwerer als die Lymphe und reagiert daher auf seitliche Bewegungen (Bild 5.5c). Befindet sich der Kopf in Ruhe, so senden die Nervenzellen eine konstante, relativ hochfrequente Aktionsfolge aus. Je nach Bewegungsrichtung (Beschleunigung) wird diese Frequenz erhöht bzw. erniedrigt. Die Macula saculli ist senkrecht angeordnet und nimmt in analoger Weise Auf- bzw. Abbewegungen wahr. Beide Organe hängen daher stark von der Schwerkraft ab. Da sie bei der Schwerelosigkeit unwirksam werden, müssen Bewegungen auf optischem Wege erfaßt werden.

Die Cupulie befinden sich in den Bogengängen und versperren hier den Lymphfluß. Die Trennmembran enthält keine Kalziumkristallite und hat das gleiche Gewicht wie die Lymphe. Dadurch bewirken einfache Bewegungen keine Lageänderung der Membran. Erfolgt jedoch eine Drehung, so versucht die Lymphe, in Ruhe zu bleiben und wirkt dadurch auf die Membran verformend ein (Bild 5.5d). Die drei Cupulie stehen entsprechend den Bogengängen senkrecht aufeinander. So wird jede Drehung vektoriell in die drei Komponenten zerlegt. Die Empfindlichkeit ist dabei sehr hoch. Bereits Drehungen von 0,005°/s werden erfaßt.

5.3 Temperatur

Für die Wahrnehmung der Temperatur gibt es getrennte Kalt- und Warmsensoren. Sie liegen dicht unter der Hautoberfläche. Ihr Aufbau ist noch weitgehend ungeklärt. Zuweilen wird von Krauseschen Endkolben gesprochen. Andere Auffassungen nehmen ein Mitwirken der Ruffini-Körper an. Um die Funktion der Temperatursensoren festzustellen, fährt man mit einer kalten Metallspitze unter leich-

tem Druck über die Handfläche. Dabei wird nur an genau lokalisierbaren Kaltpunkten die Empfindung ausgelöst. Die Dichte der Kalt- und Warmpunkte (Anzahl der Thermo-Sensoren je cm^2) Hautfläche zeigt beispielhaft die nebenstehende Tabelle . Für die Wärmepunkte ist sie an den Finger- und Zehenspitzen, an der Nasenspitze und an den Ohrläppchen besonders hoch. Auf dem Rücken ist sie so gering, daß man ihn lokal stark erhitzen kann, ohne etwas zu bemerken. Erst wenn etwa 45 °C erreicht werden, reagieren die Schmerzrezeptoren. Das statische Verhalten der Kalt- und Warmsensoren zeigt **Bild 5.6a**. Die Kurven gelten nur für adaptierte Haut. Die entsprechende Temperatur muß also bereits einige Minuten bestehen. Beide Sensoren zeigen deutlich ausgeprägte Maxima in der Entladefrequenz bei etwa 28 °C bzw. 37 °C. Oberhalb von 45 °C und unterhalb von 17 °C geht das Wärme- bzw. Kälteempfinden in Schmerz über. Hier hört die Entladung der Thermosensoren auf. Zwischen 20 °C und 40 °C können wir eine Temperatur auf etwa 2 °C schätzen.

Ort	Kalt	Warm
Stirn	6	2
Nase	10	1
Mund	20	
Unterarm	7	0,3
Handfläche	5	0,4
Fingerrücken	8	2

Die Temperatursensoren sind stärker im Stamm- als im Großhirn repräsentiert und bewirken damit leicht Emotionen. Wärme und Kälte empfinden wir folglich betont angenehm bzw. unangenehm und nur bedingt objektiv. Deutlich sichtbar werden diese Effekte, wenn eine stark überhitzte bzw. unterkühlte Person ihre Hand für ca. 30 s in Wasser mit verschiedener Temperatur hält (vgl. Bild 5.5b). Das Gefühl sehr unangenehm wird dann in beiden Fällen an den Grenzen zum Schmerz erreicht. Es wird also das Gefühl auf den „Sollwert" des Körpers bezogen. Hierdurch erklärt sich z. B. das Frösteln bei Fieber.

Die Wahrnehmung von Änderungen der Temperatur hängt erheblich von der Geschwindigkeit ab. Erfolgt sie schneller als 0,1 °C/s, so registrieren wir bereits Änderungen von 0,1 °C. Bei Geschwindigkeiten kleiner als 5 °C/min erfolgt weitgehende Adaption. Befindet sich z. B. der Körper auf 33,5 °C und geschieht die Änderung mit -0,4 °C/min, so wird das Abnehmen der Temperatur erst nach 11 Minuten bemerkt. Dann sind aber bereits 29 °C erreicht. Dies dürfte eine Ursache für Erkältungen sein. Eine Zusammenfassung solcher Einflüsse für Änderungen mit 6°C/min zeigt Bild 5.6c. Das Wahrnehmen von Temperaturänderungen ist durch je eine *Warm-* und *Kaltschwelle* begrenzt. Unterhalb von etwa 31 °C liegt *Dauerkalt* (z. B. kalte Füße) auch dann vor, wenn sich die Temperatur nicht ändert. *Dauerwarm* gilt oberhalb von 36 °C. In beiden Bereichen ist zusätzlich „*kälter*" oder „*wärmer geworden*" wahrnehmbar. Im mittleren Temperaturbereich gibt es die *neutrale* Empfindung sowie „*warm*" bzw. „*kalt geworden*". Bereits im Bild 5.6b war zu erkennen – jetzt ist es noch deutlicher – eine Temperatur kann je nach den Umständen als neutral, warm oder kalt empfunden werden. Die geneigt verlaufende, strich-punktierte Linie für 32 °C mit Änderung weist dies aus.

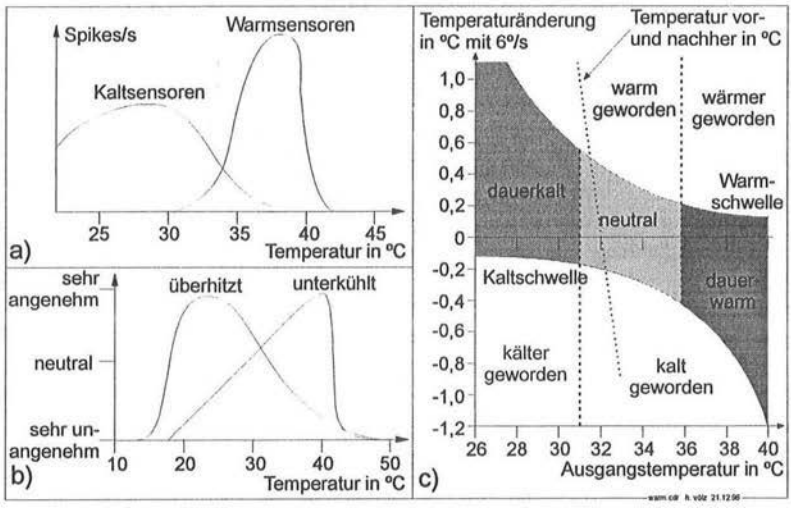


Bild 5.6 Zu den verschiedenen Wärme- und Kälteempfindungen

5.4 Schmerz

Schmerz zeigt uns primär eine Bedrohung unserer Organe von außen und|oder innen an. Er kann uns daher vor Schaden bewahren. Nur das Hirngewebe und das Leberparachym erzeugen kein Schmerzgefühl. Schmerz ist gleichermaßen unlustbetontes Gefühlserlebnis als Sinnesempfindung. Die Tiefe (Intensität) eines Schmerzes kann sehr verschieden groß sein. Weil Schmerz nur subjektiv empfunden werden kann, ist er überindividuell wenig reproduzierbar. Die Auswirkungen starker Schmerzen reichen bis zu Übelkeit, Erbrechen, Schweißausbruch und Blutdruckabfall. Schmerzen werden überwiegend so erlebt, als ob Gewebe zerstört wird. Unwichtig ist es dabei, ob das wirklich der Fall ist (z. B. Kopfschmerzen). Viele peripher ausgelöste Schmerzen sind in Reflexbahnen eingebunden. Noch bevor der Schmerz uns bewußt wird, erfolgt eine Reaktion, z. B. durch Zurückziehen der Hand bei einer Verbrennung. Die Vielfalt der Schmerzen macht eine Klassifikation schwierig. **Bild 5.7** ist lediglich ein Versuch.

Am besten untersucht ist der *Oberflächenschmerz*. Er ist zählt zu den Hautsinnen und ist ähnlich wie der Tast- und Temperatursinn durch genaue Punkte auf der Haut nachweisbar (Nocizeptoren). Sie liegen allerdings mit etwa hundert Sensoren je cm^2 wesentlich dichter (s. S. 65). Meist wird angenommen, daß freie Nervenendungen als Sensoren wirken. Schmerz ist nämlich durch vielfältige Reize (polymodal) – mechanisch, elektrisch, thermisch, osmotisch – auszulösen. Bei einem Nadelstich tritt zunächst „heller" Oberflächenschmerz auf, der sehr genau lokalisierbar ist. Nach etwa 1 s nimmt er einen dumpfen, brennenden und schwer lokalisierbaren Charakter an. Schmerz wird auch durch chemische Ausschüttungen bewirkt. Beispiele sind das Histamin von Mastzellen, das Serotin von Thrombozyten bei Hautbeschädigungen und|oder die proteolytischen Globuline bzw. Entzündungsmedidatoren.

Der *Tiefenschmerz* geht zumindest teilweise auf mechanische Sensoren zurück. Er ist immer dumpf, vielfach ziehend, bohrend oder krampfartig. Da er in die Umgebung ausstrahlt, ist er schwer lokalisierbar und wird teilweise sogar in andere Gebiete projiziert. Neben dem akuten Auftreten ist er zuweilen auch subakut oder chronisch.

Der (*viscerale*) Eingeweideschmerz geht weitgehend auf Dehnungs- und Durchblutungssensoren zurück. Der *chronische* Schmerz hängt nicht ursächlich mit einer Schädigung von Organen zusammen. Seine Lokalisation stimmt auch oft nicht mit dem wirklichen Entstehungort überein. Er kann

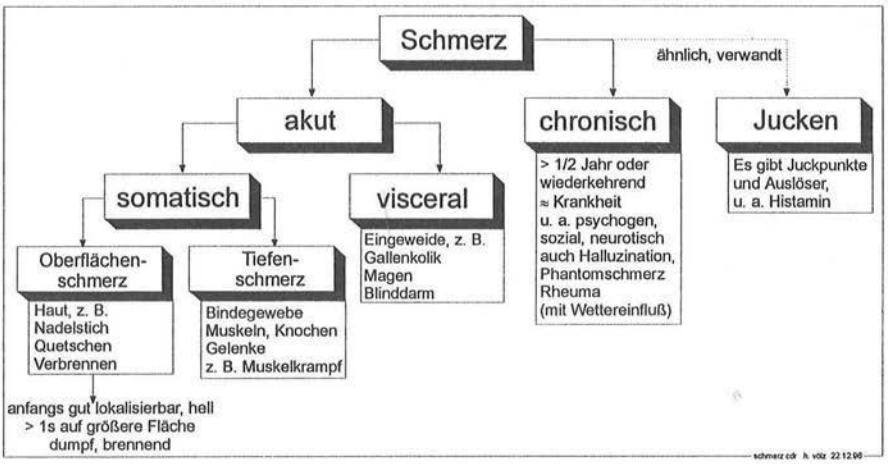


Bild 5.7 Versuch einer Klassifikation der unterschiedlichen Schmerzen

außerdem auch vielfältige psychologische Ursachen haben. Aus diesem Grunde ist seine Linderung zwar schwer realisierbar, aber dafür medizinisch meist sinnvoll und nützlich.

Verwandt mit dem Schmerz ist das Jucken. Es ist es auf genau definierte Hautpunkte begrenzt und kann teilweise durch Kratzen gelindert werden.

5.5 Innensinne

Die Innensinne betreffen die viscerale Sensibilität, auch Enterozeption genannt. Sie existieren in vielfältiger Abstufung und sind uns nur teilweise bzw. recht unbestimmt bewußt. Ein Großteil der Sensoren steuert lebenswichtige Regelungsvorgänge, u. a. den Kreislauf und die Verdauung. Gewahr wird dies uns nur bei Störungen. Ziemlich unbestimmte, schlecht lokalisierbare Gefühle und Befindlichkeiten, die z. T. schmerzähnlich sind, können die Atmung sowie der Wasser- und Elektrolythaushalt auslösen. Benennbare Gefühle betreffen die Dehnungssensoren des Magens, die chemischen Sensoren für die Glucoseverfügbarkeit und den Rückgang der Wärmeproduktion, also Hunger, Sättigung und Völlegefühl bis zur Übelkeit. Geringster Wassermangel im Gewebe – bei mehr als 0,5 % = 350 ml bei 70 kg – löst über Osmoserezeptoren Durst aus. Obwohl unser Körper zu 70 bis 75 % seines Gewichtes aus Wasser besteht, wird dieser Anteil auf ± 0,22 % konstant gehalten. Die vielfach im Mund wahrgenommene Trockenheit ist ein zugehöriges lokalisierbares Gefühl. Chemosensoren reagieren auf zu wenig Sauerstoff im Blut. Sie rufen die Atemnot hervor oder lassen uns den Herzschlag spüren. Irritationen im Hals oder in der Nase lösen den Husten- bzw. Niesreis aus. Dehnungssensoren in Hohlräumen, wie Blase oder Darm, erzeugen z. B. Harndrang oder regen die Darmtätigkeit an. Die Sensoren in der Niere, im Darm (bei starken Blähungen) bzw. in den Harnleitern können ebenfalls Schmerz auslösen.

5.6 Riechen

Jeder Mensch hat seinen spezifischen, genetisch determinierten Eigengeruch. Daher können selbst auf Geruch trainierte Tiere keine eineiigen Zwillinge unterscheiden. Bereits eine Organtransplantation bewirkt Änderungen. Durch diesen, für uns nicht wahrnehmbaren „Geruch" werden unbewußt Partnerwahl, Inzestschranke und Fehlgeburtsrate deutlich beeinflußt. Zusätzlich löst er merkliche Emotionen aus. Mittels der Kosmetik wird der Eigengeruch heute absichtlich durch künstliche Düfte überdeckt. Doch nicht nur der spezifische Körpergeruch wird bewußt manipuliert. In Supermärkten wird mit speziellen „Duftstoffen" versucht, die Kauflust anzuregen. Bei der Landung von Flugzeugen wird so eine Linderung der Angst angestrebt. Bei Lebensmitteln dienen Düfte zur Geschmacksverbesserung. Insgesamt hat sich so unser Riechen weit zurückgebildet. Es scheint aber auch nicht generell für das Überleben wichtig zu sein. So ist vielleicht zu erklären, daß wir z. B. Kohlenmonoxyd trotz seiner hohen Gefährlichkeit überhaupt nicht wahrnehmen können.

Für das wahrnehmbare Riechen ist das Riechepithel, die etwa 2×5 cm^2 große Riechschleimhaut, entscheidend. Sie befindet sich oben in der Nasenhöhle (**Bild 5.8a**, nächste Seite). Die rund $3 \cdot 10^7$ Riechsinneszellen sind dort mit Stützzellen fixiert. Ihre Axons gehen zu den Mitralzellen der Riechkolben in den Glomeruli (Bild 5.8b). Dabei wirken rund tausend Axons (Sinneszellen) auf eine Mitralzelle ein. Die etwa 50 000 Mitralzellen bilden den Riechnerv. Weiter gibt es Verkopplungen der Mitralzellen durch die Körnerzellen und die periglomerulären Zellen. Über diese Zellen wird die Empfindlichkeit der Mitralzellen verändert. Die Riechkolben sind eine direkte Ausstülpung des Großhirns (Bild 5.8c). Es erfolgen nur wenige neuronale Umschaltungen. Alle Riechzellen besitzen eine große Anzahl von Zilien, die in einer zähen Schleimflüssigkeit eingebettet und daher unbeweglich sind. Die Duftstoffe gelangen durch die Nase zur Riechschleimhaut (Bild 5.8a). Dort gehen sie in Lösung und lagern sich an die Zilien. So werden die „passenden" Sinneszellen erregt. Duftstoffe können auch vom Mund über den Rachen zur Schleimhaut gelangen. Dadurch ist Geschmack immer mit Geruch gekoppelt. Die mittlere Lebensdauer der Riechzellen beträgt etwa einen Monat. Danach sterben sie ab und werden aus Basalzellen neu gebildet.

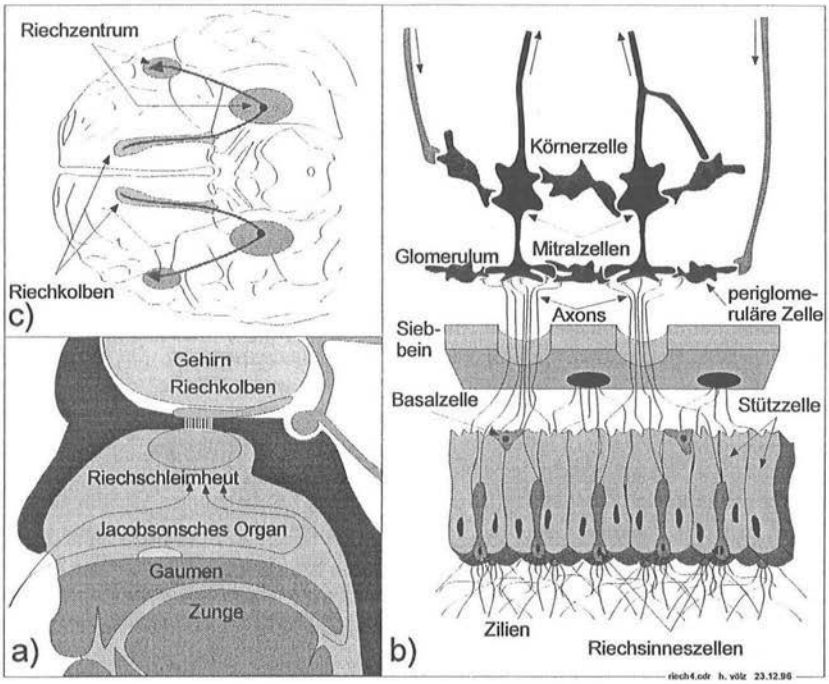


Bild 5.8 Grundstrukturen des Riechens

In der Riechschleimhaut liegen auch freie Endungen des Trigeminus. Sie reagieren auf Stoffe wie Chlor, Ammoniak und Salzsäure, die eine stechende, beißende Empfindung auslösen. Ferner hat es sich erst in der letzten Zeit bestätigt, daß es auch beim Menschen das Jacobsonsche Organ gibt (Bild 5.4a). Es wird auch Vomeronasal-Organ genannt und liegt oberhalb des Gaumens. Es ist für die o. g., nicht zum Bewußtsein gelangenden „Gerüche" verantwortlich.

Der Unterschied für die Wahrnehmungsschwelle (da ist *ein* Geruch) und für die Erkennungsschwelle (da ist *dieser* Geruch) ist beim Riechen mit 1:10 relativ groß. Die menschliche Nase ist nur für wenige Stoffe so hoch empfindlich, daß bereits 10^7 Moleküle/cm^3 Luft genügen (vgl. nebenstehende Tabelle). Die Schwelle beim Hund liegt bereits bei 1000 und bei Schmetterlingen bei 100 Molekülen/cm^3. Dabei ist die Riechfläche des Hundes mit 85 cm^2 gegenüber 10 beim Menschen nur etwa 10mal so groß. Für die Rezeptorenzahl $3 \cdot 10^8$ gilt gleiches. Erst bei 25 % Änderung treten wahrnehmbare Intensitätsunterschiede auf. Das ist hundertmal gröber als beim Hören. Viele Schwellen hängen erheblich vom Allgemeinzustand ab. So senkt Hunger die Schwelle für entsprechende Duftstoffe, während Sattheit sie signifikant steigen läßt. Andere Einflüsse werden durch Schwangerschaft und Menstruation bewirkt. Mit dem Alter verschlechtert sich generell das Riechvermögen.

Stoff	µg/Liter
Methylmercaptan	0,00005
Moschus	0,04
Essigsäure	1
Pfefferminzöl	20
Chloroform	3500

Allgemein wird angenommen, das wir etwa 10 000 Gerüche unterscheiden. Meist wird noch das 1952 von Amoore vorgeschlagene Schema aus 7 typischen Geruchsklassen akzeptiert (Tabelle gegenüber oben). Hierbei wird für jede Duftklasse ein „Leitduft" angegeben, dem die anderen ähnlich sind. Andere Autoren wählen abweichende Einteilungen, z. B. blumig, würzig, brenzlig, fruchtig,

Primärgeruch	Chemische Substanz	Trivialsubstanz
Campherartig	Campher	Mottenpulver
moschusartig	ω-Hydroxy-pentadecan-säurelacton	Angelikawurzelöl
blumig	Phenylethyl-methyl-ethyl-carbinol	Rose
minzig	Menthon	Pfefferminzbonbon
ätherisch	Ethylen-dichlorid	Birnen, Fleckenwasser
stechend	Ameisensäure	Essig
faulig	Butyl-mercaptan	faule Eier, H_2S

ätherisch und faulig. Mit steigender Konzentration kann sich die Duftqualität ändern. So riecht z. B. Ionon in geringer Konzentration nach Veilchen und in hoher nach Holz. Riechen besitzt eine beachtliche Adaption. So wird z. B. selbst starker Zigarettenrauch nach geraumer Zeit (Minutenbereich) nicht mehr gerochen. Da sich aber die Impulsfrequenz der Sinneszellen bereits in Sekunden einstellt, muß die empfundene Adaption durch die Rückkopplung und auf höherer Nervenebene erfolgen. Das Abklingen einer Adaption dauert meist sogar Stunden. Eine Adaption ist meist so spezifisch, daß für andere Substanzen die Empfindlichkeit erhalten bleibt. Selbst bei voller Rauchadaption können wir z. B. auch schwachen Kaffeegeruch gut wahrnehmen. Einige Gerüche sind prinzipiell nicht adaptierbar. So bestimmbare Duftklassen stimmen nur z. T. mit den Klassen nach Amoore überein. Zuweilen vorhandene Geruchs-„blindheiten" (partielle Anosmien) decken sich aber mit seinen Klassen. Die nebenstehende Tabelle gibt einen Überblick.

Anosmie gegenüber	Haupt-Duft-komponente	Häufigkeit in der Bevölkerung
Urin	Androstenon	40 %
Malz	Isobutanal	36 %
Kampfer	1,8-Cineol	33 %
Sperma	1-Pyrrolin	20 %
Moschus	Pentadecanolid	7 %
Fisch	Trimethylamin	7 %
Schweiß	Isovaleriansäure	2 %

In den letzten Jahren konnten einige weitere Fakten zum Riechen aufgeklärt werden. So ist jetzt sicher, daß es etwa 10 000 genetisch differenzierte Geruchszellen gibt. Jede ist – eventuell ähnlich dem Immunsystem – für ausgewählte chemische Verbindungsgruppen sensibel. Die Anpassung liegt in den Zilien. Alle Sinneszellen eines Typs gehen mit ihrem Axion zu einem, höchstens zu zwei Glomeruli, die zudem an genau definierten Orten auf dem Riechkolben liegen. Da die meisten Duftstoffe kompliziert aufgebaut sind, verfügen sie über mehrere Möglichkeiten, sich an die 10 000 verschiedenen Sinneszellen zu koppeln. So könnte prinzipiell eine gewaltige Anzahl von Geruchsmustern entstehen. Sie wird aber offensichtlich durch die chemischen Möglichkeiten und vielleicht auch durch neuronale Verarbeitung auf die etwa 10 000 Gerüche eingeschränkt.

5.7 Schmecken

Schmecken hat zunächst zwei wichtige biologische Aufgaben:

- Prüfung der Nahrung auf unverdauliche oder giftige Stoffe und
- reflektorische Steuerung der Sekretion von Verdauungssäften.

Der Geschmack ist immer mit Emotionen gekoppelt. Dafür sprechen auch Aussagen, wie „sauer ausschauen", „bittere Mine machen", „süß-saures Lächeln" usw. Da solche Gesichtsausdrücke schon beim Säugling gut zu erkennen sind und z. T. selbst bei Tieren auftreten, liegt offensichtlich eine recht alte genetische Fixierung vor. Weiter ist bekannt, daß die Geschmacksknospen bereits beim 8 Wochen alten menschlichen Embryo vorhanden sind. Allgemein werden heute vier Geschmacksqualitäten, nämlich süß, salzig, sauer und bitter, unterschieden. Diskutiert wird noch ein alkalischer oder metallischer Geschmack. Die Japaner vermuten außerdem eine Geschmacksempfindung für Glutamat (Natriumsalz mit der Aminosäure Glutamin = Umanmi-Geschmack).

Mit den wenigen Geschmacksqualitäten kann nicht das Wahrnehmungsvermögen eines Gourmets erklärt werden. Doch offensichtlich (s. o.) wirkt für den Feinschmecker wesentlich der Geruch mit. In der nebenstehenden Tabelle sind Schwellen für einige typische Geschmacksstoffe nach Masse | Konzentration zuammengestellt.

Qualität	Substanz	Mol/l	Substanz	g/l
Süß	Saccharose	0,01	Saccharin	0,001
	Saccharin	$2 \cdot 10^{-5}$		
Sauer	Salzsäure	$9 \cdot 10^{-4}$	Salzsäure	0,01
	Zitronensäure	$2 \cdot 10^{-3}$		
Salzig	NaCl	0,01	Kochsalz	1
	$CaCl_2$	0,01		
Bitter	Chininsulfat	$8 \cdot 10^{-6}$	Chinin	0,004
	Nicotin	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$		

Noch stärker als der Geruch adaptiert vielfach der Geschmack. Für eine 5%ige Kochsalzlösung tritt die volle Adaption bereits nach 8 s ein. Die Erholungszeit hängt von vielen Umständen ab. Bei einigen Bitterstoffen sind sogar mehrere Stunden möglich. Negativ wirken sich u. a. Kaffee und Nikotin aus. Weiter beeinflussen sich verschiedene Geschmacksstoffe gegenseitig. So gibt es pflanzliche Stoffe (Kaliumgynemat), welche die Zuckerwahrnehmung aufheben. Er schmeckt dann wie Sand. Bei Cocain auf der Zunge fallen folgende Empfindungen nacheinander aus: Bitter, süß, salzig und schließlich auch sauer. Insgesamt nimmt die Leistungsfähigkeit des Geschmacksapparates deutlich mit dem Alter ab.

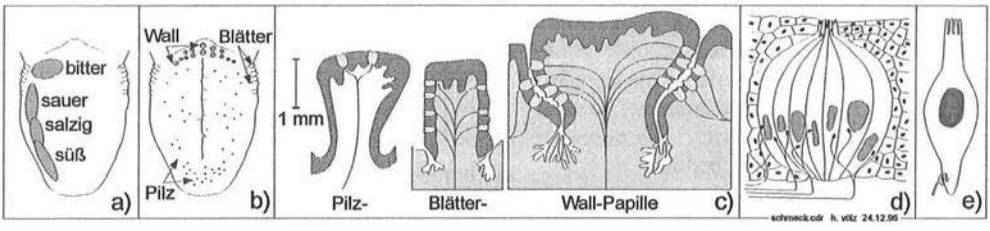


Bild 5.9 Zunge (a, b), Geschmacksknospen (c) und Geschmackszellen (d, e)

Bis vor einiger Zeit war man überzeugt, daß die vier Geschmacksrichtungen an unterschiedlichen Orten der Zuge liegen (**Bild 5.9a**) Das ist heute nur noch für bitter aufrechtzuerhalten. Es wird unmittelbar am Zungengrund wahrgenommen. Ganz in der Nähe liegt ein Areal, daß den Würgereiz auslöst. Diese Kopplung kann durchaus lebensrettend sein. Für die anderen Geschmacksrichtungen ist die Zunge mit einer Toleranz um 10 % überall etwa gleich empfindlich.

Auf der Zungenoberfläche befinden sich vier Papillentypen mit geringer (≤ 1mm) Erhöhung. Die drei typischen Geschmacksknospen zeigt Bild 5.9c. Ihre Anzahl weist die Tabelle (oben, rechte Seite) aus. Für die Blätterpapille und noch mehr für die Wallpapille sind die nach unten weisenden Feuchtigkeitskanäle typisch. Jede Geschmacksknospe enthält gemäß Bild 5.9d etwa 10 bis 50 Sensorzellen. Sie sind etwa 70 µm hoch, 40 µm dick und besitzen an ihrer Spitze mehrere Mikrovilli (Bild 5.9e). Sie besitzen kein Axon, sondern werden von einer Nervenfaser versorgt. Ihre Lebensdauer beträgt ca. 1 Woche. Danach werden sie, ähnlich wie die Geruchszellen, aus Basalzellen neu gebildet. Jede Geschmacksknospe ist oben etwas vertieft. Dort kann sich Flüssigkeit halten. Hier ragen die Mikrovilli der Sensorzellen hinein. Die darauf befindlichen Membranen sind für die Reizaufnahme zuständig. Es ist noch unklar, ob jede Zelle durch alle vier Geschmacksrichtungen angeregt werden kann oder ob es Spezialisierungen gibt. Die Ableitung von Aktionsströmen brachte bisher nur sehr komplexe Muster zu Tage. Daher ist anzunehmen, daß die eigentliche Geschmacksdifferenzierung erst auf relativ hoher Nervenebene erfolgt. Ergänzt werden die Geschackssinneszellen auf der Zunge noch durch einige wenige im Gaumen-Rachenbereich.

Name	Ort	Anzahl	Knospen
Pilzpapillen	überall auf der Zunge	150 - 400	100
Blätterpapillen	hinterer Seitenrand	15 - 80	50
Wallpapillen	v-förmig, hinten, Zungenrand	7 - 12	3 - 4
Fadenpapillen	überall		keine

Für den *sauren* Geschmack ist wahrscheinlich die Ionenkonzentration von H^+ wesentlich. Je vollständiger eine Säure dissoziiert, desto saurer wird sie wahrgenommen. Außerdem reduziert Lauge je nach ihrer Neutralisationswirkung den Geschmack sauer.

Salzig tritt meist dann auf, wenn kristalline wasserlösliche Salze in Kationen und Anionen dissoziieren. Dabei läßt sich sogar eine Rangfolge der „Salzigkeit" angeben:

$$NH_4 > K > Ca > Na > Li > Mg \text{ und } SO_4 > Cl > Br > J > HCO_3 > NO_3.$$

Substanzen für den *Bitter*-Geschmack sind sehr vielfältig. Es ist keine gemeinsame Grundstruktur zu erkennen. Die extrem hohe Empfindlichkeit für Bittergeschmack erklärt die biologische Wichtigkeit. Viele Bitterstoffe, wie Strichnin, Chinin oder Nikotin sind mit hoher Toxizität gekoppelt. Geringe Mengen (Magenbitter) können aber durchaus geschmacksverbessernd und förderlich sein.

Die Geschmacksqualität *Süß* besitzt die größte Variabilität. Während Zucker erst bei recht hoher Konzentration süß (Schwelle 0,2 g/l) schmeckt, gibt es inzwischen viele Substanzen mit extrem verstärkter Wirkung (100- bis 1000-mal).

5.8 Vergleich der Sinne

Leistungsvergleiche der verschiedenen Sinnesorgane wurden mehrfach versucht. Sie geben meist nur subjektive Auffassungen der Autoren wieder und streuen daher beachtlich. Sie sind deshalb so schwierig, weil dadurch wichtige Spezifika der Sinne weitgehend verloren gehen. Schließlich hat jeder Sinn mehrere Ausprägungen (obere, nebenstehende Tabelle). Natürlich gibt es auch einige objektive Kriterien, z. B. in Form der energetischen Wahrnehmungsschwellen (untere, nebenstehende Tabelle). Sie sind auf die absorbierte Leistung bezogen und berücksichtigen daher nicht die Absorptionsfläche. Wird die Leistungsdichte verwendet, so gilt etwa **Bild 5.10**. Während bei der Leistung das Ohr empfindlicher ist, gilt das hier für das Auge. Das Bild macht deutlich, in welchem relativ geringen Frequenzbereich das Auge im Vergleich zum Ohr und zur Vibration empfindlich ist. Dies wird offensichtlich zumindest dadurch ausgeglichen, daß wir flächige und räumliche Bilder sehen können, während beim Hören vor allem der

Sehen	Hören	Fühlen	Riechen
Helligkeit	Tonhöhe	Temperatur	Aroma
Farbton	Lautstärke	Druck	Intensität
Sättigung	Klang	Vibration	Essenz
Gestalt	Rhythmus	Textur	Gefühl
Oberfläche	Melodie	Form	

Sinn	Leistung, Konzentration
Berührung	10^{-8} W
Ohr	$8 \cdot 10^{-18}$ W
Auge	$5 \cdot 10^{-17}$ W
Geruch	$5 \cdot 10^{-14}$ g/cm^3 bei Merkaptan
Geschmack	10^{-6} g/cm^3 bei Saccharin
Schmerzen	$5 \cdot 10^{-16}$ W/cm^2

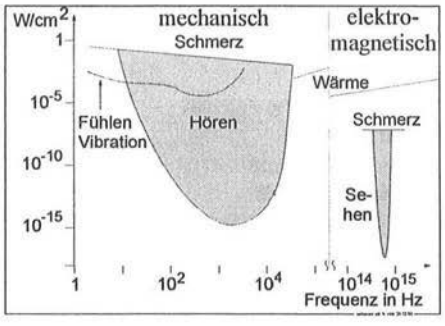


Bild 5.10 Vergleich von Hören und Sehen

Zeitverlauf wesentlich ist. Außerdem können wir viel mehr Klangkombinationen als Farben unterscheiden. In diesem Zusammenhang ist auch die Anzahl der Sinneszellen und der zum Gehirn führenden Fasern interessant (nebenstehende Tabelle). Bei allen Sinnesorganen – mit Ausnahme vom Ohr – existiert eine hohe Konvergenz. Hinzu kommt, daß die Erregungen des Ohres die meisten Neuronenverschaltungen durchlaufen. Als letzter Vergleich sei noch die Sensordichte je cm^2 Hautoberfläche angeführt (unten stehende Tabelle).

Sinn	Rezeptoren	Fasern
Auge	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^6$
Ohr	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
Geschmack	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^3$
Geruch	$3 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^4$
Druck	$5 \cdot 10^5$	10^4
Schmerz	$3 \cdot 10^6$	10^6
Wärme	$1 \cdot 10^4$	?
Kälte	$1 \cdot 10^5$	?

Ort	Wärme	Kälte	Druck	Schmerz
Gesicht	2	8	50	180
Nasenspitze	1	13	100	45
Oberkörper	0,3	10	30	200
Vorderarm, innen	0,4	6	15	200

Ein völlig anderer Zugang zu den nutzbaren Sinnesleitungen stammt aus der Ergonomik. Hier wird u. a. bestimmt, wieviel Zeichen, Symbole und Qualitäten der Mensch (mental) unterscheiden kann. Da diese Zahlen im Zusammenhang mit der Gestaltung von großen Überwachungseinrichtungen gewonnen wurden, sind sie unter anderen Bedingungen mit Vorsicht zu benutzen. Die nebenstehende Tabelle gibt einen groben Überblick. In den Klammern stehen empfohlene Richtwerte für unterscheidbare Stufen bei verschiedenen Sinneswahrnehmungen. Empfohlene Abmessungen von Zeichen und Symbolen auf einem Display faßt die unten stehende Tabelle zusammen.

Sehen	
Zeigerstellung	15
Größe	7 (2 ... 3)
Farbton	9
Helligkeit	5 (2 ... 3)
Sättigung	11 ... 15 (5 ... 8)
Alles kombiniert	17
Hören	
Tonhöhe	5
Lautstärke	5
Alle Parameter zusammen	150
Riechen	
Art, Intensität, Anzahl	16
Alle Sinne komplex	10^3 ... 10^6

Zeichenart	Anzahl, Menge
Strichzeichnungen	0,4' ... l' Blickwinkel; 2 ... 4.10^3 Punkte auf 25 ... 30°
Höhe optimaler Zeichen	10' ... 20'
Einzelpunkte	2' ... 3'
Zeilenzahl bei Rasterdisplays	5 × 7 oder 7 × 9 Rasterpunkte
Strichdicke	10% bis 15% der Rasterbreite (2 ... 3 Arten)
Zeichenzahl, verteilt auf etwa	80 ... 100×30 ... 50; 30° horizontal und 20° vertikal
Komplexe Symbole	20' ... 40'
Abstand von Skalenstrichen	10' ... 15'
Skalenlänge	3° ... 5°
Alphanumerische Zeichen	ca. 64
Schrifttypen	1 ... 3
Abstrakte Symbole	10 ... 20
Bildhafte Symbole	200 ... 1000
Gruppierungen von Symbolen	2 ... 5
Symbolgröße	2' ... 3'

6 Aktivitäten des Menschen

6.1 Die Muskeln

Bewegung ist ein wesentliches Kennzeichen des Lebens. Sie wird primitiv bei den Amöben, effektiver bei Geißeltierchen verwirklicht. Besonders leistungsfähig sind jedoch die später entstandenen Muskelzellen. Von ihnen werden drei Arten unterschieden: Skelettmuskel, glatter Muskel und Herzmuskel. Der Schwerpunkt der folgenden Beschreibung liegt auf den über vierhundert Skelettmuskeln des Menschen, die rund 40 % unseres Körpergewichts ergeben. Ein Muskel besteht aus 80 % Wasser ($^1/_4$ davon in Zwischenräumen), 16 % Strukturproteinen und 4 % gelösten Proteinen. Die Hälfte der Proteine (10 % der Gesamtmasse) sind kontraktil und bestehen aus 35 % Myosin, 15 % Aktin und 10 % Tropomyosin-Troponin. Das Myosin-Molekül hat einen langen Schwanz und einen dichten Kopf (**Bild 6.1**a, ganz unten). Die Molekulargewichte der Teile betragen 350 000 und 150 000. Das Aktin-Molekül mit einem Molekulargewicht von 42 000 ist kugelförmig. Der chemisch-mechanische Wirkungsgrad von Muskeln liegt bei 20 bis 25 %.

Jeder Muskel wird von drei Systemen versorgt: Arterien bringen Sauerstoff und Nährstoffe; Venen bewirken den Abtransport von Metaboliten und Wärme; Nerven erregen den Muskel und geben Aussagen über seinen Zustand (Dehnung und Belastung) zurück. Aktiv können sich Muskeln nur verkürzen. Daher wirken zumindest immer zwei Muskeln – Synergist und Antagonist – in die entgegengesetzten Richtungen. Jede Aktivität eines Muskels ruft elektrische Potentiale hervor, die als EMG (Elektro-Myogramm) mit etwa 1 mV abgeleitet werden können.

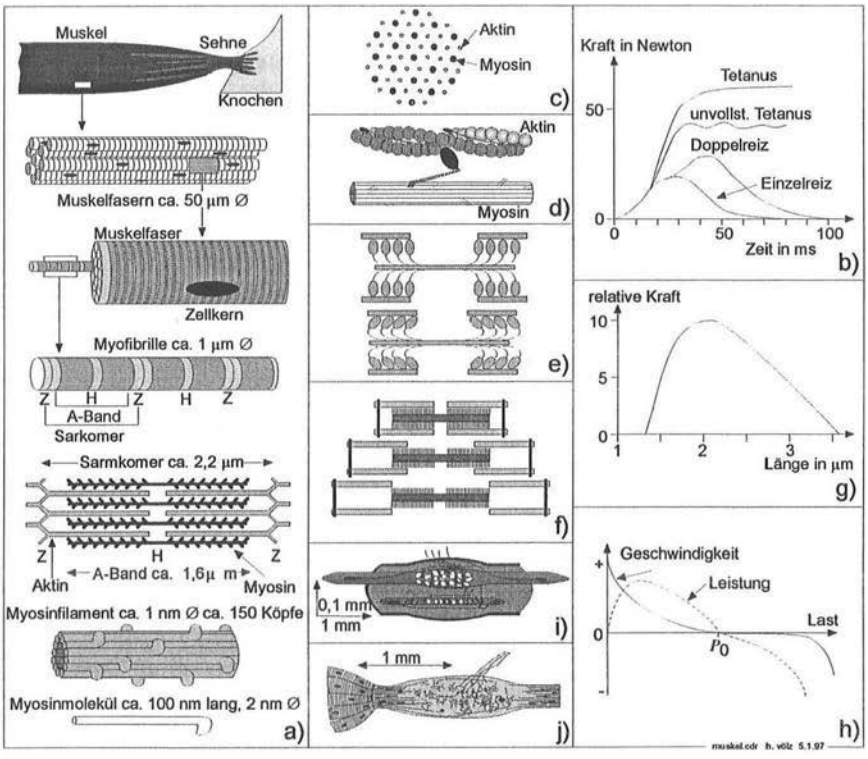


Bild 6.1 Aufbau, Eigenschaften und Leistungen von Skelettmuskeln

Gewöhnlich ist ein Muskel mit einer Sehne an einem Knochen befestigt (Bild 6.1a, oben). Er setzt sich aus einer Vielzahl von Muskelfasern mit jeweils mehreren Zellkernen zusammen. Zusammengehalten wird die Muskelfaser von einem Sarkolemm. Muskelfasern können eine Länge von mehreren cm erreichen. Ihr Durchmesser liegt zwischen 10 und 100 µm Dicke. Ein Nerv innerviert immer mehrere Muskelfasern; von zehn bei den äußeren Augenmuskeln bis zu über tausend bei der Rückenmuskulatur. Ein Nerv und mehrere Muskelfasern bilden folglich eine motorische Einheit. Entsprechend dem Alles-oder-Nichts-Gesetz kann sie nur aktiviert oder nicht aktiviert sein. Die Leistung eines Muskels wird daher entweder durch Erregung unterschiedlich vieler motorischer Einheiten oder durch eine unterschiedlich dichte Folge der Erregungen bewirkt. Ein Einzelreiz läßt die motorische Einheit für etwa 50 ms zucken (Bild 6.1b). Durch Wiederholung der Reizung kann eine höhere Kontraktion erreicht werden. Das Maximum – vollständiger Tetanus – tritt mit etwa 30 Reizen/s auf. Etwa 8 Reize/s bewirken einen unvollständigen Tetanus. Die einzelnen Nervenimpulse entsprechen also nicht der Bewegung von Muskeln. Hier muß der Antagonist mitwirken. Die schnellste Hin-und-her-Bewegung gibt es bei den Fingern mit etwa 8 Hz. Muskeln können außerdem ermüden, in der Leistung nachlassen. Im physiologischen Fall ermüden jedoch zuerst die Neuronen im Gehirn, dann folgt die motorische Endplatte (kein Transmitter, Synapse) und erst zuletzt der Muskel selbst.

Eine Muskelfaser besteht aus vielen Myofibrillen, die jeweils aus mehreren, in Reihe liegenden Sarkomeren aufgebaut sind. Die Sarkomere sind optisch doppelbrechend und daher gut im Lichtmikroskop als Streifen zu erkennen (gestreifte Muskeln!). Die A-Bande erscheint besonders dunkel und wird durch Myosinfilamente bestimmt, die aus jeweils 150 Myosinmolekülen zu einer Einheit von 10 nm Dicke zusammengefügt sind (Bild 6.1a). Um diese Filamente ist Aktin (Perlschnurkette) in hexagonaler Anordnung gelagert (Bild 6.1c). Auf ein Myosinfilament entfallen zwei Aktinketten. (bei Insekten und Krebsen gibt es eine andere Struktur und ein Verhältnis von 3:1). Bei Ruhe besitzen die Aktinketten in der Mitte des Sarkomers einen geringen Abstand (H-Bande). Die Z-Bande entsteht dort, wo der Sarkomer frei von Myosin ist.

Die Länge des Sarkomers (Ruhe etwa 2,2 µm) ändert sich mit der Erregung. Hierbei werden die Köpfchen (20 nm ∅) der Myosinmoleküle aktiv. Sie heften sich an die Kontaktstellen der Aktinketten (Bild 6.1d). Durch eine Drehung (Bild 6.1e) ziehen sie diese dann in ($^1/_{100}$ bis $^1/_{10}$ s) heran. Jeder Schritt beträgt etwa 20 nm (1 %). Die Zugkraft je Köpfchen liegt bei 10^{-9} N. Mit mehreren Schritten gleiten so die Aktinketten über die Myosinfilamente hinweg. Drei mögliche Stellungen zeigt Bild 6.1f. Die erreichte Kraft ist insbesondere von der Anzahl der aktiven Myosinköpfchen abhängig (Bild 6.1g). Maximal werden etwa 40 N/cm^2 erreicht. Auch die Geschwindigkeit ist von der Stellung Aktin-Myosin abhängig (Bild 6.1g). Für die Leistung (Geschwindigkeit mal Kraft) gilt die zweite Kurve.

In allen Skelettmuskeln befinden sich Muskelspindeln (Bild 6.1i). Sie messen die Dehnung des Muskels. Besonders dicht sind sie in der Nacken- und Fingermuskulatur vorhanden. In allen Sehnen sind zusätzlich Golgi-Sensoren eingelagert, welche die wirkende Kraft in Aktionspotentiale umsetzen (Bild 6.1j). Die Anzahl der Muskelspindeln liegt zwischen 40 bei den kleinen Handmuskeln und 500 bei Muskel triceps brachii. Insgesamt verfügt der Mensch über etwa 20 000 Muskelspindeln. Die Anzahl der Sehnenorgane ist weniger genau bekannt. Meist werden 0,5 bis 0,8 Sehnenorgane je Muskelspindel angenommen.

Glatte Muskelzellen enthalten dieselben kontraktilen Einheiten wie gestreifte Muskeln. Sie sind 50 bis 500 µm lang, 2 bis 10 µm dick und unregelmäßig im Gewebe (u. a. Darmwand, Blase, Uterus und Haut) eingelagert. Sie können einen Spannungszustand (Tonus) ohne wesentliche Energiezufuhr (nur 2 bis 10 % wie bei gestreiften Muskeln) aufrecht erhalten. Dafür sind sie aber hundert- bis tausendmal langsamer. Ihre Kontraktionsleistung liegt ebenfalls bei etwa 40 N/cm^2. Infolge ihrer Wirkung erscheinen sie plastisch bzw. viskoelastisch. Eine besondere Muskelart besitzt noch der *Herzmuskel*. Er hat eine verzweigte Form.

Die Zeit einer Zuckung (Kontraktion | Erschlaffung) beträgt beim Flugmuskel von Insekten wenige ms, bei vielen Wirbeltiermuskeln etwa hundert ms, beim Magenmuskel mehrere Sekunden und

beim Schließmuskel der Muschel mehrere Minuten. Unsere saccadischen Augenbewegungen geschehen in ms und erreichen bei großen Saccaden mit 60° etwa 400 °/s. Typische Werte der spezifischen Muskelkraft liegen bei 10^5 Pa/cm^2 (≈ 1 kp/cm^2), während unser Bizeps mehrere 10^7, die Teichmuschel sogar 10^{11} Pa/cm^2 erreicht.

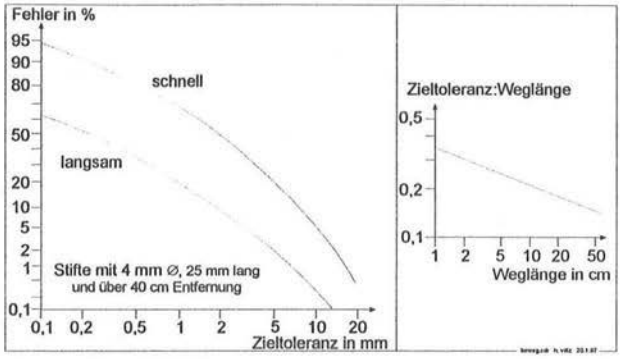


Bild 6.2 Leistungsfähigkeit bei manuellen Zielbewegungen

In einigen Arbeiten wurde unsere Zielgenauigkeit untersucht, wie sicher und schnell z. B. ein Stift in ein unterschiedlich großes Loch eingefügt wird. Dies ist abhängig vom zurückgelegten Weg und von der geforderten Toleranz. Einige vereinfachte Kurven zeigt **Bild 6.2**. Andere Aussagen zu unserer manuellen Leistungsfähigkeit folgen aus Meisterschaften in der Stenographie mit reichlich 500 Silben/Minute und beim Maschineschreiben zu mehr als 800 Anschlägen/Minute. Werte für den erreichbaren Informationsfluß enthält die Tabelle.

Tätigkeit	Bit/s
Sprechen	22 - 55
Lesen (obere Grenze stumm)	18 - 45
Klavierspielen	23
Zielbewegungen	20
Maschineschreiben	16
Rechnen / Zählen	12

6.2 Sprache und Gesang

Sprache und teilweise Gesang sind wichtige Aktivitäten des Menschen. Ihre bisherige, geringe Nutzung bei der Mensch-Technik-Schnittstelle wird sich künftig gewiß erheblich erweitern. Dafür stehen schon lange wichtige Ergebnisse zur Verfügung. Wesentlich für unser Sprechen | Singen ist der als Schnitt im **Bild 6.3a** gezeigte Bereich des Kopfes. Die funktionalen Abschnitte zeigt Bild 6.3b in einem technisch betonten Schema. Das ermöglicht eine Gliederung in drei funktionelle Komponenten:

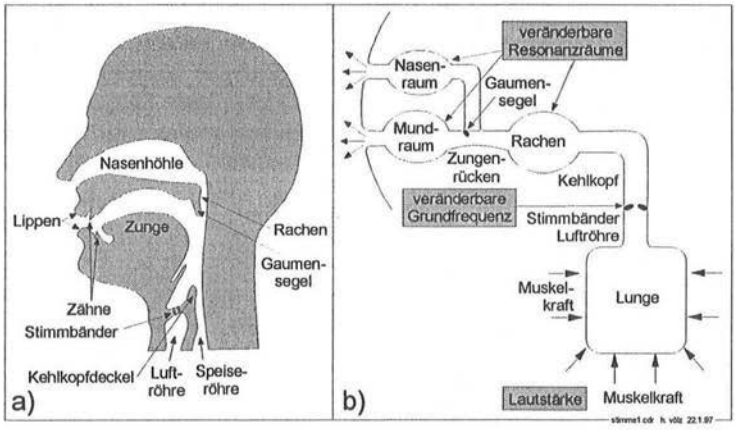


Bild 6.3 zur Stimmbildung

- Mittels der **Lunge** erzeugen wir einen Luftstrom, der die energetische Grundlage für den zu erzeugenden Schall ist. Die Intensität bestimmt dabei hauptsächlich die Lautstärke. Beim Sprechen überschreitet der Luftdruck hinter den Stimmbändern immer 500 Pa (5 cm Wassersäule); beim Singen werden sogar mehr als 2 kPa erreicht.

- Zur **Phonation** (physikalische Stimmbildung) wird der Luftstrom mittels der Stimmbänder periodisch unterbrochen. So entstehen Schallschwingungen einer Grundwelle mit reichem Oberwellenanteil. Durch mehrere Muskeln kann die Straffheit (Spannung) der Stimmbänder und die Größe der Stimmritze (s. u.) und damit die Grundfrequenz willkürlich verändert werden. Der mögliche Frequenzbereich ist für männliche und weibliche Personen sowie für Kinder recht unterschiedlich. Einen gewissen Einfluß auf die Tonhöhe besitzt auch der von der Lunge erzeugte Luftdruck. Dennoch ist es z. B. Sängerinnen|Sängern selbst bei sehr unterschiedlichen Lautstärken möglich, durch gegenläufige Änderung der Spannung der Stimmbänder die Tonhöhe auf etwa 1 % konstant zu halten. Eine Sopranstimme kann in 1 m Entfernung durchaus einen Schalldruck von 100 Phon erreichen. Lautes Kinderschreien liegt bei etwa 80 Phon.
- Für die **Artikulation** wird der Schall hinter den Stimmbändern durch die sich anschließenden Resonanzräume willkürlich beeinflußt. Die Resonanzfrequenz des Mund-Rachen-Raumes – auch Ansatzrohr genannt – wird u. a. mittels der Zunge, der Zahnabstände und der Lippenformung verändert. Je nach Stellung des Gaumensegels kann auch der Nasenhohlraum und damit die Nase in die Schallabstrahlung einbezogen werden. Diese Effekte filtern das obertonreiche Spektrum der Stimmbandschwingungen, des Rauschens der Luft und|oder der impulsartigen Luftstöße. So entstehen die spezifischen „Klangbilder". Die Resonanzen der Hohlräume lassen sich auch ohne Luftstrom hörbar machen. Dazu klopft kann man in ruhiger Umgebung mit einem Finger auf die Wange. Das Ändern der Mund- und Zungenstellung wird so besonders deutlich.

Mittels der drei Vorgänge können wir z. B. ein Lied mit „la-la-la-..." singen. Wir erkennen dann einerseits immer wieder die Silbe „la" und hören andererseits die Melodie. Der Melodieverlauf wird dabei allein durch die Frequenz der Stimmbandschwingung hervorgerufen. Für den Silbenklang „la" müssen dagegen die Hohlräume ständig so verändert werden, das jeweils die richtigen Intensitäten der Oberwellen entstehen. Dies erklärt weiter, daß unser Sprachverstehen nicht dadurch beeinflußt wird, ob eine Frau, ein Mann oder ein Kind den Text sprechen. Alle bewirken über Veränderung der Hohlräume, daß zur jeweiligen Grundfrequenz die richtigen Intensitäten der Oberwellen entstehen.

Prinzipiell ist Schall auch ohne Stimmbänder zu erzeugen. Diese „stimmlose" Sprache kennen wir z. B. als Flüstern. Hier geben die Stimmbänder nur eine kleine Ritze frei und so entsteht kein Grundton, sondern ein „Rauschen". Es ist wiederum der Ausgangspunkt für die Filterung mittels der Hohlräume. Daher können wir auch flüsternd *nicht* singen. Eine dritte Methode der Schallerzeugung beruht auf kurzen impulsartigen Luftstößen. Hiermit erzeugen wir, ebenfalls ohne Stimmbänder, u. a. die stimmlosen Mitlaute (p, t und k). Bei den stimmhaften Mitlauten (b, d und g) wirken dagegen die Stimmbänder mit.

6.2.1 Phonation

Wichtige Grundlagen der Phonation faßt **Bild 6.4** zusammen. Ein mechanisches Modell für die Funktion der Stimmbänder zeigt Bild 6.4a. Im Luftstrom befindet sich eine Unterbrechung durch zwei massive Bolzen. Sie werden mit je einer Feder fest aufeinander gedrückt. Der Luftstrom preßt sie auseinander. Beim Hindurchströmen der Luft entsteht dann an dieser Stelle infolge des Bernoulli-Prinzips ein Unterdruck. So nähern sich wieder die beiden Bolzen und reduzieren dabei die Menge der hindurchströmenden Luft. Der Luftdruck steigt deshalb wieder an und preßt die Bolzen auseinander. Der Vorgang wiederholt sich periodisch mit einer Frequenz, die durch die Masse der Bolzen, die Federspannung und den Luftdruck bestimmt wird. Fast genauso funktio-

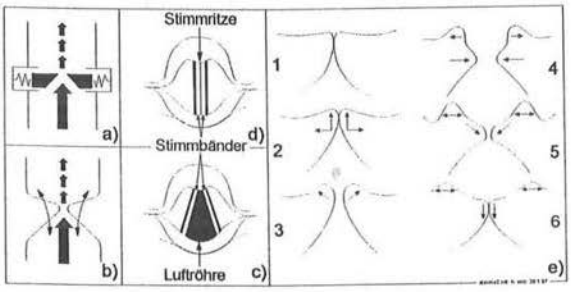


Bild 6.4 zur Bewegung der Stimmbänder

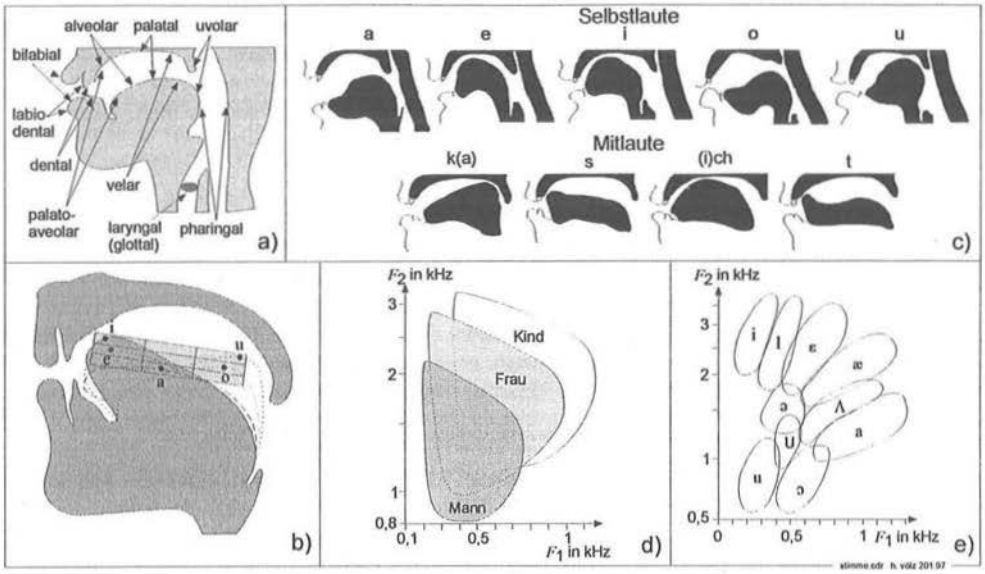


Bild 6.5 zur Artikulation der Sprache

nieren unsere Stimmbänder (Bild 6.4b). Für die normale Atmung werden sie so weit auseinander bewegt, daß die Luft leicht hindurchströmen kann (Bild 6.4c). Es treten keine Schwingungen auf. Zum Singen und (stimmhaften) Sprechen werden sie dicht zueinander bewegt, daß nur noch eine kleine Stimmritze übrig bleibt (Bild 6.4d). Die Glottis ist also verengt | geschlossen. Durch den Luftstrom von der Lunge läuft dann ein Prozeß ab, wie er in sechs Zeitstufen in Bild 6.4e angedeutet ist.

6.2.2 Artikulation

Grundlagen zur Artikulation faßt **Bild 6.5** zusammen. Wichtig ist die Formung der Zunge. Für einige Selbst- und Mitlaute gilt Bild 6.5c. Schematischer, nur für Selbstlaute, gilt Bild 6.5b. Zur Unterscheidung von Vokalen werden meist nur zwei Frequenzen (Formanten) betrachtet: F_1 ist die Grundfrequenz des Stimmbandes und F_2 ist die bevorzugt ausgefilterte Frequenz. Zunächst sind dabei die drei typischen Gruppen der sich z. T. überlappenden Bereiche gemäß Bild 6.5d zu unterscheiden. Dennoch gibt es für die einzelnen Vokale relativ gut voneinander unterscheidbare Teilbereiche (Bild 6.5e). Hierauf beruht weitgehend unsere Vokalerkennung. Dazu gehört auch die rechts stehende Tabelle.

Phonem	Beispiel	Zungenlage		Lippenrundung
		horizontal	vertikal	
i:	Miete	vorn	hoch	nein
ɪ	Mitte	vorn	hoch	nein
y:	müde	vorn	hoch	ja
y	Mütter	vorn	hoch	ja
e:	Meter	vorn	mittel	nein
Φ:	öde	vorn	mittel	ja
Œ	öffnen	vorn	mittel	ja
ɛ:	Mädel	vorn	mittel	nein
ɛ	Mette	vorn	mittel	nein
ə	Amme	mittel	mittel	nein
u:	Mut	hinten	hoch	ja
ʊ	Mutter	hinten	hoch	ja
O:	Mode	hinten	mittel	ja
ɔ	Motte	hinten	mittel	ja
a:	Made	hinten	tief	nein
a	Matte	hinten	tief	nein
ʌ	buttler			
ɑ	far (engl.)			

Bei genauerer Betrachtung müssen weitere Frequenzen einbezogen werden. Für ein „e" sind mindestens die drei Formanten 400 - 600, 1700 - 1900 und 2200 - 2600 Hz vorhanden. Für „i" gelten analog 200 - 400, 1900 - 2100 und 3000 - 3200 Hz.

Bei den Mitlauten sind die Zusammenhänge noch komplexer. Hier werden meist Begriffe gewählt, die auf den **Artikulationsort** verweisen (vgl. Bild 6.5a). Dabei bedeuten:

- **bilabial**: Ober- und Unterlippe
- **labiodental**: Unterlippe und Schneidezähne
- **dental**: Zunge und obere Schneidezähne
- **alveolar**: Zunge und Alveole
- **palatal**: Vorderzunge und Vordergaumen
- **velar**: Hinterzunge und Hintergaumen
- **uvular**: Zäpfchen und Zungenrücken
- **glottal**: Stimmlippen

Eine zweite Komponente betrifft die **Luftstromsteuerung**. Es werden unterschieden:

- **Plosive** (Verschlußlaute). Der Luftstrom wird durch einen Verschluß am Artikulationsort (Verengungsstelle) kurzzeitig unterbrochen.
- **Nasale** (Nasallaute). Der Mundraum ist wie bei den Plosiven verschlossen, die Luft entweicht durch die Nase.
- **Laterale** (Seitenlaute). Die Luft strömt am Artikulationsort seitlich an der Zunge vorbei.
- **Frikative** (Reibelaute). Die Artikulatoren bilden eine Engstelle, durch die der Luftstrom geräuschvoll gepreßt wird.
- **Vibranten** (Schwinglaute). Die Zungenspitze oder das Zäpfchen vibrieren.
- **Affrikate.** Doppellaute mit annähernd gleichem Artikulationsort, bei denen ein Plosiv und ein Frikativ fast gleichzeitig artikuliert werden, z.B. /pf/.

Auf der Basis dieser Zweiteilung lassen sich die Mitlaute gut klassifizieren und es entsteht die folgende Tabelle. Darin bedeuten 1) Zungen-r; 2) Zäpfchen-R; h = stimmhaft und l = stimmlos.

		bilabial	labio-dental	dental	alveolar	pala-tal	velar	uvular	glottal
Verschlußlaut Plosiv	h	b Baß			d Dur		g Guß		
	l	p Paß			t Tour		k Kuß		
Reibelaut Frikativ	h		v wach	z Rasen	ʒ Genie	j je			
	l		f Fach	s Rasse	schön	ç ich			h Hauch
Nasal	h	m Maß			n nur		x Dach		
Lateral	h				l Lot		ɳ eng		
Vibrant	h				r Ring 1)			R Ring 2)	
Affrikata	h		pf Pfau		dʒ Joe ts zu tʃ Tschad				

6.3 Drüsen

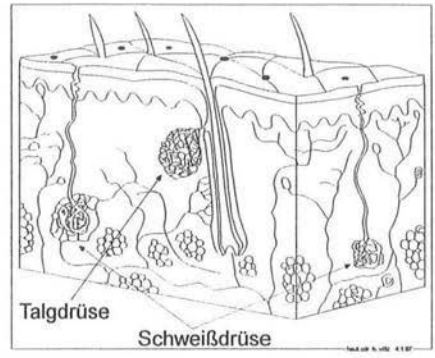


Bild 6.6 Haut mit Drüsen

Noch dürftiger als die Aussagen zu den Muskelaktivitäten sind jene, welche die Schweiß- und Talgdrüsen unserer Haut betreffen. Das **Bild 6.6** zeigt einen schematischen Überblick. *Schweißdrüsen* sind knäuelartige Gebilde (Knäuelzellen). Einen Überblick zur Dichte der Schweißdrüsen gibt die unten stehende Tabelle. Sie ergänzen die Wärmeregulation durch Verdunsten des Schweißes (98 % Wasser; 0,6 - 0,8 % NaCl, Rest u. a. Ammoniak und Harnstoff). Primär erfolgt sie durch die Durchblutung und kann z. B. beim kleinen Finger um 1:600 geändert werden. Jeder Liter Schweiß entzieht dem Körper rund 2500 kJ (≈ 600 kcal). Schwitzen tritt aber auch bei emotionaler Erregung auf und kann so für die Mensch-Technik-Schnittstelle genutzt werden. Weiter gibt es *große Knäuelzellen*, die keinen Schweiß absondern, sondern Sekrete, die durch Duft, Farbe und andere Eigenschaften charakteristisch für jeden Menschen sind. *Talgdrüsen* sind traubenartige Gebilde, die häufig an Haarbälgen enden. Sie halten durch Absonderung von Talg die Haut geschmeidig. Prall mit Sekret gefüllte Talgdrüsen sind die „Mitesser".

Ort	Anzahl je cm^2
Rücken | Gesäß	55
Wangen	75
Bein	80
Bauch | Brust	150
Stirn	170
Hals	185
Handrücken	200
Fußsohle | Handteller	400
Ellenbeuge	750

6.4 Signal-Ableitungen

Von vielen menschlichen Aktivitäten|Handlungen sind elektrische Signale ableitbar. Die folgende Aufzählung erfolgt aber nur für unmittelbar ableitbare elektrische Größen. Kompliziertere Zusammenhänge werden im Hauptabschnitt der technischen Hardware erfaßt. Hier werden also nur einfache Anwendungen benannt (**Bild 6.7**, umseitig). Die Signalableitungen vom Gehirn enthält Abschnitt 6.5.

Der **Hautwiderstand** ändert sich insbesondere durch Absonderung von Schweiß. Neben der damit beabsichtigten physiologischen Regelung der Körpertemperatur erfolgt dies auch durch emotionale Erregungen, die u. a. durch Streß, Freude und Ärger ausgelöst werden. Bekannt ist die umstrittene Anwendung als „Lügendetektor". In der Psychologie wird der Effekt oft als Maß für die intellektuelle Anspannung benutzt und heißt dann PGR (Psycho-Galvanische Reaktion).

Muskel-Aktivitäten bewirken in ihrer unmittelbaren Umgebung beachtliche elektrische Potentiale, deren Aufzeichnung als Myogramm bezeichnet wird. Sie wurden erstmalig 1849 von Emil Du Bois-Reymond nachgewiesen. Eine besondere Form ist das **EKG** (Elektro-Kardio-Gramm). Aus ihm ist mühelos die Herzfrequenz abzuleiten. Der Mediziner gewinnt aus dem Kurvenverlauf zusätzlich Kenntnisse über den gesundheitlichen Zustand des Herzens. Ausgelöst werden die Muskelaktivitäten durch die neuronalen Impulse (Spikes). Sie treten selbst dann auf, wenn das eigentliche Erfolgsorgan (der Muskel bzw. die Drüse) durch Schädigungen nicht mehr funktionsfähig oder gar nicht mehr vorhanden ist. Dies wird z. B. zur Steuerung von **künstlichen Organen** benutzt.

Im Normalfall reagiert unsere **Pupille** auf Änderungen der Helligkeit (vgl. S. 27f.). Ihre Größe schwankt dabei in geringem Umfang periodisch. Für das Mensch-Technik-Interface ist jedoch ihre Änderung infolge emotionaler und intellektueller Belastungen von größerer Bedeutung. Es wird dann zuweilen vom Elektro-Okulo-Gramm (EOG, s. u.) gesprochen. Hierbei besteht ein teilweise paralleler Verlauf mit dem Hautwiderstand.

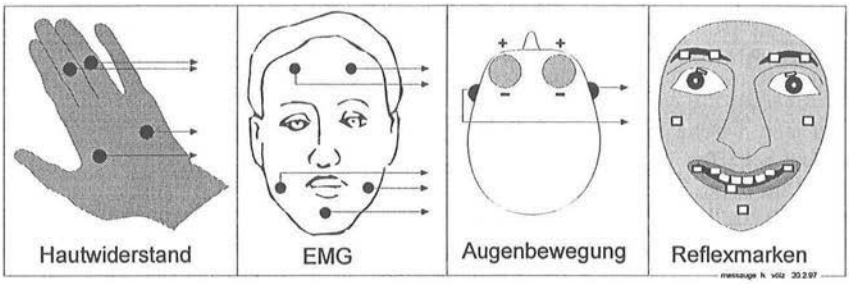


Bild 6.7 Beispiele zur Ableitung von Signalen

Die **Blickrichtung** unseres Auges wird bereits mehrfach technisch genutzt. Z. B. kann sie mit einer elektronischen Kamera durch Beobachtung der Pupille Infrarotbereich bestimmt werden. Entfernungsänderungen werden dabei mit automatischer Scharfeinstellung ausgeglichen. Bei einem festen Kameraort kann dann die Blickrichtung und|oder das fixierte Objekt bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Blickrichtung dient das **EOG** (Electro-Oculo-Gramm). Es nutzt aus, daß die Netzhaut gegenüber der Hornhaut leicht negativ aufgeladen ist. Daher werden paarweise Elektroden über und unter sowie seitlich zum Augapfel angebracht (Bild 6.7). Bis zu ±30° können Signale abgeleitet werden, die etwa proportional zur Augenbewegung sind. U. a. wird es zur Cursor-Steuerung bei Behinderten benutzt. Bei Schlafuntersuchungen dient es dem Nachweis der REM-Phasen.

Körperhaltungen und -bewegungen können sehr vielfältig erfaßt werden. Hierauf wird genauer im Hardwareteil eingegangen. Für das Gesicht zeigt Bild 6.7 ein Beispiel mit Reflexmarken. Allgemein hängt die Erkennung des **Gesichtsausdrucks** mit der Gesichtserkennung zusammen. Darauf wird genauer im Abschnitt 6.9 S. 88 eingegangen. Japanern ist es z. B. gelungen, Emotionen brauchbar zu erkennen. Dazu sind in 7 Regionen (Augenbrauen, Augenpartien, Nasen, Mund und Kinn) insgesamt 26 Punkte festgelegt. Die Auswertung erfolgt in Bezug auf ein dreidimensionales Drahtgittermodell. Zunächst wird ein Individual-Modell erarbeitet und mit dem Standardmodell verglichen. Erst dann können die Gefühle bestimmt werden. Bisher wurden sechs „Basisgefühle" eingeführt: Glück, Zorn, Sorge, Überraschung, Angst und Ekel.

6.5 Ableitungen vom Gehirn

Alle Gehirnaktivitäten werden durch eine große Anzahl von Neuronen hervorgerufen. Eine solche Summierung kann über Elektroden direkt von der Kopfhaut der Schädeldecke abgeleitet werden. So entstand das bereits 1929 von Hans Berger eingeführte **EEG** (Electro-Encephalo-Gramm). Teilweise ist es heute bereits eine Routinemethode der Medizin. Deshalb sind mehrere Parameter einheitlich festgelegt worden. Es werden 8 Elektroden gemäß **Bild 6.8a** verwendet. Die Ableitung erfolgt bipolar zwischen je zwei Elektroden und zum anderen zweimal unipolar gegen eine neutrale Elektrode z. B. am Ohrläppchen. Die Auswertung geschieht hauptsächlich nach Frequenzbereich, Amplitude und Kurvenform mit definierten Filtern. Je nach den Umständen treten unterschiedliche Wellen (Frequenzbereiche) auf, die in Gruppen gemäß der Tabelle auf S. 81 eingeteilt werden.

Im EEG sind also Frequenzen bis zu maximal 100 Hz und mit Amplituden von 10 bis 150 µV vorhanden. Nach den heutigen Kenntnissen gehen die Signale weitgehend auf die Pyramiden- und Sternzellen der Großhirnrinde zurück. Bei 1 mm^2 Elektrodenoberfläche sind die Signale über Millionen von Neuronen bis zu einer Tiefe von 0,5 mm gemittelt. Sie müssen also weitgehend synchron feuern. Berger fand zunächst die von ihm als Alpha-Rhythmus bezeichneten Wellen. Sie treten beim wachen, entspannten Erwachsenen mit geschlossenen Augen auf und werden offensichtlich vom Thalamus synchronisiert. Beim Öffnen der Augen und bei den meisten geistigen und körperlichen Tätigkeiten wird der α-Rhythmus blockiert. Das synchronisierte EEG erlischt. Es ist desynchronisiert.

Statt der α-Wellen treten die β-Wellen auf. Ihre Amplitude ist deutlich kleiner. Frequenz und Phase hängen stark vom Ableitungsort und der jeweiligen Aktivität ab. Die β-, δ- und 9-Wellen betreffen vor allem den Schlafenden. Sie haben für die Aufklärung von Schlafstörungen große Bedeutung. Der 9-Rhythmus wird von Neuronengruppen des Hippocampus – er ist an Emotionen und Erinnerungen wesentlich beteiligt – synchronisiert. Sie treten auch im Zustand tiefer Meditation auf. Aus Schlafuntersuchungen von W. Dement und N. Kleitman (1957) ergab sich ein Schlafmuster, das sich vier- bis fünfmal pro Nacht wiederholt. Anfangs liegt die α-Phase mit niedriger Amplitude vor. Dies ist die REM-Phase (Rapid Eye Movements = rasche Augenbewegung), die mit Träumen verbunden ist. Dann steigt die Amplitude. In der dritten Phase treten große langsame δ-Wellen auf, deren Häufigkeit zunimmt. Anschließend verläuft der Schlafzyklus in umgekehrter Reihenfolge und beginnt wieder von vorn. β-Wellen kennzeichnen auch den wachen Geisteszustand und können bei intensiver Tätigkeit bis zu 50 Hz reichen. Die γ-Wellen sind recht hochfrequent und treten vorwiegend bei Lernprozessen und gezielter Aufmerksamkeit auf. Die 9-Wellen begleiten weiter emotionalen Streß, speziell Frustration und Enttäuschung. Erst in der letzten Zeit wurden die μ-Wellen bekannt. Sie können vom motorischen Zentrum bei Bewegung oder sogar beim Vorhaben|Vorstellen von Bewegung abgeleitet werden. Im Kinder- und Jugendalter ist das EEG deutlich langsamer und unregelmäßiger. Klinisch wird das EEG z. B. zur Feststellung der Narkosetiefe bei Anästhesie benutzt. Das Fehlen des EEG gilt als sicherer Nachweis für den Hirntod. Die möglichen Wiederbelebungszeiten betragen für die Hirnrinde 3 - 8, für den Hirnstamm 7 - 10, für das Herz 20 und für die Nieren 150 Minuten. Daraus leiten sich Konsequenzen|Möglichkeiten für Organtransplantationen ab.

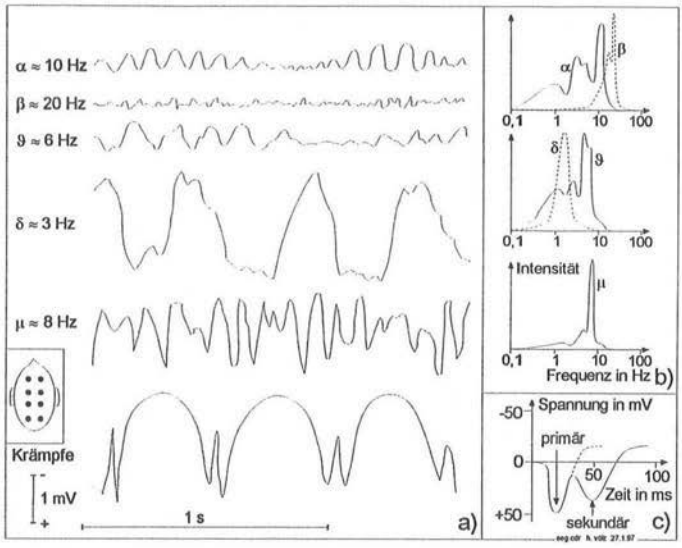


Bild 6.8 Ableitung und Eigenschaften vom EEG

Wellenart	Frequenz in Hz	Spannung in μV	Wach-EEG Erwachsener	Wach-EEG Kind	Schlaf-EEG
Alpha α	8 - 13	40 - 100	dominierende Aktivität in Ruhe	dominant ab 5. Jahr	kein Kriterium des Schlafes
Beta β	14 - 30	5 - 20	gruppenweise vorhanden	selten auftretend	Hinweis auf leichten Schlaf
Gamma γ	32 - 60	≤ 10	zu Gesetzmäßigkeiten, zur Lokalisation noch wenig bekannt		
Delta δ	0,5 - 3	5 - 900	nicht vorhanden	dominant bis 18. Monat	Begleiterscheinung beim Tiefschlaf
Theta 9	4 - 7	20 - 100	konstant, nicht auftretend	dominant vom 18. Monat bis 5. Lebensjahr	normales Kriterium, u. a. beim Einschlafen
Mü μ	um 8		bei Bewegungen		

Eine andere Methode nutzt die **EKG** (Ereignis-Korrelierte Potentiale = ERP = Event Related Potentials; nicht mit dem Elektro-Kardio-Gramm verwechseln!). Es werden Reizungen, z. B. durch Licht oder Schall, bzw. der Haut oder bestimmter Sinnesorgane vorgenommen. Dabei wird beobachtet, wo und wie sich bestimmte Hirnpotentiale ändern. Wegen vieler Störungen muß dieser Prozeß reproduzierbar oft wiederholt werden. Eindeutige Impulse sind dann durch Mittelung zu gewinnen. Zwei typische Beispiele zeigt Bild 6.8c. Zuerst erscheint nach etwa 10 ms meist ein primäres EP (evoziertes Potential), dem häufig das entscheidende sekundäre folgt.

In der klinischen Technik ist es bei teilweise entfernter Schädeldecke möglich, Signale direkt von der Hirnoberfläche abzuleiten. Dann wird vom **ECoG** (Elektro Cortico Gramm) gesprochen. Gegenüber dem EEG liefert es etwa zehnmal so große Signale, enthält höhere Frequenzen und betrifft auch weniger Neuronen.

In der Forschung hat das **MEG** (Magnet-Encephalo-Gramm) gewisse Bedeutung erlangt. Es registriert die von den elektrischen Strömen hervorgerufenen Magnetfelder. Da sie nur bei wenigen pT liegen (10^{-7}tel der Erdfeldes), sind sehr aufwendige Apparaturen erforderlich. Sie benutzen die hochempfindlichen, mit flüssigem Helium gekühlten SQUID (Superconducting Quantum Interference Divice). Die Ergänzung zum EEG ist nahezu ideal. Die magnetischen Felder stehen nämlich senkrecht zu den elektrischen. Das entspricht der Richtung der vertikalen kortikalen Säulen. Außerdem ist eine höhere räumliche Auflösung (bis zu 2 mm) möglich.

6.6 Gedächtnis

Unser neuronales Gedächtnis hat vielfältige Aufgaben und sein Inhalt unterliegt einer fortlaufenden Änderung. Einmal enthält es genetisch fixierte Information, u. a. für lebenswichtige Abläufe und für vielfältige Reflexe. Weiter ändert sich der Inhalt ständig durch Lernen. Dabei wird sowohl neues **Verhalten** als auch **Wissen** erworben. Von dem, was uns bewußt wird, speichern wir aber langfristig nur einen kleinen Teil (≤ 1%). Dagegen wird auch manches gespeichert, was uns nicht bewußt wird. Hinzu kommt, daß wir vieles auch wieder **vergessen**. Von **Reifung** wird dann gesprochen, wenn genetisch programmierte Wachtumsprozesse im Nervensystem ablaufen. **Prägung** betrifft dagegen ein spezielles assoziatives Lernen bezüglich einer angeborenen Sensibilität. Sie erfolgt in einem genetisch bestimmten Zeitraum. Erstmalig hat dies Konrad Lorenz bei den Graugänsen beobachtet.

Das Gedächtnis für **Verhalten** wird auch prozedurales Gedächtnis genannt. Es betrifft implizites, also nicht deklaratives Wissen und wurde vor allem vom Behaviorismus in Tierversuchen untersucht. Dazu gehören u. a. nicht-assiozatives Lernen (Habituation und Sensibilisierung) und bedingte Reflexe (**klassische Konditionierung**). Auch das Erlernen von Fertigkeiten und Gewohnheiten wird hier eingeordnet. Beim Menschen betrifft es verinnerlichte, automatisierte Handlungsabläufe wie Gehen, Schwimmen und Autofahren. *Habituation* und *Sensibilivierung* betreffen Lernprozesse bezüglich bestimmter Reize. Durch Habituation können Reize, wenn ihre Bedeutungslosigkeit erkannt wurde, kaum noch Reaktionen auslösen. Sie werden ignoriert. Bei der Sensivierung wird dagegen ihre Beachtung deutlich erhöht. Beim *Priming* wird ein früher einmal wahrgenommener Reiz oder Ablauf mit neuen irgendwie ähnlichen Erlebnissen verbunden. So werden Erwartungen für Reize vorbereitet. Daher ist eine formale Übersetzung als Prägung|Bahnung falsch.

Neben der klassischen gibt es auch eine **instrumentelle (operante) Konditionierung.** Hier erfolgen die Versuche mittels spezieller Geräte. Ein Beispiel ist die Skinner-Box. Durch selbst auslösbare Stromstöße in bestimmten Hirnregionen bei Mäusen wird so „Lust" erzeugt. **Prozedurales Lernen** erfolgt vorwiegend ohne Mitwirkung des Bewußtseins, daher besteht auch kein (kaum) direkter Zugriff auf Gedächtnisinhalte. Typisch hierfür ist das *Biofeedback*. Es ermöglicht, ohne Medikamente krankhafte Prozesse, z. B. Herzrhythmusstörungen, Muskelverspannungen, Migräne und Einschlafstörungen, zu lindern. Zumindest müssen hierfür das motorische System, die Basalganglien und das Kleinhirn funktionstüchtig sein. Im gewissen Umfang ist prozedurales Lernen auch beim autonomen Nervensystem möglich. Zumindest gelang es im Tierversuch, Herzfrequenz, Tonus der Darmmuskulatur, Urinsekretion und Durchblutung der Magenwand dauerhaft zu verändern.

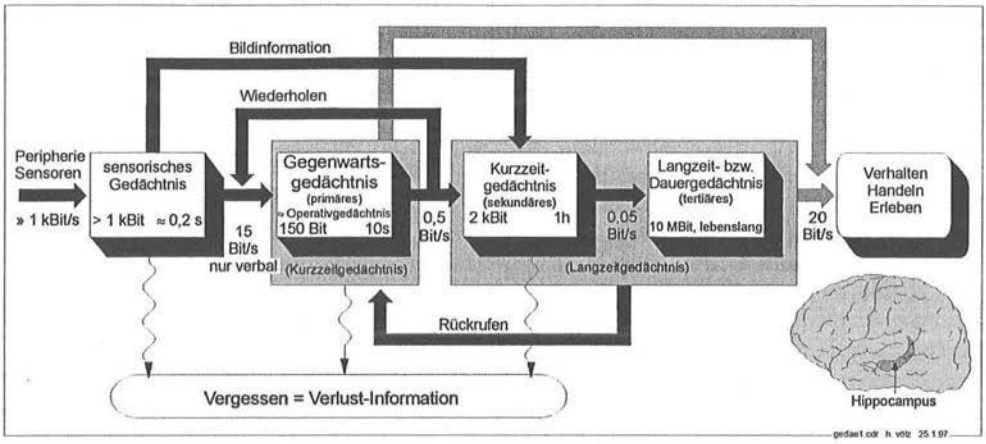


Bild 6.9 die funktionale Struktur unseres Gedächtnisses

Das (menschliche) **Wissensgedächtnis** wird auch deklaratives Gedächtnis genannt. Es wurde vor allem in der Denkpsychologie untersucht und betrifft kognitive Prozesse, deren Ergebnisse explizite Fakten, Abläufe und Regeln sind. Für eine langfristige Speicherung dieser Inhalte ist unbedingt der Hippocampus erforderlich (**Bild 6.9**). Wahrscheinlich bewirkt er die Integration von Teilinhalten des Gedächtnisses zu einer Gesamtheit im Sinne von Beziehungslernen. Wann und wie man etwas gelernt hat (episodischer Teil des Lernens), vergißt man sehr viel leichter und häufiger als den Inhalt des Gelernten, also jenes, was bereits sprachlich | bildlich codiert ist. Für besondere, einmalige und betonte Abläufe | Geschehnisse (Hochzeit, Ballonflug, Ehrungen) tritt ein *episodisches* Gedächtnis als Spezialform in Erscheinung.

Die ersten quantitativen, noch heute weitgehend gültigen Untersuchungen zum Wissensgedächtnis machte H. Ebbinghaus. Sein Buch „Über das Gedächtnis" von 1885 begründet die Gedächtnisforschung. Um semantische Inhalte (Kontexte) auszuschließen, benutzte er sinnlose Silben. So erkannte er zeitliche Abläufe des Lernens | Vergessens. Heute werden meist vier Gedächtnistypen – mit teilweise recht abweichenden Bezeichnungen – unterschieden: 1. Sensorisches; 2. Gegenwartsgedächtnis (primäres); 3. Kurzzeitgedächtnis (sekundäres ≈ operatives) und 4. Langzeitgedächtnis (tertiäres, dauerhaftes). Zuweilen wird auch die Zusammenfassung von Kurz- und Langzeitgedächtnis als Langzeitgedächtnis bezeichnet.

Das **sensorische Gedächtnis** (zuweilen *ikonisch* genannt) reagiert in Bruchteilen von Sekunden und bereitet dadurch die Codierung für das Kurzzeitgedächtnis vor. Sie benötigt etwa eine Sekunde. Deutlich sind verbale (s. u.) und eine averbale Codierung zu unterscheiden. Zur averbalen ist sehr wenig bekannt. Besonders ausgeprägt dürfte sie bei Kindern und natürlich bei Tieren auftreten. Vom sensorischen Gedächtnis machen wir Gebrauch, wenn komplexe Reize (Bilder oder mehr als zehn Buchstaben) für nur etwa 50 ms dargeboten werden. Nur unmittelbar danach können noch 80 % benannt werden (**Bild 6.10**g, nächste Seite). Vorhandene Information kann hier aktiv gelöscht und durch neue Information überschrieben werden. Wahrscheinlich befindet sich das sensorische Gedächtnis in den primären Sinnen und den primären corticalen Projektionsbereichen. Seine Kapazität muß deutlich größer als die des Gegenwartsgedächtnisses sein. Nach oben ist sie durch die von den Rezeptoren übertragbare Information begrenzt. Die vermutlichen Parameter zeigt Bild 6.10h als den nach oben herausgezogenen Bereich.

Im **Gegenwartsgedächtnis** ist die Information in zeitlicher Folge (sequentiell) gespeichert. Vergessen erfolgt verzögert und dann etwa exponentiell (Bild 6.10b). Die typische Verweildauer im

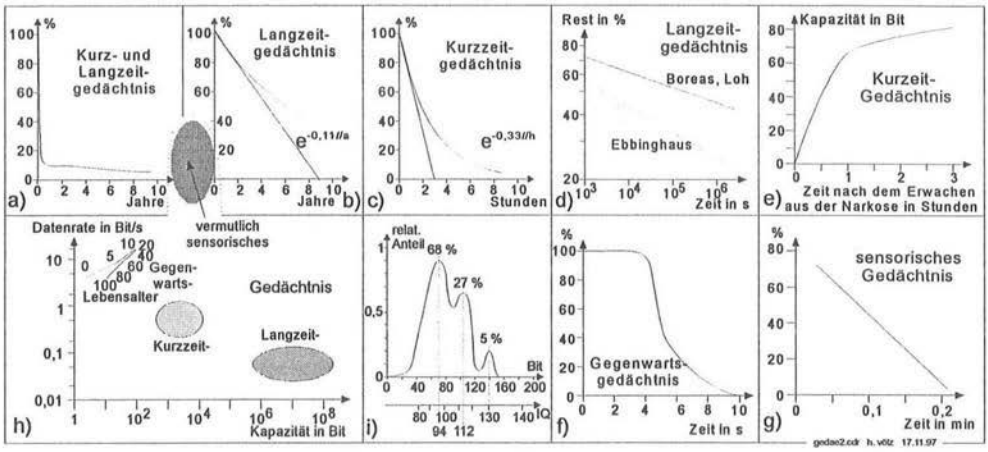


Bild 6.10 Informationstheoretische Größen der verschiedenen Teilgedächtnisse

Gegenwartsgedächtnis liegt bei maximal zehn Sekunden. Infolge der begrenzten Speicherkapazität bedingt Neues ein Vergessen von Altem. Folglich kann durch ständiges Wiederholen das Vergessen vermieden werden. Averbales wird im Gegenwartsgedächtnis kaum gespeichert. Es muß vom sensorischen Gedächtnis sofort ins Kurzzeitgedächtnis gebracht werden. Als Modell für das Gegenwartsgedächtnis wird meist ein Umlaufen der Information über eine große Neuronenzahl angenommen.

Im **Kurzzeitgedächtnis** (sekundäres, Arbeitsgedächtnis und teilweise mit dem Operationsgedächtnis übereinstimmend) wird die Information vor allem in ihrer „Bedeutung" gespeichert. Während Fehler beim Gegenwartsgedächtnis phonetisch ähnliche Laute (z. B. p und b) betreffen, treten hier Verwechslungen von Wörtern mit ähnlicher Bedeutung auf. Das Vergessen im sekundären Gedächtnis scheint weitgehend auf Interferenz mit vorhandener und folgender Information zu beruhen. Während die Speicherung relativ langsam erfolgt, kann der Zugriff auf vorhandene Information schnell erfolgen. Die Funktion des Kurzzeitgedächtnisses hängt eng mit der RNS-Synthese zusammen. Ihre Blockierung verhindert das Behalten neuer Information, aber nicht die Wiedergabe alter. Auch die Halbwertszeit der RNS-Synthese ($\approx$ 20 min auf 1/e) steht mit der Gedächtnisdauer ($\approx$ 1 h auf 1%) im Einklang. Gehirnerschütterungen, Hirnschlag, Elektroschock, Anästhesie usw. bewirken so ein Vergessen (retrograde Amnesie, vgl. Bild 6.10e) bis zu zwanzig Minuten vor dem Geschehen. Diese „verlorene" Information konnte sich offensichtlich infolge des Geschehens nicht mehr stabilisieren. Erst nach und nach wird die „Wissenslücke" kleiner. Schrittweise kommen mehr „vergessene" Ereignisse ins Bewußtsein. Sie liegen immer näher an dem Zeitpunkt des Geschehens. Völlig aufgefüllt wird die Lücke aber kaum jemals. Zur Überführung von Information aus dem Gegenwartsgedächtnis in das Kurz- und Langzeitgedächtnis – auch Konsolidierung genannt – muß der Hippocampus völlig intakt sein.

Für das **Dauergedächtnis** (tertiäres, Langzeitgedächtnis) werden eingeprägte Engramme angenommen. Typisch hierfür sind z. B. das Kennen des eigenen Namens, die Fähigkeit zum Schreiben und Lesen. Es ist durch fast nichts zu stören. Die Speicherung erfolgt sehr langsam, während die Wiedergabe meist schnell erfolgt. Sehr wahrscheinlich beruht es auf feste, sehr komplexe Verschaltungen sehr vieler Neuronen. Hierfür spricht, daß sich mit dem Lernen Spines (Synapsen) morphologisch verändern, vergrößern und sich auch neue Spines ausbilden. Vergessen wäre also ein Rückbilden. Z. T. wurde es in nicht benutzten Arealen beobachtet. Die Verschaltung betrifft einmal die genetische und zum anderen die individuell erworbene, erlernte Information. Vielfach wird angenommen, daß die meisten synaptischen Verbindungen bereits vor dem Lernen, überwiegend sogar vor der

Geburt, vorhanden sind. Sie sind aber zunächst noch „stumm" und werden erst durch Lernen zur möglichen Aktivität erweckt.

Der Unterschied zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis ist schon zu Beginn der Gedächtnisforschung aufgefallen. Die Kurve in Bild 6.10a kann nämlich durch zwei exponentielle Geraden genähert werden (Bild 6.10b und c). Die typischen Daten der Gedächtnisse faßt systematisch Bild 6.10h zusammen. Es wurde erstmals von Helmar Frank zusammengestellt und hier auf die neueren Daten modifiziert. Die Angaben in Bit beziehen sich nur auf das Lernen und Vergessen sinnloser Silben bzw. auf Zufallszahlen. Das sensorische Gedächtnis ist nach oben in Bild 6.10a und b ergänzt. Die Kapazitätsabschätzungen für das Dauergedächtnis scheinen sehr klein zu sein. Sie werden aber durch eine Vielzahl von Untersuchungen belegt. Zum Lernen einer Sprache ist etwa eine Speicherkapazität von $5 \cdot 10^7$ Bit notwendig. Die Anzahl aller, in den zugehörigen Arealen vorhandenen Neuronen liegt bei etwa $5 \cdot 10^8$. Hieraus folgt, daß 1 Bit im Mittel über etwa 10 Neuronen verteilt sein könnte. Wird dieser Wert auf den gesamten Kortex extrapoliert, so liegt seine Speicherkapazität bei 10^8 Bit. Neuere Untersuchungen lassen erkennen, daß ein Zusammenhang zwischen dem Gegenwartsgedächtnis und dem IQ (Intelligenz-Quotient) besteht. Dabei wurde deutlich, daß es drei IQ-Gruppen in einer Population gibt (Bild 6.10i).

Abgesehen von ganz seltenen Ausnahmen sind Gedächtnisinhalte nicht an bestimmte Orte im Gehirn gebunden. Sie sind wahrscheinlich eher gleichmäßig über große Areale verteilt. Bei lokalen Ausfällen im Gehirns (Schlaganfall, Tumor, Verletzung) geht praktisch kein bestimmbares Detailwissen verloren. Daher war es erstaunlich, daß die beiden Großhirnhälften teilweise unterschiedliche Funktionen verwirklichen (zerebrale Lateralisation). Ähnliches wurde bei keinem Tier beobachtet. Lediglich bei männlichen Vögeln ist der Gesang überwiegend in der linken Hemisphäre lokalisiert. Wichtige Merkmale der Lateralisation zeigt die folgende Tabelle.

Funktion	links	rechts
visuell	Buchstaben, Wörter	komplexe geometrische Muster, Gesichter
auditiv	sprachbezogene Laute	Musik, Geräusche
Somato-sensorisch		taktiles Wiedererkennen von komplexen Mustern, Braille
Bewegung	komplexe Willkürbewegung	Bewegungen in räumlichen Mustern
Gedächtnis	verbal	nonverbal
Sprache	Sprechen, Lesen, Schreiben, Rechnen	Prosodie
Räumliche Prozesse		Geometrie, Richtungssinn, Rotation von Formen
Emotion	neutral-positiv	negativ-depressiv

Die Lateralisation ist aber nicht total und außerdem recht individuell geprägt. Bei rein passiven Musikgenießern zeigt sich ein Aktivitätsanstieg im rechten fronto-temporalen Cortex. Professionelle Musiker und Komponisten besitzen dagegen weit gestreute, bilaterale Aktivitäten ohne Zentrenbildung. Eng im Zusammenhang mit der Lateralisation steht die Händigkeit. 75 % der Erdbevölkerung bevorzugt die rechte Hand. Männliche Linkshänder sind häufiger. Sowohl Händigkeit und Lateralität liegen überwiegend bereits bei der Geburt fest. Es scheint ein Zusammenhang mit der Lage des Fötus im Mutterleib zu bestehen. Meist zeigt die rechte Körper- und Gesichtshälfte nach außen und ist daher mehr für Reize zugänglich. Den typischen Zusammenhang zwischen Händigkeit und Sprachlateralität zeigt für 250 Patienten die nebenstehende Tabelle.

Händigkeit	Sprachrepräsentation in %		
	links	bilateral	rechts
rechts	96	0	4
links	70	15	15

6.7 Lernen und Superzeichen

Lernen ist ein äußerst vielfältiges Geschehen. Es kann hier nicht einmal andeutungsweise erfaßt werden. F. Klix [KLI] betont z. B. den Zusammenhang mit dem Denken und dem Gedächtnis. Danach erzeugt Lernen immer Gedächtnisinhalte und Denken beruht auf die Benutzung des Gedächtnisses. Hier werden nur einige Effekte berücksichtigt, die beim Mensch-Technik-Interface besondere und z. T. unerwünschte Effekte erzeugen können.

Zunächst sei auf den *bedingten Reflex* hingewiesen, den Pawlow beim Hund fand: Ertönt regelmäßig vor dem Füttern eine Klingel, so kann nach einiger Zeit allein das Läuten den Speichelfluß auslösen. Wichtiges Geschehen – meist mit Emotionen verknüpft – speichert alles kurz Vorangegangene. Jenes was dabei wiederholt auftrat, ändert später allein die Erwartungshaltung.

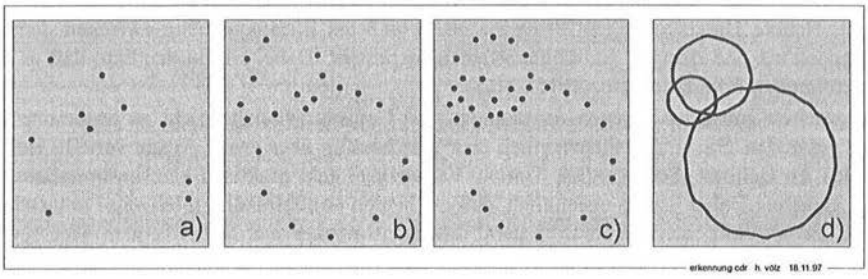


Bild 6.11 zum Dreistufenprozeß des Lernens

Bedeutsam kann die *Dreistufentheorie* des Lernens sein, wie sie ursprünglich an musikalischen Abläufen gefunden wurde [VÖL9]. Hierzu sei vom **Bild 6.11** ausgegangen. Auf einer Fläche werden fortlaufend Punkte erzeugt, die Teile eines Bildes sind. Im Stadium von Bild 6.11a ist noch nichts Bildhaftes zu erahnen. Im Teilbild b erahnen wir einen großen Kreis, an dessen linken oberen Ende sich noch irgend etwas befindet. Im Teilbild c liegt dann die Vermutung für drei sich überlappende Kreise nahe. Im Endstadium von Teilbild d sind die drei Kreise deutlich, aber gleichzeitig sehen wir, daß es keine idealen Kreise sind. Hieraus lassen sich die drei Phasen des Lernens gut ableiten. Sie sind dabei durch die typischen musikalischen Erfahrungen ergänzt (vgl. [VÖC]).

1. Die Phase der **Verwirrung** liegt immer dann vor, wenn Information auf uns einströmt, der wir keinem Gedächtnisbesitz zuordnen können. Sie verwirrt uns. (vgl. Bild 6.11a). Das gilt z. B. beim erstmaligen Hören von Musik unbekannter Kulturen und | oder Genres. So kann auch in der Regel die ältere Generation nichts mit der typischen Popmusik der Jugend anfangen. Hörer, die sich nur in der europäischen Musikkultur auskennen, finden unmittelbar keinen Zugang zu afrikanischer oder indischer Musik.
2. Die Phase des **Erkennens** und Wiedererkennens liegt dann vor, wenn in der Information einige Strukturen wahrgenommen|erkannt werden (vgl. Bild 6.11b u. c). Ein Klassik gewohnter Hörer erlebt das z. B. beim Hören eines ihm unbekannten Werkes dieser Gattung. Auch beim wiederholten, intensiven Hören der o. g. fremden Musik tritt so etwas meist nach gewisser Zeit ein. Es werden irgendwelche Strukturen gehört und danach als schon Bekanntes wiedererkannt. So etwas bereitet Freude|Genuß, ist also mit positiven Emotionen verbunden.
3. Die Phase der **Strukturierung** entspricht in der Musik dem von Adorno so gelobten analytischen Hören. Wir kennen das Musikstück recht gut und können daher u. a. auch seine Interpretation einschätzen. Die ablaufende aktuelle Information wird ständig mit der „idealen" im Gedächtnis vorhandenen Gestalt verglichen. Neben den typischen Strukturen sind also auch geringe gewollte|zufällige Abweichungen feststellbar (vgl. Bild 6.11d).

Beim Mensch-Technik-Interface können die genannten Effekte sehr leicht (unerwünscht) durch gewisse Wiederholungen auftreten. Sie wirken dann ähnlich wie ein bedingter Reflex.

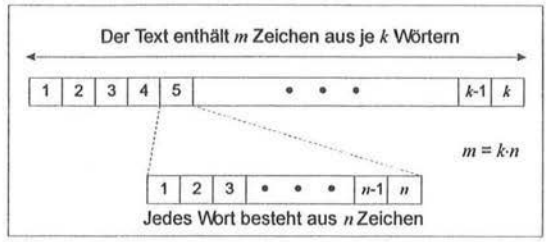


Bild 6.12 Modell zur Bildung von Superzeichen

Bei der Strukturerkennung kann die Bildung von **Superzeichen**, wie sie von Felix Cube eingeführt wurde, wichtig sein. Im einfachsten Falle können wir sie bei einem Metronom wahrnehmen. Seinem ganz regelmäßigen Schlag wird unmittelbar ein Takt zugeordnet. Das gleichmäßige „*tik - tik - tik - ...*" wird z. B. als „*tik - **tak** - tik - **tak** - ...*" mit der Betonung *eines* zweiten Schlages gehört. Aber auch andere Takte ($^3/_4$, $^4/_4$ usw.) lassen sich leicht hineindeuten. Cube hat diesen Zusammenhang vor allem mnemotechnisch untersucht: Wie merke ich mir eine lange Zahl (z. B. siebenstellige Telefonnummer) am besten? Dazu wird von einem längeren Text gemäß **Bild 6.12** ausgegangen. Bei einer angenommenen Gleichverteilung aller Ziffern (Zeichen) besitzt jedes Wort aus n Ziffern (Zeichen) eine Einzel-Entropie

$$H_1 \approx \mathrm{n}\cdot\mathrm{ld}(n).$$

Alle Wörter zusammen liefern folglich

$$H_2 \approx m\cdot\mathrm{ld}(n).$$

Wörter können zu einem Text zusammengefügt werden. Dafür gilt

$$H_3 \approx k\cdot\mathrm{ld}(k).$$

Beides zusammen ergibt wegen $k = m/n$ die Entropie

$$H_{total} \approx m\cdot\mathrm{ld}(n)+\frac{m}{n}\cdot ld\left(\frac{m}{n}\right).$$

Dieser Wert besitzt ein Minimum für

$$m = n\cdot e^{n-1}.$$

Hieraus leitet sich eine optimale Gruppenbildung im Sinne von Superzeichen gemäß der Tabelle ab. Zahlen der Länge 7 bis 23 Ziffern merkt man sich also am effektivsten in Dreiergruppen.

bis zur Wortlänge	Gruppengröße
6 (5,44)	2
23 (22,2)	3
81 (80,3)	4
273	5
891	6
2824	7
8773	8
26829	9
81031	10

6.8 Biorhythmen

Zeit ist oft ein Problem. Nicht nur weil es uns an ihr meist mangelt, sondern auch für ihr Verständnis. Schon Augustinus sagte: „Was also ist Zeit? Solang mich niemand fragt, ist mir's, als wüßte ich's, doch fragt man mich und soll ich es erklären, so weiß ich's nicht". Allein der Zeitpfeil bereitet den Physikern immer noch große Probleme. Leichter verständlich sind dann schon wiederkehrende Vorgänge, wie Tag und Nacht, der Mondzyklus oder die Jahreszeit. Hierauf hat sich offensichtlich das Leben eingestellt. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn diese periodischen Abläufe auch dann erhalten bleiben, wenn die Taktgeber fehlen. Änderungen der Taktgeber machen sich sogar – wie z. B. der Jetlag – sehr störend bemerkbar. Die letzten Jahrzehnte haben deutlich gemacht, daß Leben immer in einer Vielzahl von Rhythmen organisiert ist. Rhythmen scheinen besonders effektive Lösungen durch Synchronisation verschiedener Bereiche zu bieten (vgl. z. B. das EEG, S. 81). Daher ist es für die Mensch-Technik-Schnittstelle wichtig, hierauf Rücksicht zu nehmen. Wie groß die Vielzahl der erkannten Rhythmen ist, zeigt **Bild 6.13** (umseitig). Auffällig ist dabei, daß die vielen Rhythmen aufeinander abgestimmt und z. T. sogar synchronisiert sind. Besonders deutlich fällt dies bei der Atmung und dem Herzschlag auf. Doch darüber hinaus gibt es weitere bekannte Effekte. Beim Hören von Musik treten zusätzliche Synchronisationen und Desynchronisationen auf, die dann offensichtlich mit Emotionen einhergehen.

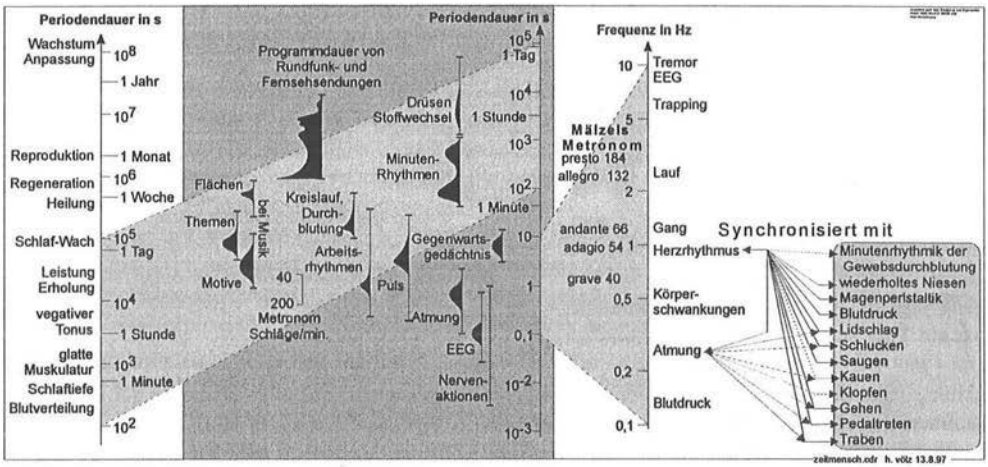


Bild 6.13 zur Vielfalt der Biorhythmen und ihrer Synchronisation

6.9 Identität von Personen

Biometrische, d. h. typische *individuelle*, körpergebundene Merkmale haben vielfältige Anwendungen erlangt. U. a. ermöglichen sie – teilweise sogar besser als Pförtner, Magnetkartenleser, Paßworte, Zahlencodes usw. – den geregelten Zugang zu Orten | Einrichtungen und den eingeschränkten Zugriff auf sicherheitsrelevante Daten. Ihr entscheidender Vorteil besteht darin, daß die individuellen Merkmale nicht wie ein Paßwort vergessen, wie eine Scheckkarte verloren gehen oder gar gestohlen und mißbraucht werden können. Die biometrischen Merkmale sind eben unverlierbar an die *eine* Person gebunden, können daher nicht in den Besitz dritter gelangen. Entsprechend den künftigen Entwicklungen – zunehmender bargeldloser Verkehr, umfangreichere Netze, höhere Verfügbarkeit von Rechnern usw. – wird die Bedeutung der entsprechenden Methoden stark zunehmen. Sie werden immer mehr direkter Bestandteil von Mensch-Technik-Schnittstellen werden. Ein wichtiger Kennwert dabei ist die statistische Sicherheit | Erkennungsrate | Zuverlässigkeit, der gerade erreichte bzw. noch zulässige Fehler. Werte zwischen 1 ‰ und maximal 10^{-8} werden gefordert. Für die sehr kleinen Fehler ist es notwendig, mehrere Merkmale kombiniert anzuwenden. Weiter ist die Zeit wichtig, in der dieser Wert erreicht wird. Besucher wird man z. B. nur wenige Sekunden warten lassen können. Doch nicht nur in der Individualkontrolle erlangen individuelle Merkmale immer mehr Bedeutung, sondern auch in der Medizin. Bei oft nur leicht veränderter Auslegung der Technik können sie nämlich zur Diagnose von Krankheiten | krankhaften Entwicklungen genutzt werden. So zeigt sich aber auch die Gefahr des Nebenbei-Mißbrauchs dieser Techniken bei routinemäßigen Zugangskontrollen. Hier kann nicht das Spektrum aller Methoden behandelt werden. Der folgende kurze Abriß soll nur wesentliche Möglichkeiten ausweisen. Sie betreffen folgende Varianten: Unterschrift, Fingerabdruck, Hand- und Fingerform, Iris und Hintergrund des Auges, Gesicht, Stimme, Erbgut.

Die persönliche (handschriftliche) **Unterschrift** ist wohl das älteste und zugleich verbindliche Individualmerkmal. In ihrer üblichen, rein bildlichen Form ist sie jedoch relativ leicht manuell nachzumachen, zu fälschen. Auch besteht heute die Möglichkeit, sie als reines Pixelbild in „Dokumente" einzufügen. Diese Probleme sind z. B. bei Scheckformularen bekannt. Nach Einschätzung des Bundeskriminalamtes werden in Deutschland jährlich rund 150 000, meist als Vordruck gestohlene Schecks gefälscht. Trotz der Vielzahl der Schecks werden die Unterschriften heute noch überwiegend durch Betrachtung von Spezialisten geprüft. Dabei werden vielfältige, auch graphologische Merkmale, wie Silhouette, Schrägstellung, Breite und Höhe einzelner Zeichen, Korpus, Unter- und Oberlän-

ge, Schleifenbildung und Schriftstärke (Druck) berücksichtigt. Perfekter ist eine Schriftanalyse natürlich bei längerem, fließend geschriebenem Text. Für eine Nutzung bei der Schnittstelle muß daher ähnlich viel einbezogen werden. Eine Lösung könnte die „*Persönliche digitale Unterschrift*" sein. Sie benötigt ein drucksensibles Tablett. Dadurch können zusätzlich die Schreibgeschwindigkeit und der Schreibdruck einbezogen werden. Diese beiden Werte sind erfahrungsgemäß nicht manuell nachzumachen und können auch nicht im Pixelbild festgehalten werden. In einer Zertifizierungsstelle (z. B. eine Bank) wird die Unterschrift mehrmals vollzogen. Daraus werden typische Parameter des Drucks und der Geschwindigkeit berechnet und zusätzlich zum Schriftbild gespeichert. Jede neue manuelle Unterschrift kann so sehr zuverlässig als richtig oder falsch klassifiziert werden. Ja es kann sogar eine automatisch Anpassung an langsame und sich wiederholende Veränderungen erfolgen. Vorteilhaft ist weiter, daß solche Tabletts zuverlässig arbeiten, preiswert herzustellen und sogar relativ sicher gegen Vandalismus sind. Außerdem kann die Zuverlässigkeit und damit der rechentechnische Aufwand unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen, z. B. der Größe des abzuhebenden Betrages, angepaßt werden.

Der **Fingerabdruck** wurde erstmalig 1892 in Argentinien benutzt. Dabei wurde ein Doppelmord über das Abbild eines blutigen Daumenabdrucks aufgeklärt. Im Polizeibüro von La Plata hatte man eine Identifizierungs- und Archivierungsmethode für Fingerabdrücke entwickelt. International setzte sich der individuelle Fingerabdruck aber erst durch, nachdem Scotland Yard 1901 die Einteilung nach dem sogenannten Galton-Henry-Verfahren eingeführt hatte. Andererseits wußten die Japaner schon seit Jahrhunderten von der Unverwechselbarkeit der Fingerabdrücke. Sie wurden nämlich vom einfachen Volk als Unterschrift benutzt. Heute ist sicher, daß das Bild der Papillarlinien (= Tastlinien = Hautleisten) äußerst individuell für jeden Menschen ist. Nur mit etwa 1:10 000 000 treten ähnliche Muster auf. Sogar rechts und links sind unterschiedlich. Die Merkmale sind nicht einmal erblich. Selbst bei absichtlicher Zerstörung wachsen die Linien praktisch identisch nach. Erst wenn auch die Unterhaut zerstört wurde, gibt es gewisse Veränderungen. Einige typische Kennzeichen von Fingerabdrücken faßt **Bild 6.14** zusammen.

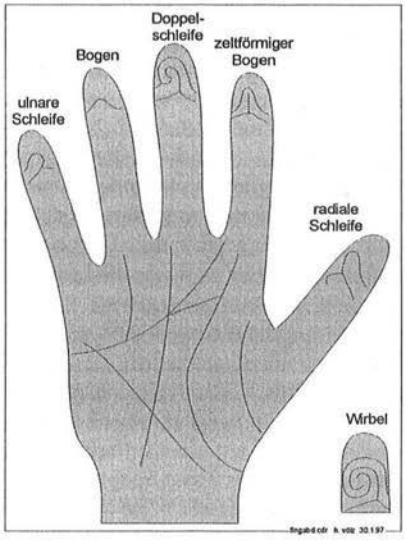


Bild 6.14 typische Kennzeichen eines Fingerabdrucks

Die Hauptanwendungsbereiche des Fingerprints sind Kriminalistik, Immigration, Asylwesen, innere Sicherheit, Sozial- und Einwohnerwesen. Für die Archivierung werden bislang Farbabdrucke verwendet. Damit Säuglinge diese nicht unbeabsichtigt in den Mund bekommen, werden für sie bevorzugt Fußprints verwendet. Sie besitzen die gleiche Individualität. Die notwendige Speicherkapazität ist beachtlich. Je Finger sind etwa 0,5 MByte erforderlich, für einen Zehnfingerprint also 5 MByte. In den USA sind heute etwa $3 \cdot 10^7$, in Großbritannien $4{,}5 \cdot 10^6$ und in Deutschland ca. $5 \cdot 10^6$ Personen erfaßt. In Großbritannien werden deshalb WORM-Platten zu je 9 GByte verwendet, die in drei Jukeboxen zu je 1300 Platten gelagert sind. Solche systematische Erfassung ist eine wichtige Voraussetzung dafür, daß Fingerabdrücke schnell durch Vergleich zum individuellen Erkennen ausgewertet werden können. Sie entstehen durch unbeabsichtigte Fett- und Schweißabsonderung auf angefaßten Gegenstände und übertragen dabei die Papillarlinien.

Der Einlaßdienst bzw. die Zugangskontrolle bringen für die Nutzung des Fingerprints neue Probleme. Einmal sind spezielle Life-Scanner erforderlich. Bewährt hat sich hier z. B. ein Prisma mit Totalreflexion, die durch Auflegen des Daumens oder Fingers von den anliegenden Papillarlinien gestört wird. Weiter muß das System auch z. B. nach harter Gartenarbeit übers Wochenende zumin-

dest noch brauchbar funktionieren. Mit relativ einfachen Systemen (nur Daumen) konnten bereits gegenüber dem Eindringen unerwünschter Personen Zuverlässigkeiten von 10^4:1 erreicht werden. Ein „Zugelassener" wurde dabei mit etwa 1 % abgewiesen. Aber er kann ja den Versuch schnell wiederholen. Für den erneuten Fingerprint gilt dann wieder die gleiche Wahrscheinlichkeit.

Betrachtet man den bisher geschilderten Aufwand, so ist es geradezu erstaunlich, daß auch viel einfachere Merkmale bereits erfolgreich sein können. So können in Sonderfällen bereits Abmessungen von Körperorganen ausreichen. Seit 1993 wird auf dem John F. Kennedy- und Newak-Flugplatz für Vielflieger ein **einfacher Handabdruck** erfolgreich eingesetzt. Dabei werden die Größenverhältnisse der Finger aus zwei Richtungen bestimmt, und mit entsprechenden Daten im Personaldokument automatisch verglichen. In diesem Sinne können sich also – sofern nur eine kleine Gruppe in Betracht kommt – noch völlig neue und dazu fast triviale Möglichkeiten auftun.

Das **Auge** bietet gleich zwei individuelle Merkmale an: die Iris (Regenbogenhaut) und den Augenhintergrund (u.a. Verlauf der Adern). In beiden Fällen ist es notwendig, in eine speziell dazu hergerichtete Kamera zu blicken. Dabei sind nur teilweise Brillen und Kontaktlinsen störend, jedoch ist Brillenputzen häufig wichtig.

Die farbige **Regenbogenhaut** (Iris) ist bereits im ersten Lebensjahr typisch ausgeprägt. Auch hier sind Rechts-Links-Unterschiede vorhanden. Selbst eineiige Zwillinge unterscheiden sich in der Iris. Es lassen sich etwa 400mal so viele Merkmale wie beim Fingerabdruck gewinnen. Sie gilt daher oft als das individuellste Kennzeichen. Technisch erfolgt der Irisscan im Abstand von etwa 25 cm bis 1m mit mehreren kurz aufeinander folgenden Aufnahmen. Die Schwankung der Pupillenöffnung dient zur Erkennung, ob ein lebendes Auge vorliegt. Je nach Aufwand und Anwendung werden etwa zwischen 256 Byte und mehreren kByte je Person gespeichert. Die Vergleichszeit in der Datenbank beträgt nur wenige Sekunden. Die größte Anwendung steht wahrscheinlich bei Geldautomaten bevor. Man hofft hiermit z. B. die PIN (Personal Identification Number) ersetzen zu können. Mehrere Firmen bieten bereits Lösungen an.

Der **Augenhintergrund** (eyedentify) hat schon lange in der Medizin seine Bedeutung, u. a. zum Erkennen von Krankheiten. Das hier sichtbare Verzweigungsmuster der Blutgefäße (Venen) hat ebenfalls stark individuelle Ausprägung. Hierauf beruhende Verfahren haben sich bereits bei der Einlaßkontrolle bewährt. Nachdem ein grüner Punkt anvisiert ist, erfolgt mittels eines Lichtblitzes eine Aufnahme mit einer Infrarotkamera. Bei Infrarot heben sich Blutgefäße nämlich besonders kontrastreich von der Umgebung ab. Im typischen Fall werden aus etwa 200 Datenpunkten rund 100 Byte codiert.

Das individuelle **Gesicht** hat für alle Menschen besondere Bedeutung. Während sich die meisten Tiere am Geruch erkennen, vollziehen wir es übers Gesicht. Die von ihm ausgedrückte emotionale Befindlichkeit ist für unsere zwischenmenschlichen Beziehungen von großer Bedeutung. Auge und Gedächtnis haben sich für diese Aufgabe spezialisiert. So sind wir in der Lage, Tausende von Gesichtern im Gedächtnis zu speichern und sie oft auch noch nach Jahren wiederzuerkennen, selbst wenn Alter und Umwelt deutliche Spuren hinterlassen haben. Dennoch können wir – die Kriminalistik kennt die Probleme – sehr schlecht unbekannte Gesichter speichern oder beschreiben. Untersuchungen mit Karikaturen haben gezeigt, daß wir dabei die Personen doppelt so schnell erkennen, wie bei üblichen realistischen Strichzeichnungen oder Photographien. Da *Karikaturen* die vom Durchschnitt abweichenden Merkmale eines Gesichts übertrieben darstellen, wird vermutet, daß wir uns Gesichter in Form von Karikaturen – wie eine Art Stenokürzel – einprägen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß Lächeln nur 17 Gesichtsmuskeln, Zorn jedoch 43aktiviert. Bis zu zehntausend Ausdrucksvarianten sind uns möglich.

Auf diesem Hintergrund wird verständlich, warum in mehreren Religionen die Darstellung von Gesichtern verboten war | ist. Noch immer wehren sich in einigen Gegenden Menschen gegen Photographieren. Selbst für uns ist das Paßbild der „offizielle" Identitätsnachweis. Bei solch komplexem Hintergrund ist es nur zu verständlich, das jeder Fortschritt bei der automatischen Gesichtserkennung zugleich neue Ängste weckt. Dennoch ist wenig bekannt, was hier bereits in der Technik üblich ist.

So gibt es bereits räumliche Bezirke (nicht nur Hochsicherheitstrackte und Banken), die ständig von vielen Videokameras überwacht werden. Neuere Forschungsergebnisse lassen erkennen, daß sogar in üblichen Videosequenzen Gesichter automatisch zu erkennen sind, und daß es weiter möglich ist, Szenen auf das Geschehen hin zu analysieren. Mit sehr hohem Aufwand wird bei einigen VIPs (Very Important Persons) der Zutritt über automatische Gesichtserkennung geregelt.

Automatische Gesichtserkennung ist sehr schwierig. Sie muß aus verschiedenen Richtungen erfolgen. Hierbei haben sich spezielle Morphing-Verfahren bewährt, die Drehungen um ±30° korrigieren können. Änderungen mit dem Altern, Ab- oder Zunehmen usw. sind mit solchen Programmen ebenfalls zu berücksichtigen. Aber auch das Schneiden von Grimassen, Lachen oder Weinen darf die Erkennung genauso wenig stören, wie das neuerliche Tragen einer Brille, ein Dreitagebart oder unterschiedliches Schminken. Das Hinhalten einer gleich aussehenden Wachspuppe wird durch das Kontrollieren von typischen, teilweise individuellen Wärmemustern ausgeschaltet. Ein wesentlicher Vorteil solcher Methoden besteht darin, daß bei jedem unerlaubtem Eindringen sofort ein Photo bereitsteht. Leistungsfähige Erkennungsmethoden arbeiten heute bevorzugt mit neuronalen Netzen. Einfache Methoden wählen weniger als hundert typische Punkte auf einem Gesicht aus und stellen daraus die Daten zusammen. Da in diesem Buch nur die Konsequenzen bis zur Hardware – also hier Videokamera – betrachtet werden, kann auf weitere Details verzichtet werden.

Auch die menschliche **Stimme** ermöglicht eine Individualerkennung. Im Gegensatz zur Spracherkennung müssen besonders die Einflüsse des typischen anatomischen Aufbaus vom Kehlkopf, von den Nasen- und Rachenräumen sowie die Sprechgewohnheiten (Dialekt) erfaßt werden. Dafür genügt praktisch der Frequenzbereich von 100 Hz bis 4 kHz. Wegen langsamer Änderung der Sprechgewohnheiten muß ein solches System immer lernfähig sein. Für den Zugang | Zutritt können recht einfache Methoden angewandt werden. Hier kann nämlich durch die zusätzliche Nutzung von Paßwörtern leicht eine zusätzliche Sicherheit erreicht werden. Störend wirken sich jedoch alle zufällig auftretenden Geräusche aus. Typische Systeme erzeugen aus der Sprache alle zehn Millisekunden etwa zwanzig Koeffizienten als Bezugsdaten. In der Anwendung wird der Abstand zu ihnen ermittelt.

Die **Erbgutanalyse** (z. B. aus Hautschuppen und Haaren) dürfte die höchste Individualspezifik besitzen. Sie ist jedoch heute noch so speziell und komplex, daß sie nur in der Kriminalistik angewendet wird.

6.10 Gefahren

Über die Mensch-Technik-Schnittstelle können sich leicht Gefahren ergeben. Hier sollen nur drei relativ einfache Fälle erwähnt werden. So kann einmal durch Ströme oder Felder der Mensch in seiner Gesundheit oder gar in seinem Leben gefährdet werden. Hierzu zeigt **Bild 6.15** a u. b einige typische Grenzen auf. Umgekehrt kann auch der Mensch durch seine elektrische Aufladung empfindliche Meßapparaturen zerstören. Dafür typische Werte enthält Bild 6.15c.

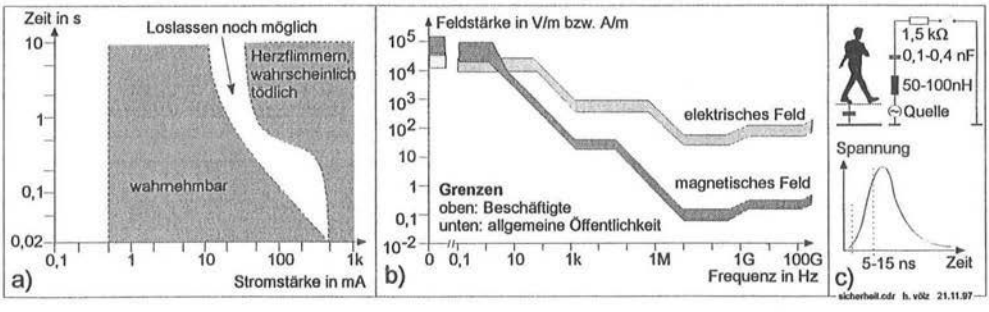


Bild 6.15 Beispiele für Grenzwerte der Belastung des Menschen (a, b) und für mögliche Impulsstörungen durch elektrische Aufladung des Menschen (c)

7 Physikalisch-chemische Grundlagen

7.1 Überblick und Systematik

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die physiologischen Voraussetzungen für die Mensch-Technik-Schnittstelle behandelt wurden, ist es jetzt notwendig, die technische Gegenseite zu betrachten. Wird sie in den Mittelpunkt gestellt, so ergibt sich die Darstellung von **Bild 7.1**. In ihr ist bereits der Datenverarbeitungsteil, der in diesem Buch ja nicht behandelt wird, ausgeblendet. Links im Bild befinden sich die menschlichen Bezugspunkte, die entweder Signale bewußt erzeugen oder von denen meßtechnisch Signale abgeleitet werden können. Hier wird also noch einmal die Unterscheidung aus der Einführung wiederholt (vgl. S. 2ff.). Signale werden dadurch gewonnen, daß

- wir an der Schnittstelle bewußt aktiv tätig werden,
- sie mit unserem Einverständnis durch Sonden und dergleichen ableitbar sind,
- sie auch ohne unser Zutun und ohne unser Wissen gewonnen werden können.

Weiter wird deutlich, daß mehrere meßbare menschliche „Größen" unterschiedlichen Einflußbereichen angehören können. So können wir der Technik mit der Sprache sowohl Befehle erteilen als auch nur einfach Information zur Verarbeitung übergeben. Uns nicht bewußt werdend, kann sie aus unserem Lachen oder Fluchen etwas entnehmen, was zumindest primär nicht für sie bestimmt ist. Ähnlich steht es mit der Motorik: Über Maus und Tastatur geben wir sowohl Befehle als auch Information an die Technik weiter. Werden von ihr unsere Minen, Gesten und Gebärden beobachtet, so gewinnt sie etwas, was für sie nicht möglich sein sollte. In anderer Einteilung sind für die Ableitungstechniken unterschiedliche physikalisch-chemische Größen erforderlich, die entsprechende Sensoren bedingen. Beispiele dafür sind im Bild 7.1 eingetragen.

Beim Einwirken der Technik auf den Menschen sind die Zusammenhänge einfacher. Sie betreffen dann nur unsere Sinne und mittelbar unser Gehirn und Nervensystem. Während das Auge nur mit sichtbarem Licht und das Ohr nur mit hörbarem Schall zu beeinflussen sind, kann die Haut und damit unser gesamter Körper von faßt allen Signalen erreicht werden. Mund und Nase verlangen stoffliche (chemische) Einwirkungen. Stimulationen vom Gehirn und Nervensystem sind bisher nur per Licht (Infrarot) und durch elektrische bzw. magnetische Felder bekannt.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit allen aus der Technik bekannten Verfahren, so zeigt sich, daß für die Mensch-Technik-Schnittstelle nur ausgewählte Sensoren und Aktoren Bedeutung besitzen. Allein wegen ihrer Größe und Leistung scheiden viele Methoden aus, die im Maschinenbau, Transport- und Energiewesen genutzt werden. Weiter entfallen Methoden, für die wir keine nutzbare Sensibilität

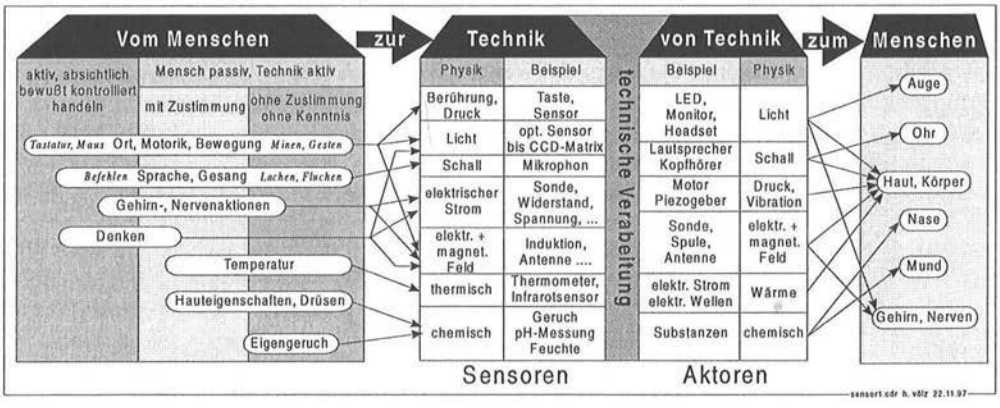


Bild 7.1 Technische Sicht der Mensch-Technik-Schnittstelle

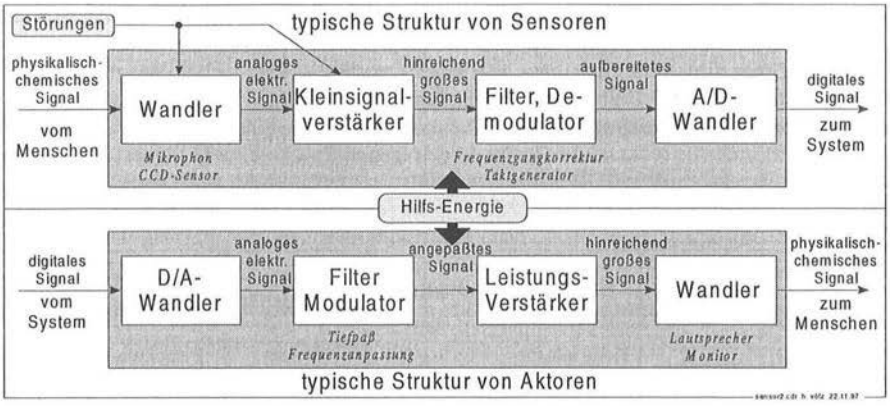


Bild 7.2 Typische Struktur von Sensoren und Aktoren

besitzen. Hier sind u. a. Drehzahlmessung (Tachometer), Pyrosensoren, Taupunktmessung, Vakuumtechnik und hochenergetische Strahlung (Röntgenstrahlung, Radioaktivität) zu nennen. Mehrere Techniken werden auch nur in einem sehr beschränkten Bereich benötigt, die Temperaturmessung z. B. von etwa 10 bis 50 °C. Dennoch handelt es sich bei den Sensoren und Aktoren der Mensch-Technik-Schnittstelle um eine sehr große Vielfalt, deren Systematik kaum möglich ist.

Sensoren und Aktoren sind meist zusammengesetzt (**Bild 7.2**) und arbeiten für gewöhnlich mit einer *Hilfsenergie*, die für die einzelnen Baugruppen erforderlich ist. Die Automatisierungs- sowie Meß- und Steuerungstechnik verwenden dafür elektrische, pneumatische oder hydraulische Prinzipien. Von seltenen Ausnahmen – wie die Bewegung des ganzen Menschen – kommt für die hier betrachtete Mensch-Technik-Schnittstelle nur die elektrische Energie in Betracht. Sie wird im weiteren ausschließlich berücksichtigt. Ein wesentlicher Teil der Sensoren und Aktoren sind ihre Wandler, die vorwiegend *physikalische Effekte* nutzen. Die Wandler der Sensoren setzen das zu messende Signal in eine elektrische Größe um. So wird z. B. bei einem Mikrophon die Kapazität beim Schwingen der Membran geändert. Die Aktoren müssen dagegen ein elektrisches Signal in die für den Menschen wahrnehmbare Größe umsetzen. Beim Lautsprecher wird dazu die Membran durch die elektrisch erregte Schwingspule so bewegt, daß Schall entsteht.

Im Bild 7.2 werden für die elektrische Seite einschränkend *digitale Signale* angenommen. Entsprechend dem Stand der Technik ist dies heute fast ausnahmslos der Fall. Dann sind der Analog-Digital- bzw. der Digital-Analog-Wandler erforderlich. Für die seltenen Ausnahmen – wo noch analoge Verarbeitung erfolgt – können beide natürlich entfallen.

Beim *Sensor* fallen z. T. sehr kleine Signale an. Sie müssen dann mit einem Kleinsignalverstärker vergrößert werden. So können Störungen (Rauschen) wirksam werden. Sie kann aber auch schon das Eingangssignal enthalten, z. B. durch Geräusche aus der Umgebung. Um sie zu reduzieren, sind Filterschaltungen erforderlich. Einige Sensoren geben die umgewandelten elektrischen Signale auch nur analog – amplituden-, frequenz- oder impulsmoduliert – ab. Dann ist eine Demodulation erforderlich. Weitere Details sind nur an speziellen Sensoren zu diskutieren.

Bei den *Aktoren* müssen die diskreten Werte des D/A-Wandlers durch Filter geglättet werden (Antialaising). Ferner wird bei den Aktoren stets eine gewisse Energie für den Wandler benötigt. Sie muß über einen Großsignalverstärker erzeugt werden. Details werden bei speziellen Aktoren behandelt.

Für eine Systematisierung der **Sensoren** wurde die morphologische Methode angewendet. In der umseitigen Tabelle sind dafür in der linken Spalte die Einflußgrößen, die auf die Sensoren wirken, zusammengestellt. Oben in der Tabelle befinden sich die zu beeinflussenden Größen. Aus den schon genannten Gründen wurden nur elektrische Kenngrößen berücksichtigt. Das betrifft einmal die Eigen-

schaften der Bauelemente: Widerstand, Kondensator und Induktivität. Zum anderen läßt sich auch die Gegeninduktivität ändern. Sie betrifft bei Transformatoren | Übertragern das Übertragungsmaß | die Kopplung. Die Erzeugung einer Spannung oder eines Stromes ist eine weitere Möglichkeit. Schließlich wurden noch allgemeine Halbleitereigenschaften berücksichtigt. Hier liegen nämlich vielfältige Effekte vor, die sonst kaum zu erfassen sind. Natürlich ist so ein Schema immer unzulänglich und teilweise etwas formalistisch. So sind z. B. die eingetragenen Beispiele nicht immer gleichwertig. Die Tabelle weist die große Vielfalt der Wirkungsmechanismen für Sensoren aus. Dennoch sind nicht alle erfaßt.

		Widerstand	**Kapazität**	**Induktivität**	**Gegen-induktivität**	**Spannung erzeugen**	**Halbleiter-eigenschaft**
mechanisch	**Druck, Zug**	Dehnungs-meßstreifen, Kontakt	Kondensator-Membran	Luftspalt, Spulenlänge	Spulen-abstand	Piezokera-mik, Quarz	Kristallgitter-änderung
	Schwin-gung	Kohle-mikrophon	Kondensator-mikrophon	Luftspalt, Spulenlänge	Spulen-abstand	Schwing-spule	Kristallgitter-änderung
	Ort, Bewegung	Potentiome-ter, Kontakt, Schalter	Platten-abstand	Luftspalt, Spulenlänge	Lage der Spulen	Induktion, elektr. Feld im Raum	Dehnungs-meßstreifen
elektrisch		nichtlinearer Widerstand	elektr. Per-meabilität	über Vorma-gnetisierung	über Vorma-gnetisierung		Feld- und Tunneleffekt
magnetisch		Magnetdiode, Reed-Kontakt		magn. Per-meabilität	magn. Per-meabilität	Halleffekt	Magnetdiode
optisch		Photowider-stand				Photoelement	Photodiode, CCD
thermisch		Heiß-, Kaltleiter	elektr. Per-meabilität	magn. Per-meabilität	magn. Per-meabilität	Thermo-element	Ladungs-trägerzahl
chemisch		Stoff-aufnahme	Stoff-aufnahme			chemisches Potential	Stoff-aufnahme

Bei dieser Tabelle kommt nur mittelbar die Notwendigkeit der *Hilfsenergie*, wie sie für die meisten Sensoren unbedingt erforderlich ist, zur Geltung. Durch sie kann nämlich gleichzeitig eine Verstärkung erreicht werden. Zumindest teilweise ist keine Hilfsenergie bei den Sensoren der Spalte „Spannung erzeugen" notwendig. Hier ist dafür aber meist eine zusätzliche Verstärkung unbedingt erforderlich. Eine detailliertere Beschreibung der verschieden Prinzipien für Sensoren ist nur sehr bedingt nach der Einteilung der Tabelle möglich. In den folgenden Abschnitten werden daher Schwerpunktbildungen zu mechanischen, magnetischen, optischen und chemischen Sensoren durchgeführt. Andere Systeme, soweit sie für dieses Buch von Bedeutung sind, werden diesen Gebieten zugeordnet. So sind Beispiele für Temperaturmessungen z. B. den chemischen Sensoren zugeordnet. Weiter sei darauf hingewiesen, daß fertige Baugruppen der Peripherie, wie Tastatur, Maus usw. im Kapitel 8 „Eingaben" getrennt behandelt werden.

Für die **Aktoren** ist eine Tabelle wie für die Sensoren nicht sinnvoll. Entsprechend der für dieses Buch getroffenen Auswahl ist für sie die Eingangsgröße ja immer elektrisch. Unterschiede ergeben sich also nur bezüglich der Eigenschaften der zu beeinflussenden Sinnesorgane. Deshalb gibt die umseitige, einfache Aufzählung einen hinreichenden Überblick.

Auge: *Lichtsignale*, z. B. von Lampen, Leuchtdioden usw.
Symbolanzeigen von Ziffern, Buchstaben, Sonderzeichen oder kurzem Text
Displays für Bilder, Grafik, Text usw.
Stereobilder über verschiedene Techniken

Ihre Vielfalt ist so groß, daß nur ein kleiner Teil angedeutet werden konnte. Da sind einmal die verschiedenen selbstleuchtenden Varianten, wie Leuchtdioden, kleine Anzeigen, Monitore und Flachdisplays. Andere Anzeigen – wie LCD-Einrichtungen – benötigen Zusatzlicht. Weiter existieren mehrere Großprojektionstechniken und Einrichtungen, die wie ein Headset direkt vor dem Auge angebracht werden. Schließlich sind auch noch Spezialbrillen für räumliches Sehen zu nennen.

Ohr: *Schallsignale* zur Warnung oder mit Inhalt, wie Sprache, Gesang, Musik

Für diese Aktoren kommen praktisch nur Lautsprecher, Kopfhörer und Ohrhörer in Betracht. Ihre Vielfalt ist aber so groß, daß ihnen der gesamte Abschnitt 9.3 gewidmet ist.

Haut|Körper: *mechanisch*: als Druck, Vibration
mittels *Temperatur|Feuchte|Elektrizität*
Nase|Mund: *chemische Substanzen*, vor allem Gase, Flüssigkeiten
Gehirn|Nerven: *elektrischer Strom*, mittels implementierter Sonden
elektrische|magnetische Felder

Für die drei letzten Gruppen gibt es z. Z. noch wenig Aktoren. Das hängt natürlich auch mit ihrer relativ seltenen Anwendung zusammen. Sie werden daher in Abschnitt 9.4, ab S. ### behandelt.

Detaillierter wird auf die Grundlagen der Aktoren in den Abschnitten 7.6 bis 7.8 eingegangen. Den komplexen Baugruppen, wie Lautsprecher, Monitore usw. ist das Kapitel 9 „Ausgaben" ab S. 202 gewidmet

Neben den bisher behandelten direkten Methoden der Mensch-Technik-Schnittstelle gibt es auch **mittelbare, indirekte Ein- und Ausgaben**. Ihnen ist die Kapitel 8 u. 9 gewidmet. Sie übernehmen für uns zwischenzeitlich wichtige Funktionen. Statt einer direkten Beeinflussung erfassen z. B. Kameras und Scanner Bilder und Texte, die zumindest zeitweilig gespeichert werden. Sie stehen uns dann zu gegebener Zeit zur Verfügung. Umgekehrt werden mit Druckern|Plottern die Bilder|Texte auf Papier übertragen, so daß sie von uns bei Bedarf betrachtet|gelesen werden können. Im weitesten Sinne sind hier auch Belichter für die Filmausgabe zu nennen.

7.2 Mechanische Sensoren

In diesem Abschnitt werden nur die einfachen Grundlagen der mechanischen Sensoren behandelt. Zusammengesetzte feste Baueinheiten, wie Maus, Tastatur und Mikrophon, sowie hochkomplexe Einrichtungen, z. B. zur Ermittlung von Bewegung und Geschwindigkeit, sind im Abschnitt 7.2.4 ab S. 99 und Kapitel 8 ab S. 149 erfaßt.

7.2.1 Schalter und Tasten

Die wohl einfachsten, mechanischen Sensoren sind Taster und Schalter. Damit sie optimal von uns bedient werden können, müssen auch sie einige Besonderheiten erfüllen. Ein guter **Schalter** sollte z. B. eindeutig und auch „fühlbar" umschalten. Hierzu muß er einen genau definierten Druckpunkt besitzen. Wie dies technisch zu realisieren ist, zeigt beispielhaft **Bild 7.3a** (umseitig). Beim Bewegen in die Gegenrichtung wird die Schraubenfeder gespannt. Die maximale Spannung wird dabei genau in der Mittelstellung erreicht (rechtes Teilbild). Diese Lage ist aber labil und wird durch eine ganz geringe Kraft in eine der beiden Endstellungen überführt. Gleichzeitig sorgt die Feder in den beiden Endstellungen für einen guten Kontaktdruck. Durch das Lagerspiel des zweiten Hebels im Schlitz existiert zusätzlich eine geringe Lose, die diesen Effekt noch erhöht. Überträgt man das Verhalten eines solchen Schalters in ein ideales Kraft-Weg-Diagramm, so entsteht Bild 6.3b. Nur der grau unterlegte

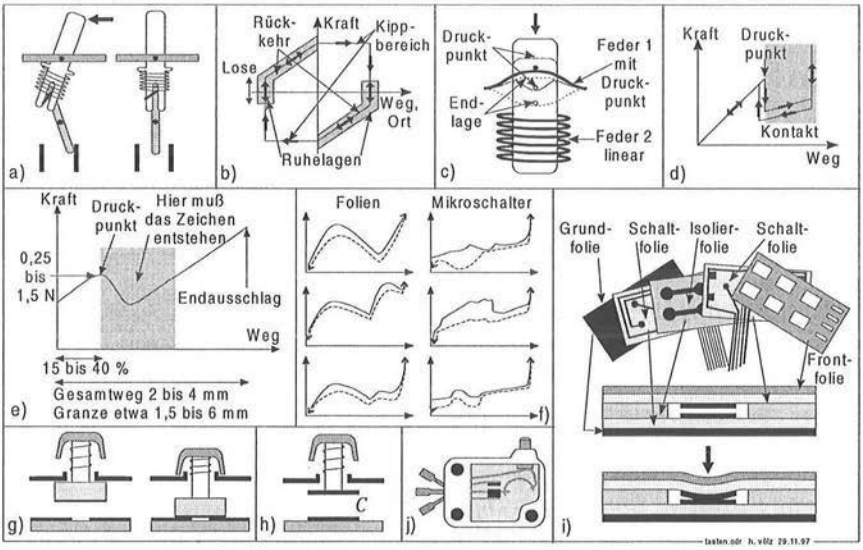


Bild 7.3 Überblick zu Schaltern und verschiedenen Tasten

Bereich wird manuell betätigt und ist daher gewollt vor- und rückwärts zu durchlaufen. Der andere, einseitig gerichtete Teil wird allein durch die Federkraft verwirklicht. Solche und ähnliche Anordnungen (deren es sehr viele gibt, z. B. Bild 7.3j) verlangen einen beachtlichem technologischen Aufwand. Deshalb genügen viele Schalter nicht diesem wichtigen Funktionsprinzip. Sie sind dann nicht einwandfrei und zuverlässig zu bedienen.

Noch höher sind die Anforderungen an einen **Taster**, der nach seiner Betätigung wieder in die Ruhestellung zurückkehren soll. Auch er sollte einen Druckpunkt besitzen, ab dem der Kontakt geschlossen (oder geöffnet) wird. Ein Beispiel für eine solche Funktion zeigt Bild 7.3c. Der Druckpunkt ist hier durch die Flächenfeder 1 realisiert. Sie besitzt wieder zwei stabile Endlagen und eine mittlere labile Lage. Damit die Taste automatisch in die Ruhestellung zurückkehrt, ist zusätzlich eine Schraubenfeder 2 erforderlich. Sie muß im gedrückten (komprimierten) Zustand etwas mehr Rückstellkraft erzeugen, als es für die Erreichung der labilen Lage von der Feder 1 erforderlich ist. Das zugehörige ideale Kraft-Weg-Diagramm zeigt Bild 7.3d. Auch für dieses Prinzip existieren viele technische Realisierungen. Für Rechner-Tastaturen gibt es typische Kenngrößen. Sie sind in Bild 7.3e zusammengestellt. Übliche Tastaturen besitzen heute eine Lebensdauer von mindestens 30 Millionen Zyklen. Der typische Tastenweg liegt bei 3,75 mm ± 0,25 mm. Gemessene Kurven an einigen käuflichen Tastaturen (Bild 7.3f) lassen deutlich zwei Tastaturarten in ihren Eigenschaften unterscheiden: die mit Schaltern und die mit Folien. Dabei gelten im Mittel folgende Werte (der zweite immer für Folientastaturen): Tastenhub 1,25|2,5 mm (± 0,25 mm); maximale Anschlagstärke 55|70 g (± 10 g), Auslösungspunkt 2,75|2,5 mm und Rückstellkraft mindestens 15|20 g. Damit bei Tastaturen ohne deutlichen Druckpunkt überhaupt eine „fühlbare" Rückmeldung an den Bediener auftritt, wird mit der Kontaktgabe meist ein akustisches Signal (Piepton) ausgelöst. Das ist aber nur teilweise ein Ersatz und wirkt nicht selten störend.

Den typischen Aufbau einer Folientastatur zeigt Bild 7.3i. Auf einer Grundfolie befinden sich die Schaltfolie mit entsprechenden Kontaktstellen. Darüber ist eine Isolierfolie angeordnet. Sie hat dort Öffnungen, wo bei Andruck von oben der Kontakt entstehen soll. Er wird von der darüber liegenden flexiblen zweite Schaltfolie hergestellt. Schließlich befindet sich darüber eine Schutz- bzw. Frontfolie mit Aufdrucken. Es ist nur zu leicht einzusehen, daß dieser Aufbau kaum einen Druckpunkt ermöglicht. Selbst die Kontaktbildung ist nur bei relativ hohem Druck stabil. „Wackelkontakte" sind bei

mittlerem Andruck nichts Außergewöhnliches. Denn ein mechanisches Gefühl dafür, wann der Kontakt auftritt, ist kaum zu erreichen.

Die Vielzahl der Kontaktgebung bei Tasten ist sehr groß. So zeigt Bild 7.3g eine Variante, bei der mit leitendem Gummi an der Taste, Kontakte auf der Grundplatte geschlossen werden. Auch kapazitive Tastaturen, die keine Kontaktabnutzung zeigen, sind möglich (Bild 3.7h). Dafür ist aber ein erhöhter Schaltaufwand für die Auswertung der Kapazitätsänderung notwendig. Beides gilt gleichermaßen für Tastaturen mit Hall-Sensor (vgl. S. 101). Hier steuert ein bewegter Magnet den Kontakt. Ferner sind Tastaturen mit Mikroschaltern (engl. microswitch) im Gebrauch. Sie besitzen meist einen deutlichen Druckpunkt. Solche Schalter zeichnen sich durch ihre lange Haltbarkeit und Lebensdauer aus. Sehr zuverlässig sind auch Tastaturen mit sogenannten REED-Schaltern (vgl. S. 100).

Tasten besitzen große Ähnlichkeit mit **Näherungssensoren**. Sie haben nur festzustellen, ob ein Objekt sich nähert oder entfernt. Mit ihnen werden z. B. sich automatisch öffnende Türen versehen. In der Automatisierungtechnik besitzen sie umfangreiche Anwendungen. Sie können u. a. nach denselben Prinzipien wie die Sensoren bei den Tastatataturen aufgebaut sein, u. a. also induktiv | kapazitiv wirken. Weiterhin sind thermische, optische und magnetische Varianten möglich (vgl. Abschnitt 7.3 bis 7.4).

7.2.2 Dehnungsmeßstreifen

Die DMS (Dehnungs-Meß-Streifen) haben als Sensoren für mechanische Kräfte jeglicher Art eine äußerst große Anwendungsbreite erreicht. Sie sind sehr robust, vertragen ohne wesentliche Änderung ihrer Eigenschaften viele Lastwechsel, enthalten keine bewegten Teile und sind nur wenig temperaturabhängig. Für ihren Widerstand gilt die allgemein übliche Beziehung

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

Durch mechanische Einflüsse (hauptsächlich Zugbelastung) kann sich darin sowohl die Länge l wie der Querschnitt A und | oder der spezifische Widerstand ρ ändern. Bei Metallen wird vielfach ein dünner Widerstandsdraht von 0,018 bis 0,025 mm ∅ verwendet, der mäanderförmig auf eine Kunststoffolie gewickelt wird. Dann ändert sich fast nur die Länge. Es gilt daher

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{mit } k \approx 2.$$

Die genaueren Werte für k betragen bei Konstantan ≈ 2,1, für Nichrome ≈ 2,2 und für Isoelastic ≈ 3,3. Vielfach werden aufgedampfte oder geätzte Schichten verwendet. Sie sind u. a. besser in Massenfertigung herzustellen. Die k-Werte hängen dann von mehreren Parametern ab. Immer mehr wird auch entsprechend aufbereitetes Halbleitermaterial genutzt. Hierbei werden vorteilhaft k-Werte um hundert erreicht. Die relativ geringen Widerstandsänderungen erfordern immer Brückenschaltungen von meist zwei DMS, von denen nur einer mechanisch beansprucht wird. Den typischen Aufbau von DMS zeigt **Bild 7.4e** (umseitig) in zwei Varianten. Die einfache linke reagiert fast nur auf Zug in der Längsrichtung. Mit den drei DMS, die gemäß dem rechten Bild auf einem Substrat angeordnet sind, kann Zug für jede Richtung vektoriell bestimmt werden. Typische Drucksensoren benutzen eine Membran, auf der paarweise Dehnungsstreifen radial und tangential angebracht sind. So entsteht eine hocheffektive und stabile Doppelbrücke. Den etwas vereinfachten Aufbau zeigt Bild 7.4g. Übliche Druckbereiche beginnen bei 0 mbar und reichen je nach Typ bis zu 30, 100, 300 mbar oder 1 bar. Die angelegten Spannungen liegen bei 5 bis 10 V. Die Ausgangsspannungen betragen maximal einige hundert mV.

Einen sehr speziell aufgebauten DMS zeigt Bild 7.4f. Hier wird die Änderung der magnetischen Permeabilität amorpher magnetischer Materialien über den magnetoelastischen Effekt genutzt. Das Magnetmaterial dient zur Kopplung der Gegeninduktivität zwischen den beiden Spulen. Nach diesem Prinzip lassen sich dann sogar k-Werte um 2000 erreichen.

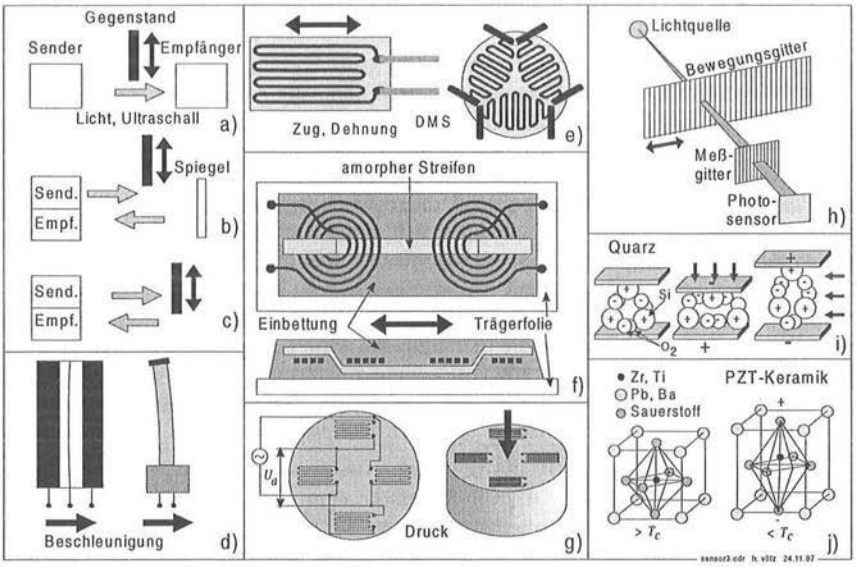


Bild 7.4 Sensoren, die mechanische Veränderungen in elektrische Signale wandeln

7.2.3 Piezotechniken

Beim Piezoeffekt sind mechanische Verformungen mit elektrischer Polarisation des Materials gekoppelt. Er tritt in beiden Richtungen auf:

- Ein elektrisches Feld bewirkt die Änderung der Abmessungen, besonders einer Länge.
- Eine Änderung der Abmessungen bewirkt eine elektrische Polarisation.

Allgemein kann das durch den Zusammenhang zwischen der Ladung Q (elektrische Polarisation) und der verformenden Kraft F gemäß

$$Q = d \cdot F$$

ausgedrückt werden. Darin ist d der piezoelektrische Koeffizient. Er beträgt für Quarz etwa $2{,}3 \cdot 10^{-12}$ As/N, für PZT-Keramik (Blei-Zirkon-Titanat, $Pb(Ti\text{-}Zr)O_3$) $700 \cdot 10^{-12}$ As/N und für PVDF-Folie (Polyvinyliden-Fluorid-Folien, auch PVF_2 genannt) $23 \cdot 10^{-12}$ As/N. Der entsprechende Effekt beim Quarz ist aus Bild 7.4i ersichtlich. Durch die Kraft werden die positiven Silizium-Atome gegenüber den negativen Sauerstoffatomen verschoben. Typische Kapazitätswerte für Sensoren liegen bei 200 pF. Bei der PZT-Keramrik ist gemäß Bild 4.7j der Zusammenhang komplizierter. Hier existiert nämlich eine Curie-Temperatur T_C. Oberhalb ist das mittlere Zr- bzw. Ti-Atom zentral gelagert. Folglich existiert keine Polarisation. Jedoch unterhalb dieser Temperatur geht das Perowskit-Gitter in die tetragonale Struktur über. Das zentrale Atom ist dann aus der Mitte verschoben. So entsteht eine permanente Polarisation. In Analogie zum Magnet wird dann auch vom Elektret gesprochen. Diese Polarisation kann ebenso wie beim Quarz durch mechanische Kraft verändert werden. Dabei tritt die gleiche Wirkung wie beim Quarz auf. Während Quarzsensoren bis etwa 500 °C nutzbar sind, müssen deshalb PZT-Sensoren immer deutlich unterhalb ihrer Curie-Temperatur verwendet werden. Ein zeitweiliges Überschreiten hinterläßt aber bei der Rückkehr keine Veränderungen für die Nutzung. Das Polyvinylidenfluorid (PVDF) wird als Folie von ca. 20 µm Dicke verwendet. Durch Verstrecken und Behandlung im elektrischen Feld werden die im Kohlenstoffgerüst vorhandenen Dipole der Fluor-

Atome verstärkt und ausgerichtet. Ihre Lage wird ebenfalls bei mechanischer Belastung geändert und führt dann zu Polarisationsänderungen. Die Kapazität solcher Folien beträgt typisch 500 pF/cm^2, der Isolationswiderstand liegt bei 10 MΩ. Die Folie ist im Temperaturberich von -40 bis +80 °C anwendbar. Piezomaterialien sind vorwiegend Misch-Keramiken. Hierzu gehören u. a. $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $PbNbO_6$, $Bi_{12}GeO_{20}$, $Bi_{12}SiO_{20}$, $LiNbO_3$ und $LiTaO_3$. Alle derartigen, polykristallinen Ferroelektrika – auch PZT – besitzen wie die Ferromagnetika eine Curie-Temperatur. Nur unterhalb dieser kann eine Polarisation „eingefroren" sein. Viele dieser Polykristalle sind darüber hinaus auch ferroelektrisch. Ihre Polarisation besitzt dann eine Hysterese, wie sie bei Ferromagnetika allgemein üblich ist. Einige Materialien sind auch noch pyroelektrisch. Hierzu gehören u. a. (EK bedeutet Einkristall): ZnO (EK); CdS (EK); PVDF (Polymer), $Pd_5Ge_3O_{11}$(EK), $Sr_{0,5}Ba_{0,5}NB_2O_5$ (EK); $LiTaO_3$ (EK); $Pb_{0,76}Ca_{0,24}TiO_3$ (Keramik); $Pb_{0,9}La_{0,1}Ti_{0,975}O_3$ (Keramik, bzw. dünne gesputterte Schicht). Bei Ihnen ändert sich die Polarisation mit der Temperatur. Andere sind zusätzlich piezoresistiv und ändern damit ihren Widerstand mit der Druck-/Zugbelastung. Sie können auch für DMS benutzt werden.

7.2.4 Bewegung und Beschleunigung

Die Feststellung/Messung von Ort, Bewegung und Beschleunigung beliebiger Objekte, einschließlich des Menschen und seiner Körperteile, ist für die richtige Funktion der Mensch-Technik-Schnittstelle recht wichtig. Folglich sind dafür viele Varianten entstanden. Auf einige Näherungssensoren wurde bereits oben eingegangen, weitere werden noch bei den magnetischen Sensoren folgen. Mehr Information liefert das Prinzip der **Lichtschranke**, wie es die Bilder 7.4 a bis c zeigen. Einmal können sich dabei Sender und Empfänger gegenüberstehen (Bild 7.4b), und das Objekt bewegt sich zwischen ihnen hindurch (Einweglichtschranke, Unterbrechung). Einfacher einzubauen ist die Methode mit Reflexion (Bild 7.4b). Hier sind Sender und Empfänger nebeneinander angeordnet und eine Spiegelanordnung reflektiert den Lichtstrahl. Wird statt des Spiegels ein Tripelprisma verwendet, so kann zusätzlich seine Eigenschaft genutzt werden, die Polarisationsebene um 90 ° zu drehen. Dann sind große Abstände besser zu überbrücken. Teilweise werden in solche Lichtschranken Lichtleitfasern zusätzlich einbezogen. Meist wird infrarotes Licht verwendet. Hierfür sind wirksame und preiswerte Halbleiterbauelemente verfügbar. Außerdem stört das Tageslicht weniger. In vielen Anwendungen wird das Licht zusätzlich moduliert. Dann ist das Signal besser, z. B. phasensynchron detektierbar und somit von Störungen frei zu halten.

Das Prinzip der Lichtschranke ist auch gut mit **Ultraschall** zu realisieren. Dann werden vorwiegend die o. g. Piezokeramiken als Sender und Empfänger benutzt. Ein Vorteil ist dabei, daß dann Nebel und Schmutz kaum stören. Weiter kann der Sender zugleich als Empfänger benutzt werden. Nachdem der Sendeimpuls voll abgeklungen ist, muß das Piezoelement als Empfänger betrieben werden. Hierzu ist Zeit notwendig. Daher erfordert eine solche Messung einen Mindestabstand. Bei Ultraschall sind Frequenzen um 40 kHz üblich, möglich sind aber Frequenzen bis in den MHz-Bereich. Darüber hinaus kann bei Ultraschall auch der **Doppler-Effekt** zur Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden.

Wenn es um sehr genaue Positionen geht, dann ist eine **inkrementale** Bewegungsmessung wertvoll (Bild 7.4h). Über ein bewegtes Raster, das am Objekt befestigt ist, und ein zweites feststehendes Raster entstehen digitale Impulse, die nur zu zählen sind.

Die **Beschleunigung** muß über eine träge Masse ermittelt werden. Hierzu zeigt Bild 7.4d zwei Beispiele. Im linken Teilbild enthält der Sensor in seinem Innern eine massebelegte Membran. Wird er beschleunigt, so folgt die Membran verzögert. Das Ergebnis ist eine Veränderung ihrer Kapazitäten gegenüber den beiden feststehenden Elektroden. Die zweite Methode (rechts) nutzt z. B. Quarz, ferroelektrische oder Piezo-Keramiken. Hier befindet sich am Ende eines Biegebalkens die träge Masse. Die Beschleunigung des Sensors bewirkt die Biegung und damit das Meßsignal.

7.3 Magnetische Sensoren

Magnetische Sensoren arbeiten nach einer Vielzahl von Prinzipien. Deshalb ist eine Übersicht zu den wichtigsten, im folgenden behandelten Prinzipien nützlich:

- REED-Kontakt
- Wiegand-Effekt
- Änderung von Induktion|Induktivität
- Oberwellensonde
- SQID
- Hall-Effekt (Abschnitt 7.3.1)
- Magnetoresitiver Effekt, Feldplatte, Magnetdiode (Abschnitt 7.3.2)
- Magnetostriktiver Effekt (Abschnitt 7.3.3)

Schon mehrfach wurde der **REED-Kontakt** erwähnt. Ein kleines Glasröhrchen von einigen mm Durchmesser und wenigen cm Länge ist mit einem Schutzgas gefüllt (**Bild 7.5a**). Es enthält weiter zwei Kontaktzungen aus mittelhartem magnetischen Werkstoff (H_C zwischen 8 und 30 A/cm). Sie stehen sich in einem geringen Abstand gegenüber. Durch ein äußeres Magnetfeld ziehen sie sich an und geben Kontakt. Solche Kontakte halten etwa 10^{10} Schaltspiele aus. Nur bei starker Strombelastung sinkt die Zahl etwas. Wird dieses Röhrchen fest mit einer Spule umgeben, so liegt ein Reed-Relais vor. Durch mechanische Bewegung eines Magneten entsteht ein Abstandssensor, wie er z. B. bei Tastaturen verwendet wird.

Ebenfalls als Näherungssensor wird der **Wiegand-Sensor** eingesetzt. Er besteht aus einem 0,2 bis 0,3 mm dicken Spezialdraht, um den etwa 1000 bis 2000 Windungen gewickelt sind. Durch eine Sonder-Technologie besitzt der Draht einen weichmagnetischen Kern und einen hartmagnetischen Mantel. Ein äußeres Magnetfeld bewirkt bei einer definierten Feldstärke ein impulsartiges Umschalten, das von der Geschwindigkeit der Näherung unabhängig ist. So entstehen immer gleichartige Impulse im µs-Bereich von etwa 1 bis 2 Volt. Der Wiegendsensor ist also quasi eine Nachbildung des mechanischen Druckpunktes (vgl. S. 96).

Die Nutzung der **Induktion** bzw. Veränderung der **Induktivität** ist vielfältig möglich. Ein Abstandssensor ergibt sich z. B. dadurch, daß elektrisch leitendes Material in das Wechselfeld einer erregten Spule eindringt (Bild 7.5i). Dabei entstehen Wirbelströme, die Energie verbrauchen und so zu einer Amplitudenänderung (Güte des Schwingkreises) der Schwingung führen. Die Feldenergie wird meist so klein gewählt, daß noch keine meßbare Erwärmung im sich nähernden Gegenstand entsteht. Wird dagegen in einem magnetischen Kreis der Luftspalt verändert (Bild 7.5j), so ändert sich auch die Induktivität. Dieser Effekt kann u. a. zur Frequenzänderung eines mit der Spule aufgebauten Schwingkreises genutzt werden. Eine dritte Möglichkeit zeigt Bild 7.5k. Zwei gleiche Spulen liegen nebeneinander. In ihnen wird ein magnetischer Kern bewegt. Dadurch verändern sich ihre Induktivitäten gegenläufig. So läßt sich ein hochempfindliches Differenzprinzip aufbauen. Wird um die beiden Spulen eine dritte gelegt, so entsteht ein sehr wirksamer Differentialtrafo.

Die **Oberwellensonde** wurde in den 40er Jahren von Förster erfunden. Hierbei wird ein symmetrischer magnetischer Kreis relativ stark erregt. Durch die Symmetrie tritt aber das Wechselfeld nicht nach außen in Erscheinung und induziert auch keine Spannung in einer Meßwicklung. Durch ein äußeres Magnetfeld wird jedoch die Symmetrie gestört und in der Sekundärwicklung tritt eine proportionale Spannung der doppelten Frequenz auf. Mit dieser Sonde sind sehr kleine statische Magnetfelder meßbar.

Noch viel empfindlicher sind die **SQID** (superconducting quantum interference devices). Sie ermöglichen Messungen kleinster Felder bis in den fT-Bereich. Ausgangspunkt sind dabei ringförmige supraleitende Magnete. Für die Supraleitung benötigen Festkörper Temperaturen unter 20 K. Einige keramische Materialien ermöglichen die Anwendung bereits ab etwa 120 K. Bei der Supra-

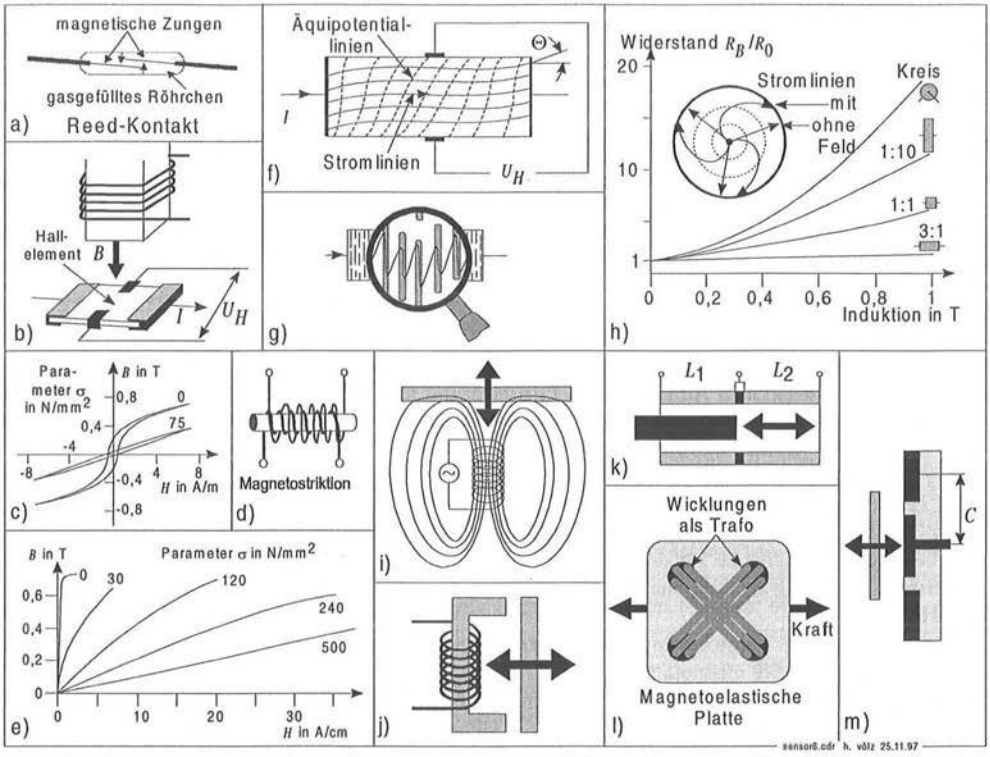


Bild 7.5 Wichtige magnetische Sensoren sowie ein typischer kapazitiver Sensor (m)

leitung kondensieren sich zwei Elektronen zum Cooper-Paar mit entgegengesetztem Spin. Der Meißner-Effekt bewirkt über ein äußeres Feld den vollständigen Diamagnetismus ($\chi = -1$). Es treten sprungartig nur ganzzahlige Vielfache eines Flußquants ($\phi_0 = 2{,}07 \cdot 10^{-14}$ Vs) auf. Ihre Zählung ermöglicht sehr empfindliche Messungen.

Material	Beweglichkeit in $cm^2V^{-1}s^{-1}$	Hall-Konstante in $cm^3A^{-1}s^{-1}$
InSb	$7{,}7 \cdot 10^4$	380
InAs	$3 \cdot 10^4$	100
Si	$1{,}5 \cdot 10^4$	3000*
GaAs	$8 \cdot 10^3$	60*

* ist dotierungsabhängig

7.3.1 Hall-Effekt

Der Halleffekt wurde 1879 von Edwin Herbert Hall entdeckt. Entsprechend Bild 7.5b wird ein Hallplättchen von einem Strom I durchflossen. Senkrecht dazu steht ein Magnetfeld der Induktion B. Beide bewirken dann ein elektrisches Querfeld der Spannung

$$U_H = \frac{I \cdot B}{e_0 \cdot n \cdot d} \cdot$$

Es bedeuten: e_0 die Elektronenladung, n die Ladungsträgerkonzentration und d die Dicke des Plättchens. Der Effekt kommt dadurch zustande, daß bewegte Elektronen und Löcher im Magnetfeld abgelenkt werden, also ihre ursprüngliche Richtung|Geschwindigkeit ändern. Auf dem Stromweg treten viele Wechselwirkungen (Stöße) mit den anderen Ladungsträgern und den Atomen auf. Deshalb ist bei Metallen mit ihrer hohen Elektronendichte die Hallspannung sehr klein. Gut nutzbare Spannungen treten bei Halbleitermaterial auf. Einige typische Daten zeigt die oben stehende Tabelle. Sie enthält die Beweglichkeit der Ladungsträger. Mit der freien Weglänge bestimmt sie wesentlich die Zeit zwischen zwei Stößen. Infolge der Stöße bildet sich ein Grenzwinkel, Hallwinkel Θ, für die Stromlinien

aus. Bei einem langen Material nehmen die Äquipotentiallinien in der Mitte auch diesen Winkel an (Bild 7.4). Er bestimmt maßgeblich die Hallspannung. Es gibt viele Ausführungsformen, u. a. als Kreuz- und Schmetterlingsform. Es sind Felder bis herab zu 10 mT meßbar.

7.3.2 Feldplatte, Magnetoresitivität und Magnetdiode

Die Verlängerung des Stromweges im Hallmaterial führt mittelbar zu einer Widerstandsänderung (Gauß-Effekt). Hierauf beruhen die Feldplatten. Sie haben gegenüber den Hallelementen den Vorteil, nur zwei Elektroden zu benötigen. Im Gegensatz zum Hallelement geht bei ihnen aber nur die Stärke des Magnetfeldes $B_\perp$, jedoch nicht dessen Richtung ein.

$$\frac{R(B)}{R_0} = 1 + \left(\mu_n \cdot B_\perp\right)^2$$

Die Widerstandsänderung ist also symmetrisch, d. h. unabhängig von der Polung des Magnetfeldes (magnetische Feldstärke in A/m). Der Effekt nimmt mit steigender Beweglichkeit μ_n zu. Die Hallspannung erreicht dann einen Grenzwert, wenn die Länge des Hallelementes im Vergleich zur Breite groß ist. Für die Widerstandsänderung geht dagegen das Längen-Breiten-Verhältnis des Materials relativ stark ein (Bild 7.5h). Der unendliche Grenzwert wird formal mit der Corbino-Scheibe erreicht. Vom Zentrum aus können hier nämlich die Ladungsträger auf Spiralbahnen sehr lange Wege zurücklegen. Da bei einer punktförmigen Mitte theoretisch eine unendlich hohe Stromdichte auftritt, muß eine bestimmte Kreisfläche für den Kontakt gewählt werden. So kann nur ein begrenzter Wert der Widerstandsänderung erreicht werden. Die Widerstandsänderung folgt dem Magnetfeld bis zu etwa 10 GHz.

Eine zusätzliche Vergrößerung der Widerstandsänderung läßt sich durch spezielle Materialien erreichen. Eine gezielte technologische Aufbereitung erzeugt bei einem InSb-NiSb-Eutektikum eine ungewöhnliche Struktur. Im Material mit geringer Leitfähigkeit bilden sich sehr gut leitende NiSb-Nadeln von etwa 50 µm Länge, 1 µm ∅ aus. Sie stehen in einem Abstand von rund 80 µm und sind gut parallel ausgerichtet. Im Material ergibt sich deshalb ein Stromfluß, wie ihn Bild 7.5g zeigt. Der Stromweg verlängert sich also bei einem magnetischen Feld sehr stark.

Der **magnetoresitive Effekt** ähnelt weitgehend den Erscheinungen in den Feldplatten. Früher wurde dieser Effekt bei Magnetfeldmessungen mit Wismut-Spiralen genutzt. Heute werden dünne aufgedampfte | gesputterte Schichten aus Ni-, Co- und Fe-Legierungen, häufig Permalloy-Varianten um 80:20 FeNi, verwendet. Da hier die Widerstandsänderung nur bei 1 bis 5% liegt, sind stets Brückenschaltungen notwendig. Inzwischen sind strukturierte Mehrlagen-Schichten bekannt geworden. Dann wird vom GMR (giant magnetic resitiv) gesprochen.

Bei der **Magnetdiode** werden zwei gegeneinander geschaltete pn-Übergänge beeinflußt. Das Magnetfeld verändert dabei den Stromverlauf insbesondere in den von Ladungsträgern verarmten pn-Übergängen (Sperrzonen). Das erfolgt gegenläufig, so daß in einer Brückenschaltung auch kleine Feldänderungen gut erfaßt werden.

7.3.3 Magnetostriktion

Die Magnetostriktion existiert in beide Richtungen:

- Beim Jouleschen Effekt bewirkt ein Magnetfeld eine Längenänderung des Materials.
- Beim Villari-Effekt ruft eine mechanische Spannung eine Magnetisierung hervor.

Viele Magnetmaterialien sind magnetostriktiv. Sie ändern unter dem Einfluß von mechanischer Spannung ihr Verhalten. Sie werden zusätzlich magnetisch anisotrop. Die magnetischen Eigenschaften sind dann richtungsabhängig. Dieses wirkt sich u. a. in der Hysteresekurve aus und ist beispielhaft in Bild 7.5c gezeigt. Für die Neukurve zeigt Bild 7.5e weitere Beispiele. Dieser Effekt kann bei einem magnetostriktiven Übertrager genutzt werden. Ein äußeres Magnetfeld ändert dann sein Übertragungsmaß. Noch ausgeprägter ist der Einfluß bei dem *magneto-elastischen Kraftmesser*. Er verwendet ein Trafoblech mit hoher Magnetostriktion bei Zug. Zwei senkrecht zueinander stehende Spulen

bilden einen Tafo, der in Ruhe total entkoppelt ist (Bild 7.5l). Die durch Zug (Kraft) bewirkte Anisotropie ermöglicht eine etwa proportionale Spannungsübertragung zur zweiten Spule.

7.4 Optische Sensoren

Auch bei den optischen Sensoren existiert eine beachtliche Vielfalt. Im Buch werden behandelt:

- Bolometer
- Beeinflussung von Lichtleitern
- Photowiderstand (Abschnitt 7.4.1)
- Photoelement (Abschnitt 7.4.2)
- Photo-Diode, -Transistor und -Thyristor (Abschnitt 7.4.3)
- Photozelle (Abschnitt 7.4.4)
- Photomultiplier (Abschnitt 7.4.4)
- CCD-Elemente (Kapitel 8.6.3, ab S. 180 bei Scannern und Kameras)

Generell ist der innere und äußerer Photoeffekt zu unterscheiden. Beim **äußeren Photo-Effekt** (Abschnitt 7.4.4) treten infolge der Energie von Photonen Ladungsträger aus der Oberfläche eines Materials. Sie können z. B. wie bei der klassischen Photozelle im Vakuum zu einer Gegenelektrode gelangen und als Strom | Spannung ausgewertet werden. Dieser Effekt ist auch für die Photomultiplier grundlegend. Es schließt sich dann noch eine unmittelbare Verstärkung durch Sekundärelektronen an. Beim **inneren Photo-Effekt** werden dagegen die Ladungsträger *im* Material beeinflußt. Dies kann auf vielfältige Weise registriert werden: als Widerstandsänderung bzw. als entstehende Ströme oder Spannungen. Beim **Bolometer** wird ein dritter Effekt genutzt, nämlich die Umwandlung der Lichtenergie in Wärme. Gemessen wird der dadurch veränderte Widerstand eines Leiters. Bei der Beeinflussung von **Lichtleitern** wird nicht primär die Strahlung selbst gemessen, sondern wie einige Eigenschaften (z. B. Reflexion) durch äußere Einflüsse verändert werden. So entstehen hauptsächlich Sensoren für die chemische Analytik kleinster Substanzmengen von speziellen, insbesondere organischen Molekülen. Da dies im Rahmen dieses Buches wenig Bedeutung besitzt, sei auf einen Überblick in [GAU] verwiesen.

7.4.1 Photowiderstand

Photowiderstände heißen auch Photoleiter oder LDR (light dependend resistor). Sie bestehen aus kompaktem Halbleitermaterial, wie CdS, PbS, PbSe oder HgCdTe. Weitere Materialien mit den typischen Daten enthält die nebenstehende Tabelle. Durch Beleuchtung mit der Lichtenergie E erzeugen die Photonen im Material Ladungsträgerpaare, die nach kurzer Lebensdauer (ms) wieder rekombinieren. So entsteht ein Gleichgewicht zwischen der Beleuchtung und den aktuell vorhandenen Ladungsträgerpaaren. Daraus folgt mit einer Material- und Bauelementkonstanten K der Leitwert (reziproker Widerstand)

$$G=\frac{1}{R}=K\cdot E^{\gamma} \quad \text{mit } \gamma\approx 0{,}7 \text{ bis } 1$$

Material	λ in µm	Temperatur in K	typische Zeit in µs
ZnS	0,34 - 0,4	300	
CdS	0,45 - 0,67	300	100 000
CdSe	0,72 - 0,83	300	
SiAu	0,5 - 1,1	300	
SiZn	0,5 - 1,1	300	
PbS	0,5 - 3,5	300	300
PbSe	0,5 - 5	300 (77)	100
InSb	1 - 7,3	300 (77)	
InAs	1 - 3,8	300 (77)	
GeAu	1 - 10,6	77	
GeCu	0,5 - 31	4,2	
Hg/CdTe	1 - 25	77	100

Wegen der geringen Leitfähigkeit der Materialien werden meist kammartige Elektroden benutzt. Die Schicht wird dabei auf ein Keramiksubstrat aufgebracht. Anschließend werden die Elektroden darüber gelegt. Ein typisches Beispiel zeigt **Bild 7.6**f (nächste Seite). Dort sind auch die Zusammenschaltung mit der Spannungsquelle sowie zwei typische Widerstandskennlinien gezeigt. Der erfaßbare große Beleuchtungsbereich hat den Elementen u. a. einen festen Platz für die Belichtungsmessung in Photo-

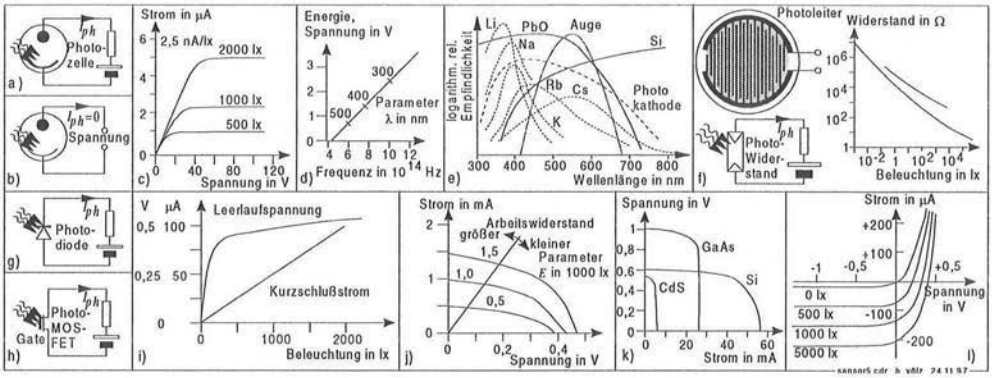


Bild 7.6 Übersicht zu wichtigen optischen Sensoren

apparaten eingebracht. Wegen des sichtbaren Lichtes werden dann vor allem CdS oder CdSe verwendet. Hier stört auch nicht die Trägheit der Elemente. Im Infrarotbereich besitzen PbS und PbSe größere Bedeutung. Sie sind noch ohne Kühlung zu betreiben.

7.4.2 Photoelement

Der photovoltaische Effekt wurde bereits 1839 von Bequerel entdeckt. Seine erste praktische Anwendung geschah 1954 in der Weltraumfahrt. Inzwischen sind solche Elemente vielfältig im Einsatz. Bei ihnen bewirkt die Einstrahlung auf eine Fläche A mit der Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ bei einer Quantenausbeute $\eta(\lambda) < 1$ den Photokurzschlußstrom

$$I_{ph} = \frac{E(\lambda) \cdot A \cdot e_0}{h \cdot \nu} \cdot \eta(\lambda).$$

Darin bedeuten λ die Wellenlänge des Lichts, h die Plancksche Konstante und e_0 die Elektronenladung. Dieser Strom addiert sich zu den Diffussionsströmen im pn-Übergang. Vgl. dazu die Formeln auf S. 106f. Zur Vereinfachung ist hier $m = 1$ gesetzt. Dann gilt allgemein

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{e_0 \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) - I_{ph} \cdot$$

Für *Kurzschluß* gilt $U = 0$. Der maximal meßbare Strom ist folglich gleich dem Photostrom. Damit ist er auch proportional zur Bestrahlungsstärke E. Im *Leerlauf* gilt $I = 0$. Damit tritt eine Spannung U_L auf, die sich durch Umformen der obigen Gleichung ergibt

$$U_L = \frac{k \cdot T}{e_0} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \cdot$$

Den Kurzschlußstrom und die Leelaufspannung zeigt in Abhängigkeit von der Beleuchtung für Si Bild 7.6i. Bei etwa 1000 lx wird eine Sättigungsspannung von rund 0,5 V erreicht. Der Kurzschlußstrom hängt dagegen auch von der Oberfläche des Elements ab. In der Praxis wird immer an einen Arbeitswiderstand eine elektrische Leistung abgegeben. Hierfür gilt das Bild 7.6j. Für unterschiedliche Lastwiderstände ändert sich auch die Neigung der Geraden. Es gibt immer einen Widerstand, an dem die maximale Leistung entsteht. Für Photoelemente auf Basis von Si, GaAs und CdS zeigt Bild 7.6k typische Kennlinien.

7.4.3 Photodiode

Eine übliche Photodiode ist ein pn-Übergang mit Lichtzutritt. Sie wird meist in Sperrichtung betrieben und besitzt dann Kennlinien wie sie z. B. Bild 7.5l zeigt. Für sie ist also der Sperrstrom gut pro-

portional zur Lichteinstrahlung. Ihr bedeutender Vorteil besteht darin, daß sie eine sehr kleine Kapazität besitzt und dadurch bis zu hohen Frequenzen arbeitet. Da ihre Empfindlichkeit jedoch vielfach nicht ausreicht, wird der pn-Übergang oft zum Transistor (Phototransistor) oder zum Photothyristor erweitert. Dann ist die Empfindlichkeit um tausendmal größer. Weiter gibt es pin-Photo-Dioden. Sie besitzen zusätzlich einen ladungsneutralen Bereich im pn-Übergang. Dadurch werden der Sperrstrom und die Eigenkapazität wesentlich kleiner. So werden Frequenzen bis zu 20 GHz erreicht. Schließlich sei noch auf Mehrfach-Photodioden, insbesondere auf die Vierquadranten-Diode hingewiesen. Sie ermöglicht als Sensor eine einfache Lokalisierung bzw. Feststellung der Bewegung von Objekten. Einen Überblick zu einigen typischen Daten verschiedener Photodioden gibt die nebenstehende Tabelle. Diese Daten sind typisch für Si. Durch andere Materialien können ähnlich wie bei den Photowiderständen andere Lichtwellenlängen erschlossen werden. Einen groben Überblick gibt die zweite Tabelle.

Bauelement	Verstärkung	Ansprechzeit
Photoleiter	bis 10^6	10^{-2} bis 10^{-8} s
pn-Photodiode	1	10^{-8} bis 10^{-10}
pin-Photodiode	1	10^{-8} bis 10^{-10}
hetero-Photodiode	1	10^{-12}
Lawinenphotodiode	≤1000	10^{-8} bis 10^{-10}
Phototransistor	≤1000	10^{-6} bis 10^{-8}
Photothyristor	≤1000	10^{-6}

Material	λ in nm
Si	400 - 1100
Ge	500 - 1800
InAs	1000 - 3700
InAsP, GaAsP	1000 - 1700
InAs	600 - 3200
InSb	600 - 5600
HgCdTe	2000 - 15000
PbSnTe	8000 - 12000

7.4.4 Photozelle und Photomultiplier

Eine Photozelle ist ein evakuiertes Glasgefäß, welches eine spezielle Photokathode besitzt. Ihr gegenüber befindet sich eine zweite Elektrode, die Photoanode. Eine Photozelle kann auf zweierlei Art betrieben werden. Üblich ist der Fall von Bild 7.6a. Die Spannung von typisch 50 bis 200 V saugt alle vom Photostrom ausgetriebenen Elektronen ab und läßt so über den Widerstand von meist mehreren MΩ einen Spannungsabfall entstehen. Er ist streng proportional zur Photonenzahl. Allerdings ist die dabei auftretende Quantenausbeute meist deutlich kleiner als 1. Dadurch bleibt der Strom meist sehr klein. Je nach dem Kathodenmaterial sind unterschiedliche Empfindlichkeiten und verschiedene Lichtwellenlängen erreichbar (Bild 7.6e und nebenstehende Tabelle). Eine zweite mögliche Betriebsart zeigt Bild 7.6b. Hierbei erzeugen die ausgetriebenen Elektronen ein Potential auf der Anode. Gegen dieses Potential müssen die nachfolgenden Elektronen anlaufen. So bildet sich eine Gleichgewichtsspannung aus, die *nur* durch die Wellenlänge des Lichts, also durch die Energie der Photonen, *nicht aber* durch ihre Anzahl, d. h. die Lichtmenge, bestimmt ist. Dies ist einer der beeindruckendsten Beweise für die Quantenstruktur des Licht. Ein typisches Meßergebnis zeigt Bild 7.6d.

Kathode	λ_{max} in µm	η in %	mA/W
Na_2KSb-Cs	0,38	22	68
Cs_3Sb-O	0,41	23	75
BiAgOCs	0,42	6,8	23
AgOCs	0,8	0,4	26
K_2CsSb	0,38	27	85
GaAs-Cs_2O	0,4	35	
InAsPCs	1,0	1,5	

Die klassische Photozelle gab es auch mit Gasfüllung. Dadurch ist der Photostrom etwa zehnfach zu verstärken. Heute existieren beide Formen der klassischen Photozelle nur noch in der Literatur. Auf ihr Prinzip baut jedoch der **Photomultiplier** auf, der auch Photovervielfacher, Photo-SEV oder kurz SEV genannt wird. Er hat wegen seiner extrem hohen Lichtempfindlichkeit immer (noch) für Spezialzwecke beachtliche Bedeutung. Anstatt der einen Anode befinden sich im Glasgefäß dazu mehre Elektroden, die Dynoden. Ihre Oberfläche ist so beschaffen | beschichtet, daß auf sie treffende Elektronen etwa 4 bis 14 Sekundärelektronen auslösen. Durch elektronenoptische Gestaltung mit elektrischen | magnetischen Feldern kann dieser Effekt bis zu zehnmal an aufeinanderfolgenden Dynoden wiederholt werden. Im Endeffekt löst so jedes einzelne Photoelektron bis zu 10^8 Sekundärelektronen aus. So sind selbst einzelne Photoelektronen gut nachweisbar. Die typischen Empfindlichkeiten liegen bei 0,1 bis 10 A/lx. Die Dunkelströme liegen im Bereich von 30 pA bis 100 nA. Photovervielfacher können leicht durch Magnetfelder gestört werden. Sie müssen deshalb magnetisch abgeschirmt

betrieben werden. Ihre Hauptanwendungen liegen in der Wissenschaft, bei Szintillationsdetektoren der Spektroskopie oder für ionisierende Strahlung, bei der chemischen Emissions-Spektralanalyse und schließlich in Trommelscannern. Heute gibt es drei Varianten für den Aufbau der Vervielfacher.

Bei den **Dynoden-Kaskaden** werden die Sekundärelektronen vor allem durch die Formgebung der Dynoden auf die jeweils folgende Dynode fokussiert. Die typischen Laufzeiten der Elektronen liegen zwischen 8 und 135 ns, die Anstiegszeiten des Anodenstromimpulses zwischen 1 und 10 ns. Da die Spannung zwischen zwei benachbarten Dynoden bei 100 V liegt, ist zum Betrieb eine stabilisierte Hochspannung von 1 bis 2 kV erforderlich. Daran werden die einzelnen Dynoden über einen Festspannungsteiler angeschlossen. Meist liegt die Photo-Kathode auf negativem Potential. Dann kann nämlich der verstärkte Anodenstrom gegen Masse abgeleitet werden.

Beim **Kanal-Photovervielfacher** kommen kontinuierliche Dynoden zur Anwendung, die aus dünnen Bleiglasröhrchen hergestellt sind. Ihre innere Oberfläche ist so behandelt, daß eine hochohmige, halbleitende Widerstandsschicht mit guter Sekundärelektronen-Emission entsteht. Sie erfordern ein extrem gutes Vakuum, geringer als 10 mPa. Die Ladungsmultiplikation wird durch Ionenrückkopplung (Ionisierung des Restgases) begrenzt. Um diesen Effekt zu mildern, werden die Kanäle oft gekrümmt ausgeführt.

Der Vervielfacher mit **Mikrokanalplatten** besteht aus einer Vielzahl (10^4 bis 10^7) paralleler, dünner Kanal-Elektronenvervielfacher mit einem Durchmesser von jeweils 10 bis 25 µm. Sie werden aus ca. 1 mm dicken Bleiglasplatten von einigen Zentimetern Durchmesser hergestellt. Zur Reduzierung der Ionenrückkopplung werden zwei Mikrokanalplatten nacheinander leicht gegeneinander geneigt angeordnet (Chevron-Konfiguration). Die Anstiegs- und Laufzeiten sind bei diesem Prinzip kleiner als 1 ns. Auch die Magnetfeldempfindlichkeit ist geringer. Die wichtigsten Anwendungen sind Bildwandler und Bildverstärker. Dabei wird die Anode durch einen Phosphorschirm ersetzt, auf dem das mit der Photokathode aufgenommene Bild entsteht (z. B. bei Nachtsichtgeräten).

7.5 Thermische Sensoren

Fast alle Effekte werden von der Temperatur beeinflußt. Weitere Effekte beruhen, wie u. a. bei den chemischen Sensoren (Abschnitt 7.6), auf Wärmewirkungen. Daher ist die Anzahl möglicher thermischer Sensoren sehr groß. Hier ist es aber bestenfalls möglich, die wichtigsten Verfahren zu beschreiben. Für dieses Buch ist jedoch eine Einschränkung möglich. Es interessieren nur jene Temperatur-Sensoren, die in der Umgebung der biologisch relevanten Temperatur von etwa 37 °C arbeiten. So sind z. B. die Thermoelemente unwesentlich. Sie sind nämlich vorwiegend auf Bereiche von hundert und tausend Grad ausgelegt. Damit verbleiben drei wichtige Gruppen: der pn-Übergang, die Thermistoren und die Pyroelektrika.

Im **pn-Übergang** einer Halbleiterdiode gibt es zwei gegenläufige Ströme: Elektronen aus dem n-leitenden Gebiet diffundieren ins p-Gebiet. Umgekehrt diffundieren Löcher aus dem p-leitenden Teil ins n-Gebiet. Dadurch entsteht am pn-Übergang ein trägerverarmtes Sperrgebiet. Eine außen angelegte Spannung verstärkt je nach ihrer Polarität einen der beiden Ströme. Weiter wird dadurch die verarmte Schicht schmaler oder breiter. Beim Betrieb in Sperrichtung existiert ein Sperrsättigungsstrom

$$I_S = I_{SK} \cdot \mathrm{e}^{\frac{-E_g}{k \cdot T}}.$$

Darin ist E_g der Bandabstand, der für Si bei 1,1 eV liegt. T ist die absolute Temperatur und k die Boltzmann-Konstante. Für eine Temperaturmessung ist jedoch das Verhalten der Durchlaßrichtung besser geeignet. Hierfür ist es nützlich, ein nicht ideales (theoretisches) Verhalten durch einen Faktor $1 \le m \le 2$ zu berücksichtigen. Mit der angelegten Spannung U gilt dann

$$I = I_S \cdot \left(\mathrm{e}^{\frac{e_0 \cdot U}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right).$$

Die Gleichung läßt sich nach U auflösen:

$$U = \frac{m \cdot k \cdot T}{e_0} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_{SK}}\right) + m \cdot \frac{E_g}{e_0}.$$

Sie ist also im weiten Bereich von etwa -50 bis +150 °C proportional zur Temperatur. Hierzu muß nur $I \gg I_{SK}$ erfüllt sein. Der Temperaturkoeffizient ist negativ und liegt bei einigen mV/K.

Bei den **Thermistoren** gibt es zwei unterschiedliche Klassen:

- NTC (negative temperature coefficient) = Heißleiter
- PTC (positive temperature coefficient) = Kaltleiter

Beide Klassen können einmal mit einem sehr kleinen Strom zur Messung ihrer *Temperatur* (d. h. jener ihrer Umgebung) betrieben werden. Zum anderen erwärmen sie sich bei größerem Strom. Dann erfolgt die Messung der *Wärmeableitung* zur Umgebung, die u. a. vom vorbeiströmenden Gas oder einem Füllstand abhängt.

Heißleiter bestehen meist aus kompaktem oder polykristallinem Material. Ohne Eigenerwärmung gehorchen sie mit guter Näherung der Formel

$$R_T \approx R_N \cdot \mathrm{e}^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)}.$$

Der Index N (Normal) verweist auf die Bezugs-, meist Zimmertemperatur. B ist eine Material-Konstante. Ihr typischer Temperaturkoeffizient liegt zwischen -2 und -6 %/K. Einen typischen Widerstandsverlauf zeigt **Bild 7.7a** (nächste Seite). Ein Beispiel für Eigenerwärmung und Umgebung zeigt Bild 7.7b.

Kaltleiter werden vorwiegend aus polykristallinem Bariumtitanat (Keramik) gefertigt. Bei tiefen Temperaturen sind die Potentialschwellen zwischen den Körnern nicht ausgebildet. Es gibt freien Elektronenfluß. Oberhalb der Curie-Temperatur nehmen die Dielektrizitätskonstante und die Polarisation stark ab. Folglich steigen die Potentialschwellen an und der Stromfluß sinkt deutlich. Dadurch besitzen sie einen ausgeprägten Sprung im Widerstandsverlauf. Der übliche Meßbereich ist folglich auch 50 bis 100 K breit. Der typische Temperaturkoeffizient beträgt 5 bis 50 %/K. Einen Kurvenverlauf zeigt Bild 7.7a.

Bei den **pyroelektrischen Sensoren** wird durch die Temperatur die Oberflächenladung verändert. Der Effekt ist bei vielen ferroelektrischen Stoffen vorhanden. Ein typisches Materialien ist TGS (Triglycinsulfat), das zur besseren Langzeitstabilität mit 1-Alanin dotiert wird (LATGS). Die Curie-Temperatur liegt jedoch mit 49 °C sehr niedrig. Allerdings kehrt die Polarisation nach einem Überschreiten bei normaler Temperatur wieder zurück. Eine zusätzliche Dotierung mit Deuterium (DLATGS) erhöht die Curie-Temperatur auf etwa 59 °C. Dieses Material wird z. B. in Personen-Bewegungs-Sensoren eingesetzt. Andere Materialien sind PZT ($T_C \geq 135$ °C) und PDVF.

7.6 Chemische Sensoren

Das Spektrum der chemischen Sensoren ist nicht nur sehr groß, sondern auch äußerst vielfältig. Es werden fast alle möglichen chemischen Reaktionen und spezifischen Stoffeigenschaften genutzt. Eine systematische Behandlung wird dadurch erschwert, daß in der Literatur einzelne Methoden unterschiedlich benannt sind. Hier kann nur eine kleine Auswahl gegeben werden. Dabei ist nicht einmal sicher, daß all jene Methoden erfaßt sind, die jetzt und künftig für die Mensch-Technik-Schnittstelle Bedeutung besitzen bzw. erlangen werden. Insofern ist die Auswahl gewiß subjektiv. Allein eine Aufzählung der möglichen Werkstoffe, die von [SCH6] leicht gekürzt übernommen wurde, macht die Problematik deutlich.

- *Halbleiter:* Si-, II/IV-Halbleiter, Photoleiter, u. a. Si, GaAs, InP, GaAsP, HgCdTe, SiC, ...
- *Oxide* und *Nitride;* Passivierungsschichten, Isolatoren, (elektro-) katalytisch-aktive Materialien, wie SiO_2, Si_3N_4, Al_2O_3, SnO_2, TiO_2, ZnO, RhO_2, Cu_2O, $SrTiO_3$, Hoch-Temperatur-Supraleiter

- *Katalysatorsysteme*; Substrate (Al_2O_3 , SiO_2); chemische modifizierte Oxide von Rh, Ce, Mo, Cr, Co; Promotoren, wie Pt, Rh, Ru, Ni, Pd
- *Festkörper-Ionenleiter*; Kristalline und amorphe Materialien, wie ZrO_2, CeO_2, LaF_3, AgCl, AgJ
- *Keramiken und Gläser* für Kondensatoren, optische, magnetische, piezoelektrische und elektrooptische Bauelemente, u. a. Si-Al-O-N, $BaTiO_3$, Pb-(La-)Zr-Ti-O_3 (P(L)ZT), Ferrite
- *(Metall-)organische Verbindungen und Polymere;* thermisch stabile Leiter, Halbleiter, Photoleiter, Isolatoren bezüglich ihrer elektrischen, optischen und magnetischen Eigenschaften, Flüssigkristalle, Klebstoffe, Porphyrine, Donator-I Akzeptorkomplexe, siliziumorganische Verbindungen, Langmuir-Blodgett-Schichten, Polypyrrol, ...
- *Membranen*
- *Enzym-Systeme*, Antikörper, Rezeptoren, Proteine, Organellen, Zellen, Gewebe von Mikroorganismen, Tieren und Pflanzen

Hier erfolgt eine mehr auf Methoden bezogene Betrachtung. Dabei werden die folgenden Varianten einbezogen:

- Potentiometrische Messung (Abschnitt 7.6.1)
- Feuchte-Sensoren (Abschnitt 7.6.2)
- Katalytische Sensoren (Abschnitt 7.6.3)
- Gas-Sensoren (Abschnitt 7.6.3)
- MOS-FET-Sensoren (Abschnitt 7.6.4)
- Bio-Sensoren (Abschnitt 7.6.5)

7.6.1 Potentiometrie

In der Chemie werden oft *potentiometrische Verfahren* benutzt. Sie nutzen den Effekt aus, daß an den Elektroden in einem Elektrolyten Spannungen entstehen. Sie stehen im Zusammenhang mit der pH-Meßkette: Wasser dissoziiert zu 10^{-7} mol/l in OH^- und in H^+ (meist assoziiert zu H_3O^+). Die wirksame Ionenkonzentration wird als *Aktivität* a_{H+} und a_{OH-} bezeichnet. Ein Aktivitätskoeffizient $f \leq 1$ berücksichtigt, daß bei hohen Konzentrationen die Wirkung schwächer ist.

$$a = c \cdot f$$

Als pH-Wert wird der dekadische Logarithmus von a_{H+} eingeführt

$$pH = -\log(a_{H+}).$$

Für neutrales Wasser gilt pH = 7. Gelöste Stoffe verändern diesen Wert. Säuren reduzieren, Basen erhöhen ihn. Membranen ermöglichen es, nur ausgewählte Ionen passieren zu lassen. Der Vergleich mit einer neutralen Bezugselektrode liefert eine Spannung, die dem pH-Wert mit knapp -60 mV/[pH] proportional ist. Maximal treten also Werte zwischen ± 0,4 V auf.

Als Membranen werden z. B. mit EuF_2 dotierte Einkristalle aus LaF_3 (für F), Polymere mit eingelagerten Ionenaustauschern, Zeolithen oder hydrophoben Flüssigkeiten angewendet. Mittels einiger Festkörper, meist Edelmetalle wie Platin oder Gold, bilden sich zum Elektrolyten automatisch entsprechende Grenzflächen, Doppelschichten mit unterschiedlicher Ladung, aus (Redox-Elektroden). Weiter können gasdurchlässige Ionenleiter für die Membranelektrode (gassensitive Elektrode) angewendet werden. Für bestimmte Ionenarten kann die Membran auch mit katalytisch wirkenden Metallschichten überzogen werden.

7.6.2 Feuchte-Sensoren

Zur Messung der Feuchte sollen hier zwei Varianten beschrieben werden. Die kapazitiven Sensoren verwenden ein feuchteempfindliches Dielektrikum, z. B. Polymerfolie. Sie wird mit einer dünnen Goldschicht bedampft, deren Wasserdurchlässigkeit durch Strecken erhöht werden kann. Dann treten nämlich Risse in der Goldschicht auf, die das Eindringen erleichtern. Das Verhalten eines solchen Sensors zeigt Bild 7.7.c. Die Folie kann auch mit Fingerelektroden bedampft werden. Dann dringt die Feuchte durch deren Zwischenräume ein. Beim zweiten Sensortyp werden hochohmige, halbleitende

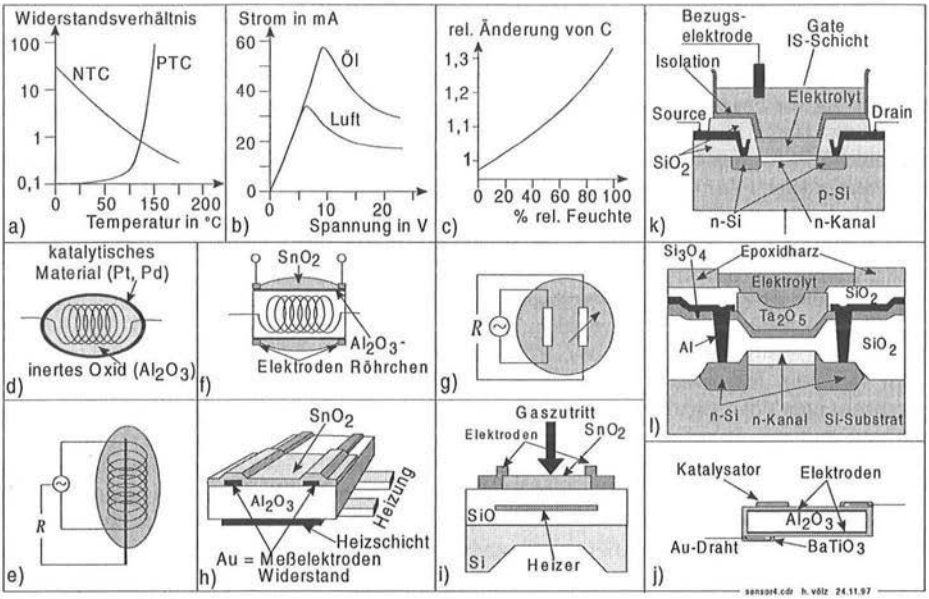


Bild 7.7 Beispiele für chemische Sensoren

Schichten z. B. aus Chromdioxid und Eisenoxid genutzt. Ihr Widerstand sinkt bei der Absorption von Wassermolekülen von etwa $10^{14}\ \Omega$ auf $10^{11}\ \Omega$. Auch Magnesiumchromat oder einige Salze können zwischen die zwei Elektroden (eine ist wasserdurchlässig) eingefügt werden. Ihr typischer Widerstand sinkt von ca. 10 MΩ auf 1 kΩ. Die Trägheit der Verfahren ist mit rund 30 s sehr groß. Die Messung muß, um Elektrolyse | Polarisation zu verhindern, mit Wechselstrom erfolgen. In einigen Fällen dient eine Heizung dazu, um das Material hin und wieder zu reinigen.

7.6.3 Gas-Sensoren

Die Messung von Gasen hat für viele Anwendungen fundamentale Bedeutung. So ist eine Vielzahl von Prinzipien im Einsatz. Sie betreffen u. a. die Änderung

- des elektrischen Widerstandes (im folgenden Text),
- der elektrischen Kapazität (siehe Feuchte-Sensor),
- des Stromflusses in einer elektrochemischen Zelle (siehe Potentiometrie),
- der Wärmeleitfähigkeit,
- der Spannung am Gate eines MOSFET (im Abschnitt 7.6.2),
- der Schwingfrequenz eines Resonators (Quarz) und
- der Absorption von Licht (Infrarotstrahlung, Mikrowellen).

In diesem Abschnitt werden nur Prinzipen behandelt, bei denen sich der Widerstand eines Materials durch das Gas ändert. Die einfachste Variante ist ein Pellistor gemäß Bild 7.7d. In eine poröse Sinterkeramik aus inertem ThO_2, Al_2O_3 oder SnO_2 ist eine Heizwendel (Pt oder Ir) eingebracht. Sie wird mit typisch 100 mW auf 200 bis 500 °C aufgeheizt. Außen befindet sich eine katalytisch aktive Schicht **(katalytischer Sensor)**, u. a. aus Pt, Pd und Rn. Die Wärmewirkung der chemischen Reaktion ändert die Temperatur des Sensors. Sie wird (in einer Brücke) direkt über den Heizwiderstand gemessen. Verbesserte Varianten entstehen dann, wenn Heizung und zu messender Widerstand weitgehend getrennt sind. Einige Varianten dieser **Halbleiter-Gas-Sensoren** zeigt Bild 7.7e bis j. Der

Perlentyp (Bild 7.7e) besitzt z. B. bei 0,3 mm ∅ einen 20 µm dicken Platindraht als Heizer. Der Widerstand des keramischen Materials ändert sich typisch von 10 kΩ auf 100 Ω. Die Röhrchen-Variante von Bild 7.7f ist mit einigen mm deutlich größer. Diese Taguchi-Gas-Sensoren sind weit verbreitet, u. a. zur Warnung vor Feuer und Heizgas und zur Überwachung von Verbrennungsprozessen. Ihre Einstellzeit beträgt einige Minuten. In den letzten Jahren sind auch Dick- und Dünnschicht-Sensoren, wie sie die Bilder 7.7h bis j zeigen, immer mehr in Gebrauch gekommen. Einen ersten CO-Sensor auf dieser Basis stellte Motorola 1996 vor. Geeignet sind alle Sensortypen für die brennbaren Gase (wie Iso-Butan, Methan, Propan, Äthanol, Wasserstoff, Natur- und Stadtgas ...), für Lösungsmitteldämpfe (wie Alkohol, Tuluol, Benzol, Chlorgase ...), für Stickoxide, für Luftverunreinigungen (Zigarettenrauch) und für Verbrennungsabgase (CO, Kohlenmonoxid). Ihre Selektivität für ausgewählte Gase kann durch eine äußere Beschichtung und durch ausgewähltes Halbleiter-Material (u. a. ZnO, Fe_2O_3, CuO, NiO, CoO, ZrO_2, Y_2O_3) stark erhöht werden. Typische selektierte Gase sind dann CO, CH_4, verschiedene Kohlenwasserstoffe, Chlorgase, H_2, H_2O, H_2S, Halogene, O_2 oder NO_x. Die Funktion der Sensoren ist vielfältig. Insgesamt setzt sich nämlich der Leitwert des Sensors aus den Oberflächen-, Korngrenzen- und Volumenanteilen zusammen. Das Gas kann also an der Oberfläche chemisorbiert werden und dort mit Sauerstoff-Molekülen reagieren. Dadurch werden Leitungselektronen an den Halbleiter abgegeben. Sein Leitwert erhöht sich. Ein reduzierendes Gas kann auch mit Sauerstoff reagieren, der im Kristallgitter des Halbleiters gebunden ist. Dabei bilden sich negativ geladene Sauerstoff-Leerstellen im Gitter. Sie diffundieren bei entsprechend hoher Temperatur in das Innere des Halbleiters und erhöhen den Leitwert.

7.6.4 MOS-FET-Sensoren

Chemisch sensibilisierte MOS-FETs treten unter zwei verschiedenen Bezeichnungen auf: ISFET nach Ionen-Sensitiver FET oder CHEM-FET (chemisch). Zwei typische Beispiele zeigt Bild 7.7k und l. Bei ihnen wird der Gate-Bereich den chemischen Substanzen – häufig Elektrolyten, seltener Gasen – zugänglich gemacht. So kann die Gate-Spannung und damit der Drainstrom verändert werden. Ähnlich wie bei den Gas-Sensoren oder bei der Potentiometrie sorgen zusätzliche Maßnahmen dafür, daß eine möglichst hohe Selektivität erreicht wird. Bei der Variante mit Ta_2O_5 (bzw. Si_3N_4) hängt das Gate-Potential von der jeweiligen Ionenkonzentration ab. Typisch sind Werte um 60 mV/[pH]. In diesem Fall wird eine hohe Empfindlichkeit für Alkali-, Ammonium- und Halogenid-Ionen erreicht. Auch eine Beschichtung der Membran, sogar mit Enzymen, ist zur Steigerung der Selektivität möglich. Eine Pd-Schicht macht z. B. die Gate-Elektrode für Wasserstoff sensibel. Zur Erhöhung der Stabilität kann eine Referenz-Elektrode im Elektrolyten gemäß Bild 7.7k sehr nützlich sein.

7.6.5 Bio-Sensoren

Mit verschiedenen Methoden ist es möglich, Sensoren herzustellen, die selektiv auf reaktive biologische Substanzen ansprechen. Dann wird von Bio-Sensoren gesprochen. Auf Anwendungen bei Lichtleitern wurde bereits auf S. 107 hingewiesen. An sie werden u.a. Enzyme, z. B. für Glukose oder Harnstoff bzw. Antigene | Antikörper für Immunmessungen gebunden. Ansonsten wirkt die reaktive Substanz unmittelbar mit der zu analysierenden Flüssigkeit oder mittelbar über eine Dialyse-Membran auf Meßfühler (z. B. FETs oder thermische Sensoren) ein. Enzymsensoren verwenden eine Trägerschicht aus meist wasserunlöslichen organischen Polymeren definierter Porengröße, durch die die nachzuweisenden Substanzen oder deren Reaktionsprodukte hindurchdiffundieren. Antikörper | Antigene gehen eine spezifische Bindung mit den nachzuweisenden Substanzen ein und verändern so die Eigenschaften der Trägerschicht. Sie sind zum Nachweis hochmolekularer Substanzen wie Proteinen, Nukleinsäuren oder Viren (Immunosensoren) geeignet. Bei den Meßfühlern werden so u. a. die optischen (Brechzahl, Extinktion, Fluoreszenz), elektrischen (elektrochemische Spannung, Dielektrizitätszahl), thermischen (Temperatur) oder mechanischen (Masse) Größen verändert. Ein generelles Problem der Biosensoren ist ihre Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität.

7.7 Grundlagen der Ausgabe

7.7.1 Überblick

Auf S. 95 sind die verschiedenen Möglichkeiten zusammengestellt, wie Technik auf den Menschen durch Aktoren einwirken kann. Sie geht dabei von unseren Sinnen aus. Für die physikalisch-chemischen Grundlagen ist es dagegen sinnvoller, eine andere Einteilung zu wählen, die dann auch die Gliederung der folgenden Abschnitte bedingt. Dabei ist zu beachten, daß alle Einflüsse sich in ihrer Intensität bis zum Schmerz steigern lassen. Er wird daher im folgenden nicht mehr berücksichtigt. Ebenso gibt es für viele Einwirkungen einen Bereich, der als angenehm empfunden wird. Auch hierauf wird im folgenden nicht eingegangen. Folgende Gebiete sind zu berücksichtigen:

- Chemie
- Thermodynamik
- Elektrische Ströme, Felder und Wellen
- Mechanik (Abschnitt 7.7.2)
- Licht (Abschnitt 7.8)

Chemische Einwirkungen erfolgen primär durch Stoffe (Gase, Flüssigkeiten und|oder feste Substanzen), die vor allem den Geruch und den Geschmack beeinflussen. Hierbei sind drei Aspekte zu beachten:

1. Woher kommen diese Stoffe bzw. wie werden sie erzeugt?
2. Wie werden sie zur Zunge bzw. in den Nasenraum transportiert?
3. Wie werden diese Stoffe beseitigt oder verändert, wenn ihre Wirkung aufhören soll?

Hierzu sind z. Z. kaum Anwendungen bekannt. Bestenfalls werden gasförmige Substanzen über Ventile dosiert – z. B. mit der Klimatisierung in Kaufhäusern – in Räume gebracht. Dann sind sie allgemein aber nicht individuell wirksam. Der Abbau erfolgt dabei aber unkontrolliert. In Anbetracht dieser Situation kann hier auf weitere Ausführungen verzichtet werden. Es sei jedoch noch darauf hingewiesen, daß es auch prinzipiell möglich ist, die entsprechenden Nerven oder Gehirnregionen zu stimulieren.

Bei der **thermischen** Beeinflussung sind vier Fälle zu unterscheiden. Sie betreffen die Kombinationen von *Erwärmung|Abkühlung* in Bezug auf *Körperpartien|Umgebung*. In allen Fällen ist ein Wärmetransport notwendig. Er kann durch Strahlung, Wärmeleitung oder Konvektion erfolgen. *Strahlung* kann einmal bevorzugt ganzheitlich durch Flächen|Wände im Raum sowohl kühlend als auch wärmend wirksam werden. Andererseits kann sie lokal durch gebündeltes Infrarot, gebündelte Mikrowellen usw. auf Körperteile einwirken. Eine entsprechende Kühlung (lokaler Wärmeentzug) ist so jedoch kaum möglich. Die *Wärmeleitung* erfordert einen direkten Kontakt und ist daher wohl nur auf Körperteile anwendbar. Zur Erwärmung sind hier vielfältige Methoden (alle thermischen Effekte) einsetzbar. Besonders leicht zu gestalten ist die elektrische Stromwärme. Schwieriger ist es bei einer lokalen Kühlung. Hier kommt praktisch nur der *Peltier*-Effekt in Betracht. Er wurde 1834 von Peltier gefunden und ist im wesentlichen die Umkehrung des Thermoeffekts (Seebeck-Effekts), wie er bei Thermoelementen genutzt wird. Ein elektrischer Strom I durchfließt gemäß **Bild 7.8a** (umseitig) einen Übergang zwischen zwei unterschiedlichen metallischen Leitern oder Halbleitern. Dabei entsteht in der Zeit t eine Temperaturdifferenz. Für die erzeugte bzw. abgeleitete Wärmemenge Q gilt dann

$$Q = \Pi \cdot I \cdot t \ .$$

Der typische Peltierkoeffizient Π liegt bei 0,5 bis 5 mJ/K. Es kühlt sich jenes Metall ab, welches für eine positive Spannung beim Thermoelement erhitzt werden muß. Eine wirksame Kühlung wird mit speziell für diesen Zweck entwickelten Peltierelementen (Bild 7.8b) erreicht. Dazu werden spezielle Halbleitermaterialien mit einem großen Peltierkoeffizienten hergestellt.

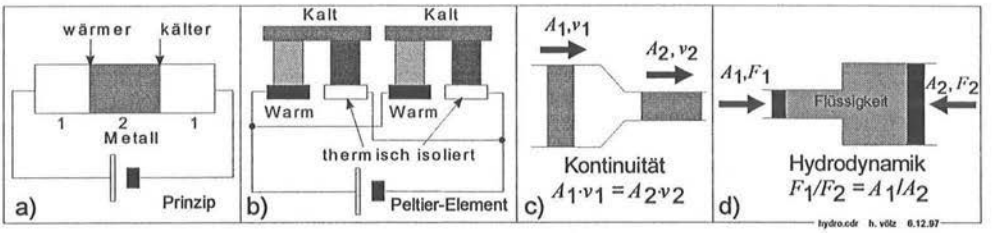


Bild 7.8 Peltiereffekt (a und b) und zwei Grundlagen der Aero-Hydro-Mechanik (c und d)

Konvektion läßt sich besonders gut durch kalte oder warme – eventuell mit hoher Feuchte – Luftströme (Ventilator|Föhn) bewirken. Für Körperteile können eventuell auch Flüssigkeiten genutzt werden.

Die Beeinflussung durch **Felder | Wellen** ist äußerst vielfältig. Auf den Einsatz von Elektroden, die mit elektrischem Strom direkt das Nervensystem stimulieren, wurde bereits in den physiologischen Abschnitten mehrfach hingewiesen. Auch eine ähnliche Wirkung von speziellen Magnetfeldern ist teilweise möglich (vgl. S. 64). Wenig bekannt sind Wirkungen von statischen elektrischen und | oder magnetischen Feldern. Wechselfelder können da schon deutlicher wirksam werden. Zumindest tritt wie bei der Strahlung (jeder Frequenz) eine Erwärmung auf. Selbst die Untersuchungen bzgl. einer eventuell schädigenden Wirkung sind noch nicht sehr gut gesichert. Zumindest sollten aber gewisse Grenzwerte sicherheitshalber eingehalten werden (vgl. S. 91).

7.7.2 Mechanische Ausgaben

Mechanische Einwirkungen auf den Menschen können auf drei grundsätzlich verschiedene Arten erfolgen:

1. Der ganze Körper wird bewegt bzw. beeinflußt.
2. Körperteile werden mit Druck, Zug, Torsion, Vibration usw. beansprucht.
3. Schallschwingungen erreichen das Ohr.

Für die ganzheitliche Bewegung unseres Körpers – z. B. in virtuellen Welten oder bei verschiedenen Simulationen – sind große Energien erforderlich. Dann ist es – wie bei der Automatisierung oder im Maschinenbau – sinnvoll, mit Hydrodynamik zu arbeiten. Hier ist es nämlich möglich, über das hydrodynamische Gesetz (Bild 7.8d) hohe Kraftverstärkung zu erreichen. Außerdem arbeiten derartige Prinzipien auch „weicher". Eine Beeinflussung des ganzen Körpers kann weiter für künstlichen Wind notwendig sein. Mittels der Kontinuitätsgleichung (Bild 7.8c) lassen sich dann durch Bündelung gerichtete Luftströme mit hoher Geschwindigkeit erreichen. Da der Elektrotechniker und der Elektroniker diesen Prinzipien oft wenig zutraut, zeigt die Tabelle ihre prozentualen Anteile in der Automatisierung für die Jahre 1970 und 1990. Doch nicht nur die Pneumatik, sondern generell die Mechanik, steht heute in dem Ruf, sehr teuer, technologisch aufwendig, langsam und schwer handhabbar zu sein. Sie gilt deshalb als unmodern, und man ist meist bemüht, sie soweit wie irgend möglich zu vermeiden. Diese Tendenz hat das Problem mit sich gebracht, daß mechanische Geräte und Geräteteile immer schlechter beherrscht werden. Ja selbst ihre solide Beschreibung ist wenig gefragt. Nach der optischen Ausgabe ist sie aber für die Mensch-Technik-Schnittstelle am wichtigsten. Daher wird im folgenden der Versuch unternommen, wenigsten die wichtigsten Prinzipien für die Punkte 2. und 3. etwas ausführlicher darzustellen. Dabei werden aber u. a. Relais, Motoren, Antriebe usw. nicht behandelt, Auch auf die immer wichtiger werdenden MEMS (micro electro mechanical systems) wird nur an zwei Beispielen, nämlich bei der Großprojektion (S. 219) und bei den Mikrophonen (S. 171) eingegangen. Für den 2. und 3. Punkt sind folgende Methoden geeignet:

Gebiet	1970	1990
Pneumatik	80	60
Elektrik	17	29
Hydraulik	3	5

- magnetische Wirkungen;
- elektrische Wirkungen;
- Effekte, die sich vor allem durch Resonanzerscheinungen auszeichnen

Die magnetisch bedingten mechanischen Kräfte haben heute die größte Anwendungsbreite für Aktoren. Dazu sei nur die große Vielfalt der Motoren, Anzugsmagnete, Lautsprecher, Vibratoren, Kopf- und Ohrhörer genannt. Insbesondere bei den MEMS (Bauelemente der elektronischen Mikro-Mechanik) gewinnt die elektrostatische Kraft immer mehr Bedeutung. Erst durch die so möglichen, kleinen Abstände erreicht sie nutzbare Größe. Beide Effekte sind sowohl statisch als auch dynamisch anwendbar. Die Ablenkung von Elektronen ist entscheidend für die Funktion vieler Anzeigen, insbesondere der Monitore. Neben diesen grundlegenden Prinzipien sind noch vier Effekte für mechanische Aktoren so wichtig, daß sie nun kurz behandelt werden. Das sind die Magnetostriktion, der Piezo-Effekt, die Oberflächenwellen und die ferroelektrischen Folien. Sie werden jedoch vorwiegend dynamisch und damit auch in ihrer Resonanz betrieben.

7.7.3 Magnetismus

Magnetfelder bewirken Kräfte auf dreierlei Art:

- Magnetpole ziehen sich an oder stoßen sich ab.
- Ein Magnetfeld wirkt auf einen stromdurchflossenen Leiter oder eine bewegte Ladung ein.
- Ein Luftspalt in einem magnetischen Kreis versucht sich zu verkleinern.

Alle drei Effekte lassen sich über die gesamte Feldenergie berechnen:

$$W_m = \int_0^V \int_0^B H \cdot \mathrm{d}B \cdot \mathrm{d}V \,.$$

Es kann sich also das magnetische Feld H und B aber auch das Volumen V, in dem das Feld auftritt, verändern. Der stabile Zustand ist immer jener mit der geringsten Energie. Diesen versucht das System mit der auftretenden Kraft zu erreichen. So folgt bei einer differentiellen Wegänderung z. B.

$$F = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}s} \cdot$$

Am übersichtlichsten erfolgt so etwas an einem Magnetkreis mit Luftspalt (**Bild 7.9**a; nächste Seite). Hier existiert ein beachtlicher Anteil der Energie im Luftspalt. Für den Luftspalt mit dem Querschnitt A folgt dann die Tragkraft eines Magneten zu

$$F = \frac{\mu_m}{2} \cdot H^2 \cdot A \quad \text{bzw.} \quad F = \frac{B \cdot H \cdot A}{2} \cdot$$

Auffällig ist, daß hiebei nicht der Abstand eingeht. Durch ihn wird aber wesentlich der Zusammenhang zwischen B und H beeinflußt. Für eine über dem gesamten Kreis gemittelte Permeabilität μ_m – das ist wegen der Hysterese und der Entmagnetisierung nicht trivial – gilt nämlich $B = \mu_m \cdot H$.

Jeder elektrische Strom und jede bewegte Ladung erzeugen ebenfalls ein Magnetfeld. Ist in ihrer Umgebung ein anderes Magnetfeld Vorhanden, So wirkt es auf den Strom bzw. die Ladung mit einer Kraft ein. Für einen elektrischen Strom I mit der Leiterlänge l im Magnetfeld B gilt so

$$F = I \cdot l \cdot B \sin(\beta).$$

Darin ist β der Winkel zwischen der Leiterachse und den B-Linien (Bild 7.9b). Bei einer Spule mit n Windungen und dem Querschnitt A folgt für eine Anordnung gemäß Bild 7.9c dann ein Drehmoment

$$M_{dreh} = I \cdot n \cdot A \cdot B \cdot \sin(\beta).$$

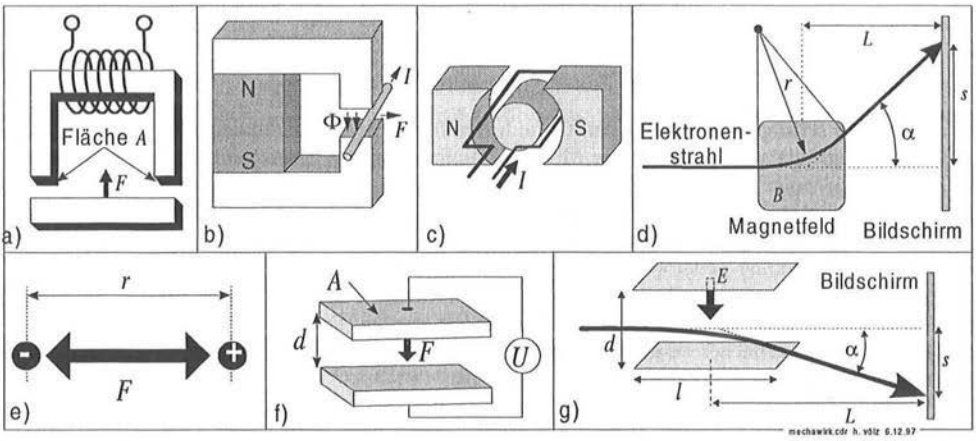


Bild 7.9 Kraftwirkungen magnetischer und elektrischer Felder

Ein Magnetfeld der Induktion B wirkt auf eine elektrische Ladung Q, die mit der Geschwindigkeit v bewegt wird, mit der Lorentz-Kraft

$$F = Q \cdot v \times B = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\beta) \cdot$$

Ein Elektron mit der Ladung e_0 und der Masse m_0 wird innerhalb des Magnetfeldes daher auf eine Kreisbahn mit dem Radius r gezwungen (Bild 7.9c)

$$r = \frac{m_0}{e_0} \cdot \frac{v}{B} \approx 3{,}37 \cdot \sqrt{\frac{U_b}{B}} \text{ in V, T und cm.}$$

U_b ist darin die Beschleunigungsspannung (siehe nächste Seite). Wirkt das Feld über eine Länge l ein und befindet sich ein (Bild-) Schirm im Abstand L, so ergibt sich eine Ablenkung um den Weg

$$s = B \cdot l \cdot L \sqrt{\frac{e_0}{m_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot U_b}} \approx 0{,}298 \cdot B \cdot l \cdot L \sqrt{\frac{1}{U_b}} \text{ in T, cm, V.}$$

7.7.4 Elektrostatik

Die Wirkung zwischen elektrischen Ladungen ist ähnlich wie bei Magnetfeldern. Für zwei Punktladungen gilt das von Coulomb 1874 mittels einer Drehwaage bestimmte und nach ihm benannte Gesetz (Bild 7.9e):

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \cdot$$

Die beiden Punktladungen Q_1 und Q_2 befinden sich im Abstand r. $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ $C^2 J^{-1} m^{-1}$ ist die Feldkonstante des Vakuums. Die zwischen ihnen wirkende Kraft ist anziehend bei entgegengesetzten Ladungen und abstoßend bei gleicher Ladung. Ist der Raum mit der relativen Permeabilität ε_r erfüllt, so ist oben ε_0 durch $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ zu ersetzen. Für einen Zweiplattenkondensator mit dem Abstand d und der Fläche A ergibt sich daraus bei einer Spannung U die Kraft (Bild 7.9f)

$$F = \frac{\varepsilon \cdot A \cdot U}{2 \cdot d^2}.$$

Vielfach ist es besser, statt der Spannung U und des Abstandes d die elektrische Feldstärke $E = U/d$ zu benutzen. Materie mit einer relativen Permeabilität $\varepsilon_r > 1$ wird daher in das Feld hineingezogen. Auf eine Ladung Q wirkt es mit der Kraft

$$F = E \cdot Q.$$

Ähnlich wie ein Schwerefeld auf Massen wirkt, wird eine bewegliche Ladung beim Durchlaufen einer Spannung U_b beschleunigt. Ein Elektron erreicht so die Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e_0 \cdot U_b}{m_0}} \approx 5{,}93 \cdot 10^7 \sqrt{U_b} \text{ (in V und cm/s)}.$$

Bewegt es sich mit dieser Geschwindigkeit senkrecht zu einem Feld E, so entsteht wie beim Wurf eine parabelförmige Ablenkung (Bild 7.9g). Hat das Feld die Länge l, so entsteht der Winkel α mit

$$\tan(\alpha) = \frac{e_0 \cdot E}{m_0 \cdot v^2} = \frac{l \cdot E}{2 \cdot U_b}.$$

Nach dem Durchlaufen der Strecke L (zum Bildschirm) wird die Ablenkung s erreicht.

$$s = L \cdot \tan(\alpha) = \frac{l \cdot L \cdot E}{U_b}$$

7.7.5 Piezo-Effekte

Der **Piezo-Effekt** wurde bereits bei den Sensoren (S. 98, Bild 7.4i, j) eingeführt. Die entsprechenden Aktoren werden durch Spannungen erregt. Die angewendeten Materialien betreffen dann zwei Gruppen:

- Kristalle, u. a. Quarz (SiO_2), $Bi_{12}GeO_{20}$, $Bi_{12}SiO_{20}$, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$ und
- Keramik, u. a. $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $Pb(Ti\text{-}Zr)O_3$, $PbNb_2O_6$.

Historisch bedeutsam sind noch $NaK \cdot C_4H_4O_6 \cdot 4H_{27}$ (Seignettesalz) und $NaMg_3Al_6B_3Si_6O_{27}(OH)_4$ (Turmalin). In den meisten Materialien liegt die typische Ausbreitungsgeschwindigkeit bei 1500 bis 5000 m/s. Die entsprechenden Schwinger werden in sehr verschiedenen Formen hergestellt. Je nach dem Anbringen der Elektroden und der anisotropen Vorzugsrichtung können dabei u. a. unterschieden werden: Längsschwinger (**Bild 7.10** a und j), Querschwinger (a), Dickenschwinger (a, c und d), Torsions- | Scherungsschwinger (b) sowie Biegeschwinger (h). Als Formen kommen somit z. B. Quader, Zylinder, Scheiben, Ringe und Rohre vor.

Piezo-Materialien ermöglichen des weiteren **Oberflächenwellen**-Bauelemente (SAW = surface acoustic waves bzw. AOW = akustische Oberflächenwellen, OFW). Typisch sind sie für Flüssigkeiten. An ihnen wurden sie zuerst von Lord Rayleigh beschrieben. Sie treten aber auch bei Festkörpern auf. Die notwendige potentielle Energie ist dann aber nicht die Schwerkraft, sondern die Elastizität des Mediums. Das typische Verhalten einer Oberflächenwelle im Festkörper zeigt Bild 7.10f. Die Verformungen des Materials an der Oberfläche sind besonders groß und nehmen zur Tiefe hin schnell ab. Bei einer Tiefe von $3 \cdot \lambda$ ist die Bewegung bereits vernachlässigbar. An der Oberfläche bewegt sich der Gitterpunkt in einer Ellipse entgegen der Ausbreitungsrichtung (Bild 7.10g). Bei Flüssigkeitswellen tritt die umgekehrte Richtung auf. Bei ca. $\lambda/4$ existiert eine lineare, vertikale Schwingung. Darunter kehrt sich die Umlaufrichtung der Ellipse um. Die OFW dringen deshalb so wenig in die Tiefe ein, weil ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit erheblich von jener der Volumenwellen abweicht. Dadurch breiten sich OFW fast ungedämpft aus und erreichen Güten von 10^4 bis 10^5. Die Effekte sind bis in den GHz-Bereich nutzbar. Daher werden sie hauptsächlich bei Verstärkern,

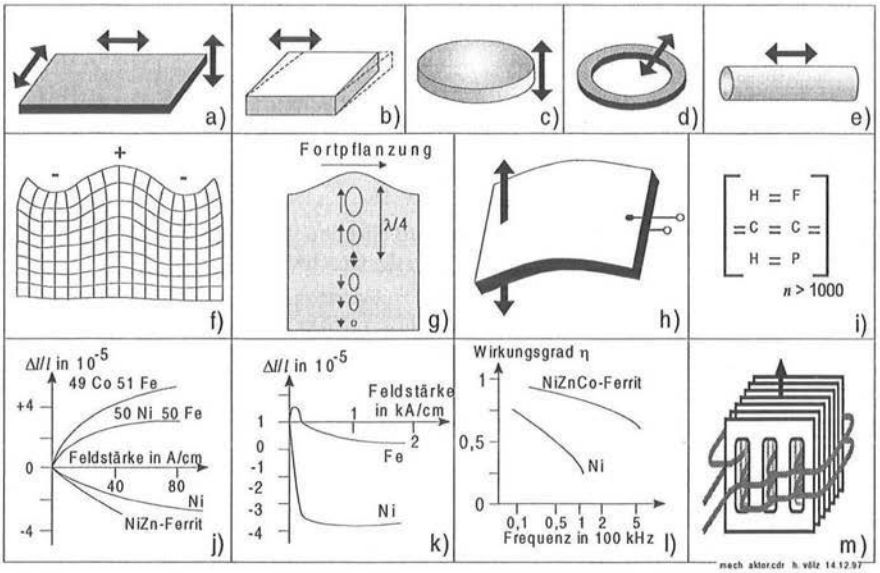


Bild 7.10 Schwinger (a bis e und h), Oberflächenwellen (f, g), Piezo-Folie (h, i) und Magnetostriktion (j bis m).

Filtern und optischen Gittern angewendet. Als Aktoren für die Mensch-Technik-Schnittstelle dürften wahrscheinlich mit ihnen gut erzeugbare stehende Wellen Bedeutung erlangen.

Auch **Hochpolymeren-Folien** (HP-Filme) können deutliche Piezoelektrizität zeigen. Beim Beispiel mit der Formel von Bild 7.10i handelt es sich also um Polyvinylidenfluorid, einem Fluor-Kohlenstoff-Harz. Solche Folien wurden erstmalig 1969 von Kawai beschrieben. Ihre Herstellung erfolgt in einem mehrstufigen Prozeß, der Ähnlichkeit mit der Herstellung von Elektreten besitzt. Die Folie wird bei 60 und 100 °C auf die etwa vierfache Länge gedehnt. Durch Aufdampfen einer dünnen Aluminiumschicht werden beide Seiten leitfähig gemacht. Bei Temperaturen zwischen 80 und 100 °C wird schließlich der Film durch ein Gleichspannungsfeld permanent polarisiert. Der dann vorhandene piozoelektrische Effekt beträgt zwar nur 10% der anderen Materialien, ermöglicht aber völlig neue Bauelemente. Gemäß Bild 7.10h kann ein leicht gewölbtes HP-Element an seinen Enden einspannt werden. Bei angelegter Wechselspannung schwingt es in transversaler Richtung, in einer Art „Atembewegung". So können neue Lautsprecher, aber auch Ventilatoren gebaut werden.

7.7.6 Magnetostriktion

Die meisten magnetischen Materialien besitzen magnetoelastische (magnetostriktive) Eigenschaften. Sie verändern ihre Abmessungen, ähnlich wie bei der Piezolektrizität, jedoch mit der magnetischen Feldstärke. Hierauf wurde bereits auf S. 102 hingewiesen. Dieser Effekt ist jedoch meist unabhängig von der Richtung der Feldstärke. Daher benötigen Anwendungen gewöhnlich eine magnetische Vorspannung (Feldstärke). Der Effekt ist außerdem zumindest bei Metallen recht klein. Bild 7.10j zeigt Kennwerte für brauchbare magnetostriktive Metalle bei kleinen und Bild 7.10k bei großen Feldstärken. In Resonanz lassen sich z. B. mit Nickel beachtliche Wirkungsgrade erreichen (Bild7.10l). Den Aufbau eines typischen Ultraschallschwingers zeigt Bild 7.10m.

7.7.7 Richtcharakteristiken

Viele Sender (Antennen, Lichtquellen, Lautsprecher usw.) strahlen Energie bevorzugt in bestimmte Raumrichtungen. Viele Empfänger (Antennen, Mikrophone) empfangen ganz anlog ihre Signale be-

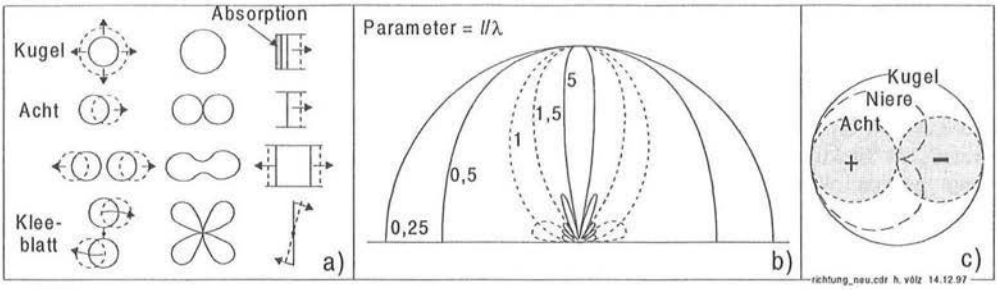


Bild 7.11 Richtcharakteristiken von Strahlern

vorzugt aus einzelnen Raumrichtungen. Beide Fälle sind voll reziprok, denn sie beruhen auf gleichartigen, physikalischen Zusammenhängen. Die wichtigsten Richtwirkungen faßt **Bild 7.11**a mittels mechanischer Schwingungen zusammen. Wenn sich eine Kugeloberfläche allseitig, ohne bevorzugte Richtungen, quasi „atmend" gleichmäßig ausdehnt und zusammenzieht, dann erfolgt die Schallabstrahlung gleichmäßig in alle Raumrichtungen. Es liegt ein Kugelstrahler vor. In guter Näherung wird das auch von einer einseitig schwingenden, flachen Membran erreicht, sofern ihre Abmessungen klein gegenüber der Wellenlänge des abgestrahlten Schalles sind. Dann liegt nämlich eine Punktquelle vor, für die im optischen Bereich das Huygenssche Prinzip bekannt ist. Eine typische Achtercharakteristik liegt u.a. bei einfachen Dipolantennen vor. Diesen Effekt leistet dann eine ebenfalls kleine Membran, wenn sie nach beiden Seiten gegenphasig (+ und -) Schall abgibt. Werden Kugel- und Achterstrahler kombiniert, so entsteht die typische Nierencharakteristik von Bild 7.11c. Bewegen sich zwei Membranen in einem gewissen Abstand gegenphasig (Bild 7.11a), so entsteht eine leicht geänderte Achtercharakteristik. Eine sich drehende Membran bewirkt ein Strahlungsfeld, das einem vierblättrigen Kleeblatt ähnelt. Fast jede Richtcharakteristik ändert sich mit der Frequenz oft erheblich. Hierbei geht das Verhältnis der Abmessungen des Senders und der Wellenlänge wesentlich ein. Für eine gleichförmig schwingende quadratische Membran zeigt Bild 7.11b einige Beispiele. Auf weitere Effekte, die u. a. durch Reflektoren, Spiegel (z. B. parabolisch), Abschirmungen und Interferenzen entstehen, wird noch genauer bei den Lautsprechern und Mikrophonen eingegangen.

7.7.8 Erzeugung von Elektronen

Für mehrere Aktoren sind in einem Vakuumgefäß frei bewegliche und damit leicht steuerbare Elektronen erforderlich (z. B. für Anzeigen und Monitore). Die meisten Elektronen sind jedoch fest an einzelne Atome gebunden. Bei vielen Materialien, insbesondere bei den Leitern, sind aber die Elektronen der äußeren Schale nicht mehr fest an ein Atom gebunden. Sie gehören kollektiv gleichzeitig zu mehreren und bewegen sich daher ähnlich einem Gas relativ frei im Material. Sie „fliegen" dort mit einer thermischen Geschwindigkeit v umher und stoßen dabei oft zusammen. Daher kann für dieses Elektronengas vereinfachend die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung angenommen werden:

$$\frac{dN}{N} = \frac{4 \cdot v^2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot R \cdot T} \right)^{3/2} \cdot e^{\frac{v^2}{2 \cdot R \cdot T}} dv \,.$$

Darin ist R die Gaskonstante und T die absolute Temperatur. Für einige Temperaturen zeigt den Zusammenhang **Bild 7.12**a, auf der übernächsten Seite. Als typische Geschwindigkeit wird u. a. das Maximum gemäß der Ableitung der Funktion bzw. der quadratisch gemittelte Wert gewählt

$$\hat{v} = \sqrt{2 \cdot R \cdot T} \text{ bzw. } \sqrt{v^2} = \sqrt{3 \cdot R \cdot T} \,.$$

Für diese Elektronen entspricht die Oberfläche des Materials einer Gefäßwand. Damit sie das Material verlassen können, müssen sie also diese Grenze überwinden. Dazu benötigen sie eine ausreichende Energie. Sie heißt Austrittsarbeit. Entsprechend der Verteilung gibt es für jede Temperatur immer

einige Elektronen, die das Material verlassen können. Ihre Anzahl ist jedoch bei Zimmertemperatur sehr klein. Dies wird dann noch deutlicher, wenn nicht der differentielle Anteil der Elektronen zur Darstellung benutzt wird, sondern jene relative Anzahl, die eine bestimmte Energie überschreiten. Das ergibt die Boltzmann-Verteilung von Bild 7.12b. Genauer gilt für Elektronen aber die Fermi-Verteilung (vgl. S. 136),

Element	eV	Element	eV	Element	eV
Cs	1,81	Nb	4,00	Fe	4,76
Rb	2,16	Si	4,02	**Material**	
Sr	2,25	Ag	4,05	Cs-O-Ag	0,75
Ka	2,26	Zn	4,25	BaO	0,99
Na	2,30	Al	4,25	BaO+SrO	1,00
Ca	2,96	Cu	4,29	W-O-Ba	1,30
Cr	3,72	Hg	4,53	W+Ba	1,60
Mg	3,96	Ge	4,55	W+Th	2,60

$$W = \frac{1}{2} m_0 \cdot v_{th}^2 = k \cdot T = e_0 \cdot U_T \cdot$$

Hierbei sind $m_0 = 9{,}109853 \cdot 10^{-31}$ kg die Masse des Elektrons, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur in K und $e_0 = 1{,}602189 \cdot 10^{-19}$ As die Ladung des Elektrons. Für die Temperaturspannung gilt die Näherung U_T [Volt] $\approx 8{,}6 \cdot 10^{-5}\ T$ [K]. Es ist jene Spannung, nach derem Durchlaufen die Elektronen die thermische Geschwindigkeit v_{th} erreichen. Die Austrittsarbeit ϕ ist also jene Energie, bei der eine „merkliche" Anzahl von Elektronen das Material verläßt. Einige typische Werte sind in der obenstehenden Tabelle über die Spannung gemäß $U = \phi / e_0$ in Elektronenvolt (eV) angegeben. Die Energie kann den Elektronen (dem Material, der Kathode) auf folgende Weise zugeführt werden:

- **Thermo**-Emission, z. B. alle Elektronenröhren mit geheizter Kathode,
- **Photo**-Emission, z. B. Photoempfänger (S. 103ff.) und Bildaufnahmeröhren (CCD),
- **Feld**-Emission, u. a. Feldelektronen-Mikroskop und -Display,
- **Stoß**-Emission durch Ionen und als *Sekundärelektronen*, u. a. bei Gasentladungsröhren, SEV und Plasma-Panels (Abschnitt 7.7.8),

Die **Thermo-Emission**, auch Glüh-Emission genannt, wurde 1908 von Richardson entdeckt. 1928 erhielt er dafür den Nobel-Preis. Mit der Richardson-Konstanten A (theoretisch ≈ 120 A cm^{-2} K^{-2}), der Boltzmann-Konstanten $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J·K^{-1} und der absoluten Temperatur T folgt die Stromdichte einer geheizten Kathode zu:

$$j = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\varphi}{k \cdot T}} .$$

Die oft verwendete Wehnelt-Kathode aus BaO mit Alkali-Beimengungen emittiert bei etwa 900 °C rund 200 mA/cm^2, das sind etwa 10^{18} Elektronen je cm^2. Daten anderer Kathoden enthält die untenstehende Tabelle. Einige experimentell ermittelte Stromdichten zeigt Bild 7.12c. Hier wird besonders deutlich, daß erst ab einer bestimmten Temperatur ein deutlicher Strom auftritt. Der Rotglut von Oxidkathoden entsprechen etwa 800 °C und 0,1 eV, der Weißglut von Wolfram-Kathoden 2000 °C und 0,2 eV. Bei der Thermo-Emission ist also die thermische Energie der Elektronen immer klein gegenüber der Austrittsarbeit ϕ. Infolge der statistischen Energieverteilung gibt es dennoch genug Elektronen mit genügend Energie zum Überwinden der Austrittsarbeit. Als Richtwert gilt dafür der Zusammenhang:

Material	Austritts-arbeit W in eV	Richardson-Konstante in Acm^{-2}K^{-2}	Betriebs-temperatur in K	Schmelz-temperatur in K	Emission in Acm^{-2}
Ba	2,5	60	800	1140	
Cs	1,9	162	293	322	
Mo	4,16	55	2300	2910	
Ni	4,0	1380			
Pt	6,27	17000			
Ta	4,1	40 - 60	2100	3140	0,17 - 0,65
Th	3,4	60	1500	2130	
W	4,54	600 - 100	2500	3660	0,3 - 0,7
BaO+SrO	1,0 - 1,6	10-2 - 10-3	1100		0,15 - 30
BaO+ThO	1,0 - 1,5	10-2 - 10-3	1800		
W+Th	2,6	3,0	1900		0,7 - 1,5

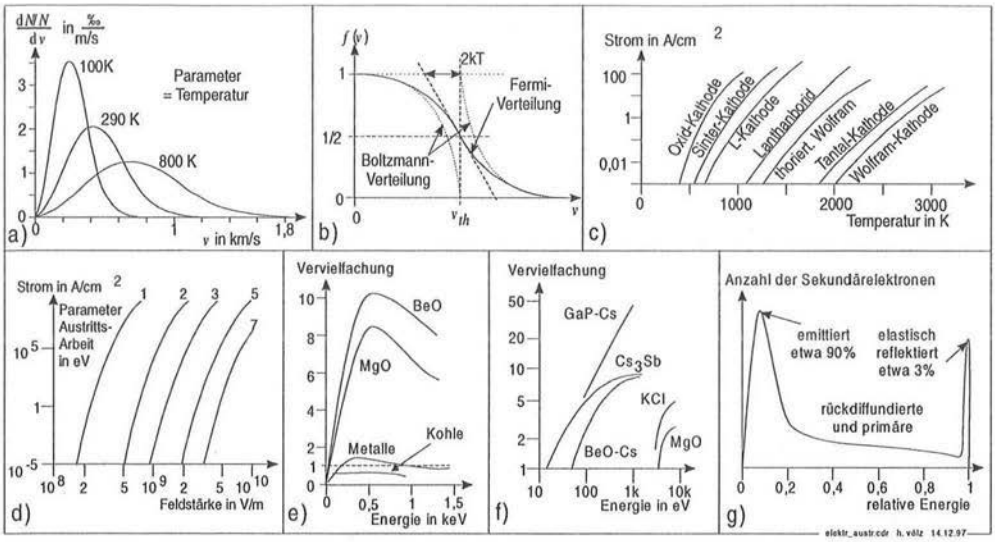


Bild 7.12 Grundlagen zur Emission von Elektronen

$$U_T \approx \left(\frac{1}{20} \text{ bis} \frac{1}{100}\right) \cdot \phi .$$

Das sind folglich gerade jene Elektronen, die in der Verteilungskurve von Bild 7.12b ganz rechts liegen. Hier gilt recht gut die Maxwell-Verteilung. Der relative Anteil der austretenden Elektronen folgt daher näherungsweise zu

$$\frac{n}{n_{ges}} = e^{-U_0/U_T} \approx 10^{-4} \text{ bis } 10^{-9} .$$

Hieraus folgt, daß eine Temperaturänderung von ±10 % den Sättigungsstrom auf das Zehnfache ansteigen oder auf ein Zehntel sinken läßt. Bei der Thermo-Emission sind *direkt* und *indirekt* geheizte Kathoden zu unterscheiden. Bei einer direkt geheizten ist der stromerhitzte Draht direkt mit der Emissionsschicht überzogen, also auch unmittelbar die Kathode. Bei der indirekten Kathode ist der Heizdraht mit Al_2O_3 gegenüber der eigentlichen Kathode elektrisch aber nicht thermisch isoliert. Sie besteht aus Nickel mit einer aufgetragenen Emissionsschicht. Heizung und Emission sind also elektrisch getrennt. Die gesamte Kathode besitzt vorteilhaft ein konstantes Potential. Die Nachteile sind höhere Heizleistung und zeitliche Verzögerung, bis die Kathode die richtige Temperatur besitzt. Für das Emissionsmaterial werden genutzt

- reine Metall-Kathoden (nur direkt),
- thorierte Wolfram-Kathoden (nur direkt),
- Oxid-Kathoden (BaO, SrO und evtl. CaO),
- Vorrats-Kathoden (nur indirekt).

Die ersten beiden Kathoden sind sehr robust und werden vor allem in Senderöhren benutzt. Sie sind nur als reine Draht-Kathoden verwendbar und benötigen viel Heizenergie. Bei den Vorrats-Kathoden werden die Nachteile der üblichen Oxid-Kathoden dadurch vermieden, daß ständig das verbrauchte, verdampfte oder vergiftete Oxid durch neues ersetzt wird. Sie vermeiden so auch weitgehend das Entstehen einer schlecht leitenden Zwischenschicht.

Bei sehr hoher elektrischer Feldstärke (10^8 bis 10^{10} V/cm) an der Kathode tritt die **Feld-Emission** auf. Die Zusammenhänge zeigt Bild 7.12d. Solche Feldstärken sind praktisch nur bei sehr kleinen Krümmungsradien, also feinsten Spitzen erreichbar. Auf dieser Basis arbeitet das Feldelektronenmikroskop. Die geringsten Geometrie-Abweichungen und Verunreinigungen an der definierten Spitze bewirken unterschiedliche Emissionen. Die gewaltige Vergrößerung entsteht durch den vergleichsweise sehr großen makroskopischen Abstand zum Bildschirm und die geradlinige Bewegung der Elektronen. Mit den Mitteln der Mikroelektronik ist es in den letzten Jahren möglich geworden, entsprechend feine Spitzen reproduzierbar und massenhaft herzustellen. Hier bahnen sich völlig neue Displaytechniken an (vgl. S. 216). Bei sehr dünnen Drähten direkt geheizter Kathoden überlagert sich der Thermo-Emission noch die Feld-Emission. Dann tritt kein eindeutiger Sättigungsstrom mehr auf.

Bei der **Stoß-Emission** treffen vor allem Ionen und|oder Elektroden auf ein Material und schlagen dort mit ihrer kinetischen Energie ein oder mehrere Elektronen heraus. Der Effekt ist ähnlich wie bei einem Wassertropfen, der ins Wasser fällt und dabei viele Wassertropfen herausschleudert. Sind die Primärteilchen Elektronen, so heißen die herausgeschlagenen **Sekundärelektronen**. Das Verhältnis von auftreffender zu austretender Elektronenzahl heißt Ausbeutefaktor δ. Er hängt von der Energie der Primärelektronen und vom Material ab. Einige Beispiele zeigen Bild 7.12e und f. Meist existiert eine günstige Primärenergie (Maximum). Es werden drei Materialgruppen unterschieden:

- $\delta < 1$ tritt hauptsächlich bei Alkali- und Erdalkalimetallen sowie Kohlenstoff (Graphit)
- $1 < \delta < 2$ ergibt sich für die meisten Metalle
- $\delta > 2$ gilt vor allem Metalloxide und -chloride (BeO $\approx$ 10, Mg $\approx$ 8, NaCl $\approx$ 6) und einige Metallegierungen (GaP-Cs $\approx$ 50, Cu-Mg $\approx$ 8, Ni-Be $\approx$ 12, Al-Cu $\approx$ 10).

Die Sekundärelektronen besitzen gewöhnlich eine typische Energieverteilung, wie sie die Bild 7.12g zeigt. Die Verzögerung der Sekundärelektronen ist mit 10^{-10} s sehr gering.

7.7.9 Gasentladungen

Eine Gasentladungsröhre ist ein hermetisch abgeschlossenes Gefäß, in dem sich ein Gas und zumindest zwei Elektroden, Anode und Kathode, befinden. Eigentlich sind Gase Nichtleiter. Ein Stromfluß kann daher erst dann stattfinden, wenn Gasmoleküle|-atome ionisiert und|oder freie Elektronen vorhanden sind. Praktisch gibt es jedoch immer wenigstens einige Ladungsträger (Ionen, Elektronen). Allein die auf der Erde stets vorhandene Höhenstrahlung erzeugt in der Luft ständig etwa 10^3 Ionenpaare je cm^3. Weitere Ladungsträger können durch Lichteinfall oder andere Energien entstehen.

Zur weiteren Betrachtung sei eine lange, mit einem Edelgas gefüllte Entladungsröhre (**Bild 7.13**a) gewählt. Der Druck beträgt ca. 1 Pa ($\approx 7{,}5 \cdot 10^{-3}$ Torr). Wird dann an die Elektroden eine Spannung von ca. 500 Volt angelegt (zur Strombegrenzung über einen Vorwiderstand), so zeigt sich eine leuchtende Gasentladung, die vor allem durch die positive Säule bestimmt ist. Wird der Gasdruck p geändert, so variiert das Erscheinungsbild etwas. Teilweise bildet sich eine geschichtete Struktur der positiven Säule aus. Der Abstand der Schichten entspricht etwa der freien Weglänge l der Moleküle gemäß l [cm] $\approx 1/p$ [Pa]. Wird der Druck unter ca. 0,01 Pa verringert, so erlischt die Gasentladung. Obwohl diese Erscheinung bereits 1706 von F. Hanksbee beobachtet wurde, schuf erst 1901 Townsend die wesentlichen theoretischen Grundlagen.

Die Kennlinie einer Gasentladungsröhre ist relativ kompliziert (Bild 7.13g). Sie geht über 17 Zehnerpotenzen der Stromänderung und enthält mehrere Äste mit z. T. negativem Verlauf (fallende Spannung bei steigendem Strom). Zur Erklärung geht man am besten nicht von der Spannung, sondern vom Strom als einstellbarem Parameter aus. Meßtechnisch ist das deshalb schwierig, weil eine ideale Stromquelle einen unendlich großen Innenwiderstand besitzt. In diesem Fall muß sie auch noch Spannungen über 1000 V ermöglichen.

Zunächst steigt der Strom mit der Spannung. In diesem Gebiet werden einige, der von außen erzeugten Ladungsträger abgesaugt. Danach tritt ein großer Bereich mit konstantem Strom bei variabler Spannung auf. Hier werden *alle* extern bedingten Ladungsträger genutzt. Der zugehörige Sättigungstrom ist daher ein Maß für vorhandene hochenergetische Strahlung. Dies deuten die drei

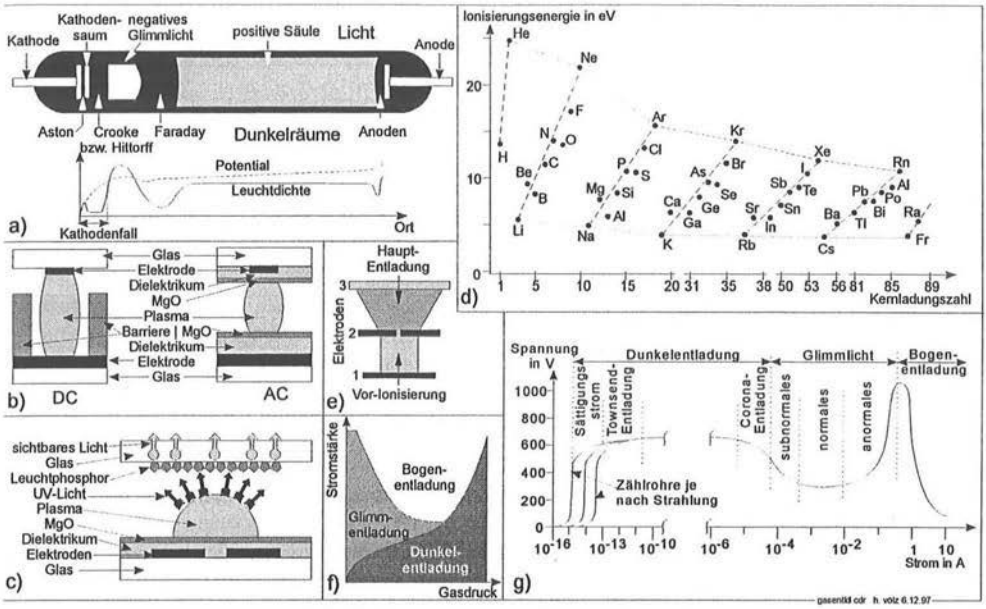


Bild 7.13 Grundlagen und Eigenschaften der Gasentladung

Linien im Bild 7.13g an. Hier arbeiten die Zählrohre. Wird die Spannung über eine bestimmte Grenze erhöht, so können einzelne Ladungsträger beim Stromtransport soviel Energie erlangen, daß er durch Stoßionisation vervielfacht wird. Die Folge ist ein steiler Stromanstieg, die Townsend-Entladung. Sie bricht jedoch immer zusammen, sobald die äußeren Ursachen für die Erzeugung von Ladungsträgern fehlen. Deshalb wird auch von unselbständiger Entladung gesprochen. Es folgt dann ein Gebiet, das nur bei guter Strombegrenzung existiert und das schließlich in die Corona-Entladung übergeht. Hier erfolgt eine Emission an einzelnen Unebenheiten der Kathode (Spitzenentladung). Dabei bricht die Spannung an den Elektroden zusammen. Für höheren Strom folgt dann das instabile Gebiet (bedarf noch äußerer Ionisation) der subnormalen Glimmentladung. Hier tritt erstmals Licht auf. Alles bisherige wird daher unter dem Begriff Dunkelentladung zusammengefaßt. Was jetzt leuchtet, ist das negative Glimmlicht. Eventuell springt es instabil auf der Kathode umher. Das beruht auf Aktivitätsänderungen auf der Kathode. Mit höherem Strom geht es in die normale Glimmentladung über. Sie ist unabhängig von externer Strahlung, leuchtet damit stabil und besitzt eine konstante Spannung. Je nach Kathode, Gasfüllung und Gasdruck liegt sie zwischen 70 und 300 V. Sie wurde früher bei Glimmstabilisatoren verwendet. Je nach der Stromstärke ist hier die Kathodenoberfläche mehr oder weniger vom negativen Glimmlicht bedeckt. Wird die Stromstärke über die vollständige Bedeckung hinaus erhöht, so beginnt die anormale Glimmentladung. Die Spannung und die Intensität des negativen Glimmlichtes wachsen in diesem Bereich an. Auf die Kathode prallen derart viele, negative Ladungsträger, daß sie sich deutlich erwärmt. Schließlich tritt dadurch Thermo-Emission auf, die bei weiterer Stromerhöhung überwiegend die Gasentladung bestimmt. Dann liegt die Bogenentladung vor. Sie wird beim Kohlelichtbogen genutzt. In seinem Krater beträgt die Temperatur nämlich bis zu 6000 °C. Von ihm geht ein Lichtstrom mit teilweise über 10^5 lm aus. Infolge seiner stark negativen Charakteristik muß hier unbedingt mit Strombegrenzung gearbeitet werden. Zur Sicherheit werden deshalb alle Gasentladungen (u. a. auch Leuchtstoffröhren) zumindest mit einem Vorwiderstand oder über eine Drossel betrieben.

Wesentlich für das Geschehen einer Gasentladung ist das Plasma. Es gilt als vierter Aggregatzustand. Hierbei handelt es sich um ein Gas (Atome|Moleküle) mit der Besonderheit, daß seine Eigenschaften wesentlich durch eine große Anzahl von Ladungsträgern bestimmt werden. In ihm laufen immer zwei gegenläufige Vorgänge ab

1. *Erzeugung*|Generierung von Ladungsträgern, also Ionen und freien Elektronen, durch Zuführung von Energie, sowie
2. *Rekombination* von Ionen und Elektronen unter Ausstrahlung von Quanten, also Licht verschiedener Wellenlängen. Sie findet zumindest an allen leuchtenden Stellen statt. Die Farbe des Lichts ist vor allem von der Art des Gases abhängig.

Bei einem zeitlich stabilen (stationären) Zustand, wie er bei den üblichen Gasentladungen besteht, herrscht zwischen beiden Vorgängen ein dynamisches Gleichgewicht. Erzeugung und Rekombination halten sich dann die Waage. Für die Bildung der Ladungsträger kommen vier Prozesse in Betracht:

- Durch ein Bombardement mit positiven Ionen werden aus der Kathode Elektronen herausgeschlagen. Hierfür ist die Austrittsarbeit (vgl. Tabelle S. 118) entscheidend.
- Durch Erhitzen der Kathode können thermisch Elektronen emittiert werden (s. S. 117ff.).
- Bei leitendem (ionisiertem) Gas kann punktuell an der Kathode eine so hohe Feldstärke entstehen, daß Feldemission auftritt.
- Ionen|Elektronen können im Gasraum mit hoher Geschwindigkeit auf neutrale Atome|Moleküle prallen und sie dabei durch die Stoßenergie ionisieren. Hierbei ist die Ionisierungenergie wesentlich.

Die Größe der Ionisierungsenergie hängt gemäß Bild 7.13d u. a. mit dem Schalenaufbau der Atome (periodisches System der Elemente) zusammen. Sie ist besonders groß bei den Edelgasen und sehr klein bei den Alkalimetallen. Letztere werden deshalb bevorzugt für Photoempfänger benutzt. Bei normalen Temperaturen kommen sie aber nicht als Gase vor. Weiter fällt auf, daß die Energie zum Verlassen eines Festkörpers, die Austrittsarbeit, meist deutlich geringer als die Ionisierungsenergie ist. Die obige kurze Beschreibung der Kennlinie läßt bereits erkennen, daß für die Erzeugung von Ladungsträgern die o. g. Effekte unterschiedlich zusammenwirken und auch vom Entladungstypus abhängig sind.

Bis zum Sättigungsstrom sind ausschließlich die extern erzeugten Ladungsträger vorhanden. Bei der Townsend-Entladung kommt die Stoßionisation im Gas hinzu. Je nach der eingestellten Stromstärke steigt die Bildungsrate der zusätzlichen Ionen bis zu etwa 10^7. Da keine weiteren Effekte auftreten, bricht diese dunkle Entladung immer wieder zusammen, wenn die äußere Einstrahlung entfällt. Mit dem Beginn der Koronaentladung beginnt sich schrittweise der Kathodenfall auszubilden. Die gute Leitfähigkeit des stark ionisierten Gases reduziert den Spannungsabfall zumindest im „längeren" Teil der Röhre. Nur in unmittelbarer Nähe der Kathode bildet sich eine hohe Feldstärke aus (vgl. Bild 7.13a unterer Teil). Hier ist u. a. die Ladungsträgervervielfachung noch nicht besonders groß. Sobald eine Spannung erreicht wird, die der Summe von der Ionisierungsenergie des Gases und der Austrittsarbeit der Kathode entspricht, wird vom Kathodenfall gesprochen. Das ist beim Beginn des normalen Glimmlichts der Fall. Dann werden hier die positiven Ionen so stark beschleunigt, daß sie beim Auftreffen auf der Kathode Elektronen herausschlagen. Umgekehrt erreichen die Elektronen nach Durchlaufen des Kathodenfalls ausreichende Energie, um neutrale Gasatome zu ionisieren. Durch diese beiden Prozesse ist die Gasentladung nicht mehr von der externen Energieeinstrahlung abhängig. Sie erhält sich selbst. Daher stammt auch die Bezeichnung selbständige Entladung. Sie tritt etwa bei Stromdichten um 10^{-10} A/m^2 auf. Im anormalen Bereich kommt noch die Erwärmung der Kathode und damit Thermoemission hinzu. Wird die Kathode ausreichend heiß, dann genügt allein die Thermoemission. Der Kathodenfall ist nicht mehr zur Erhaltung der Gasentladung erforderlich. Er bricht zusammen. Das bedingt den negativen Ast der Kennlinie. Dies erfolgt etwa bei 10^{-4} A/m^2.

Für eine typische Gasentladung ist also der Kathodenfall, der durch den Crookeschen = Hittorfschen Dunkelraum sichtbar ist, funktionell entscheidend. Er endet mit dem negativen Glimmlicht. Die Länge der positiven Säule kann mit der Länge der Entladungsröhre nahezu beliebig verändert, ja bei

kurzen Röhren sogar völlig unterdrückt werden. Während der Kathodenfall und damit das negative Glimmlicht für eine stabile Gasentladung unabdingbar sind, hat die positive Säule nur praktische Bedeutung. Sie wird u. a. bei den farbigen Röhren der Fassadenwerbung und bei den Leuchtstoffröhren genutzt. Das negative Glimmlicht hat durch die Entwicklung halbleitender Anzeigen dagegen weitgehend seine praktische Nutzung eingebüßt.

Im Faraday-Dunkelraum und in den Dunkelräumen einer geschichteten Säule nehmen die Ionen bzw. Elektronen im elektrischen Feld erneut die Ionisierungsenergie auf, um dann nach der freien Wegstrecke wieder ein Atom | Molekül ionisieren zu können. Auf die Erklärung der weiteren Hell- und Dunkel-Räume kann hier wegen ihrer geringen praktischen Bedeutung verzichtet werden. Es sei aber darauf hingewiesen, daß alle Effekte und Erscheinungen vor allem vom Gasdruck und der Stromstärke abhängen. Dies zeigt schematisch Bild 7.13f.

Gasentladungen haben in den letzten Jahren größere Bedeutung für die Konstruktion von Plasmapanals (Abschnitt 9.2.7, ab S. 216) erreicht. Hierbei ist eine interessante technologische Entwicklung durchlaufen worden. Sie sei hier für ein einzelnes Pixel kurz erklärt. Ursprünglich war die DC-Technik vorhanden (distinctive bzw. direct current). Dabei wurde jedes selbstleuchtendes Pixel durch Barrieren begrenzt (Bild 7.13b). Durch das Ionenbombardement wurden jedoch die Elektroden langsam zerstört. In den 80er Jahren ging man deshalb zur AC-Technik (alternated current, Wechselstrom) über. Die Elektroden konnten dabei durch ein Dielektrikum geschützt werden. Die entstehende Kapazität genügt für einen ausreichenden Stromfluß. Gleichzeitig bleibt die im Kondensator vorhandene elektrische Ladung länger erhalten. Dadurch konnte die Wechselspannung sogar von z. B. 360 V auf 180 V gesenkt werden. Für viele Anwendungen erfolgt das Ein- und Ausschalten von Plasma nicht schnell genug. So wurde zeitweilig eine Lösung gemäß Bild 7.13e mit zwei Entladungsräumen verwendet. Im Raum der Vor-Ionisierung brennt ständig mit geringem Strom ein Plasma zwischen den Elektroden 1 und 2. Durch Anschalten der Elektrode 3 wird dann das eigentliche, hell leuchtende Plasma extrem schnell gezündet. Eine weitere Lösung erforderte der Übergang zu den Farbdisplays. Da es nicht möglich war, die kleinen Zellen (Pixel) getrennt mit unterschiedlichen Gasen für mehrere Farben zu füllen, wird heute ein Gasgemisch aus Neon, Argon, Xenon gewählt, das bevorzugt UV-Licht erzeugt. Die einzelnen Pixel sind dann mit den drei Leuchtstoffen für Rot, Grün und Blau beschichtet. Beim zunächst gebräuchlichen Aufbau griff die Entladung den Leuchtstoff an. Deshalb sind heute gemäß Bild 7.13c die Gasentladung und der Leuchtstoff völlig getrennt. Zwischen benachbarten seitlichen und wiederum isolierten Elektroden brennt die Gasentladung. Ihr gegenüber liegt der Leuchtstoff, der nur vom UV-Licht angeregt wird.

7.7.10 Beeinflussung von Elektronen

Thermoession erfolgt in jeder Glühlampe an der Widerstandswendel, die dann ja eine Kathode ist. Da keine der freigesetzten Elektronen das Vakuumgefäß verlassen können, bildet sich um die Wendel herum eine negative Elektronenwolke aus. Sie bremst weiterhin austretende Elektronen ab. Dadurch entsteht ein dynamisches Gleichgewicht: genausoviel Elektronen wie die Kathode verlassen, werden auch von ihr wieder eingefangen.

Mit einer weiteren Elektrode, sie heißt Anode, können Elektronen abgeleitet werden. Es fließt der Kathodenstrom I_k. Er hängt sowohl von der Heizenergie (Heizstrom) als auch von der Anodenspannung U_a ab. Er nimmt mit dem Heizstrom und der positiven Anodenspannung zu. Genauer zeigt dies beispielhaft **Bild 7.14**a im doppelt linearen Maßstab. Bei einer Darstellung mit logarithmischem Maßstab für den Kathodenstrom (Bild 7.14b) sind deutlich drei Gebiete mit unterschiedlichem Stromverhalten zu erkennen: Anlauf-, Raumladungs- und Sättigungsgebiet. Da Anode und Kathode aus unterschiedlichem Material bestehen, müssen alle weiteren Betrachtungen auf das zugehörige Kontaktpotential U_k korrigiert bzw. darauf bezogen werden.

Beim **Anlaufstrom** ist die Anodenspannung gegenüber dem Kontaktpotential Kathode-Anode negativ. Daher können nur solche Elektronen zur Anode gelangen, die eine entsprechend große Austrittsgeschwindigkeit besitzen. Dieser Fall entspricht etwa dem der Fotozelle von Bild 7.6b und d auf S. 104. Infolge der Maxwell-Verteilung der frei austretenden Elektronen gilt deshalb

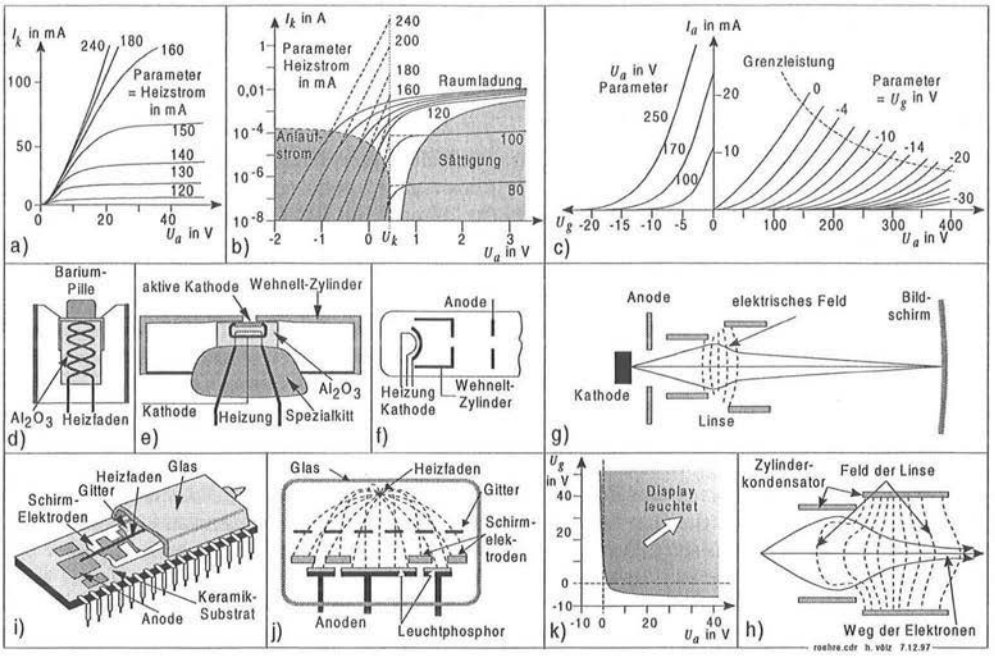


Bild 7.14 Verlauf der Ströme und Eigenschaften von Elektronenröhren

$$I_k = I_S \cdot e^{\frac{U_k - U_a}{k \cdot T}}.$$

Dieser Zusammenhang ergibt in der halblogarithmischen Darstellung von Bild 7.14b die Geraden. Der wirkliche Verlauf weicht bei stärkeren Kathodenströmen bereits von der Geraden ab, wenn die Anodenspannung in die Nähe des Kontaktpotentials gelangt. Zum besseren Verständnis wird zunächst jedoch das **Sättigungsgebiet** betrachtet. Es existiert bei großer positiver Anodenspannung. Hier werden alle aus der Kathode austretenden Elektronen von der Anode übernommen. Eine Änderung des Kathodenstromes ist dann nur mittels des Heizstromes möglich. Zwischen beiden Gebieten liegt das **Raumladungsgebiet**. In ihm werden praktisch alle Röhren betrieben. Wie schon aus dem Bild 7.14b zu erkennen ist, ändert sich hier der Kathodenstrom nur unwesentlich durch den Heizstrom. Dies kommt dadurch zustande, daß die Elektronen für den Weg zur Anode einige Zeit benötigen. Dadurch erzeugen sie eine Raumladung, die den Strom begrenzt. Je stärker nämlich der Strom ist, desto größer ist auch die negative Raumladung. Dadurch schirmt diese Raumladung quasi das Feld der Anode gegenüber der Kathode ab. Für diese Wirkung läßt sich eine Raumladekonstante bestimmen.

$$k_r = \frac{4}{3} \varepsilon_0 \frac{A}{a^2} \sqrt{\frac{2 \cdot e_0}{m_0}}.$$

Hierin bedeuten $\varepsilon_0 = 8{,}854185$ As/Vm die Dielektrizitätskonstante des Vakuums, A die Fläche der Kathode (Anode), a den Abstand Anode - Kathode, e_0 die Ladung und m_0 die Masse des Elektrons. In diesem Gebiet gilt die von Barkhausen abgeleitete Formel für den Kathodenstrom

$$I_K = k_r \cdot U_a^{3/2}.$$

Er geht parabelförmig in den Sättigungsstrom über.

Wird zwischen Anode und Kathode ein Gitter eingefügt, so entsteht eine Triode. Sie wird meist mit negativem Gitter betrieben. Dann kann nämlich nur ein sehr kleiner Anlaufstrom von ca. 10^{-14} A zum Gitter gelangen. Dennoch wirkt die positive Anodenspannung – wenn auch je nach Gitterspannung abgeschwächt – durch die Maschen des Gitters zur Kathode (Durchgriff) und übernimmt so einen Raumladestrom. Die entsprechenden Kennlinien betreffen $I_a(U_g)$ bzw. $I_a(U_a)$ mit der jeweils fehlenden Spannung als Parameter (Bild 7.14c). Sie gehorchen recht gut dem $U^{3/2}$-Gesetz. Mit der negativen Gitterspannung kann dann der Anodenstrom quasi „energiefrei" gesteuert werden.

Bei Oszillographen-, Fernseh- und Monitorröhren ist das Gitter durch eine Lochblende ersetzt (Bild 7.14e und f). Sie ist nach ihrem Erfinder (1902) als Wehnelt-Zylinder benannt und realisiert zusätzlich zur Steuerung eine möglichst punktförmige Quelle für Elektronenstrahlen. Solche Strahlen können besonders übersichtlich auf verschiedene Weise beeinflußt | abgelenkt werden (vgl. Bild 7.9, S. 114). Bei einer elektrostatischen Ablenkung gemäß Bild 7.9g gehören zu zwei verschiedenen Spannungen U_1 und U_2 auch andere Winkel

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \sqrt{\frac{U_2}{U_1}}.$$

Diese Beziehung besitzt unmittelbar eine Analogie zur Optik. Dort gilt sie dann, wenn ein Lichtstrahl unter schrägem Winkel α_1 in ein Medium mit anderem Brechungsindex übergeht. Auf dieser Basis übertrug daher H. Busch 1926 die optischen Abbildungseigenschaften auf Eletronenstrahlen. Es entstand die Elektronenoptik mit magnetischen | elektrostatischen Linsen, Prismen usw. Er schuf so zugleich die theoretischen Grundlagen zum Elektronenmikroskop. Bild 7.14 zeigt beispielhaft, wie zwei Rohre, als Zylinderkondensator bei entsprechender Spannung genauso wie eine Sammellinse in der Optik wirken. Bei den Bildröhren wird so die Öffnung des Wehneltzylinders verkleinert auf dem Bildschirm abgebildet (Bild 7.14g).

Abweichend von den bisherigen Betrachtungen wird das *Digitron*, auch Fluoreszenzanzeigeröhre genannt, betrieben. Es kann heute bereits auf mehrere Generationen der Entwicklung zurückblicken. Als Ausgangspunkt sind die um 1940 entstandenen Abstimmanzeigen der Rundfunkempfänger (sie hießen magisches Auge) anzusehen. Um 1967 entstanden die ersten Digitronanzeigen in Japan. Sie besaßen die Größe einer Miniaturröhre (ca. 20 mm Durchmesser und 60 mm Höhe) und enthielten eine einzige Siebensegmentanzeige (s. S. 127). Anfang der 70er Jahre wurden in einem weitaus dünneren, aber noch runden Glaskolben bereits mehrere Anzeigeziffern untergebracht. Wenig später entstand der auch noch heute übliche flache Aufbau zum direkten Einlöten (Bild 7.14i). Die dritte Generation wird seit etwa 1980 in Dickschichttechnik auf Keramiksubstrat hergestellt. Heute gibt es Fluoreszenzröhren (VFD: Vakuum-Fluoreszenz-Diplays) meist in langen schmalen Streifen bis zu mehreren Dezimetern Länge. Der Heizfaden ist vielfach auf 2 V ausgelegt, in Quer- oder Längsrichtung ausgespannt. Sie werden im Multiplexbetrieb angesteuert (vgl. S. 134 bei der LCD).

Der funktionelle Aufbau eines Digitrons geht aus Bild 7.14j hervor. Die Kathode ist ein Wolframfaden von 10 bis 60 µm Durchmesser. Er ist mit einer Schicht aus BaO, SrO und | oder CaO versehen, die etwa 20 µm stark ist. Ihre Temperatur von 650 bis 750 °C ist vergleichsweise niedrig (übliche Oxidkathoden ca. 850 °C). Diese Rotglut ist kaum zu sehen und wird durch ein Filterglas ganz unsichtbar. Zusätzlich wird so auch eine Erhitzung des nahegelegenen Leuchtstoffes vermieden. Sie würde nämlich seinen Wirkungsgrad mindern. Gegenüber dem Faden befindet sich ein sehr feines Gitter. Es ist meist ein Gewebe aus Nickeldraht von 15 bis 30 µm Durchmesser mit 30 bis 200 µm Maschenweite. Andere Gittertypen sind aus massivem Blech geätzt. Als nächstes schließt sich eine Schirmelektrode an, die in der Röhre elektrisch mit dem Gitter verbunden ist. Sie überdeckt alle Gebiete, die nicht leuchten dürfen. Sie ist schwarz mit Kohlenstoff beschichtet und vermeidet auch Sekundärelektronen. Unmittelbar unter der Schirmelektrode befinden sich die Anodensegmente. Sie sind aus Metall bzw. aus Leitpasten hergestellt. Auf ihnen befindet sich der Leuchtstoff, meist eine ZnO-Kombination mit sehr geringer Aktivierungsenergie, der grün oder blau leuchtet. Das Innere der Glasröhre ist mit einer Leitschicht (meist Sn_2O) versehen. Sie liegt auf Kathodenpotential und schirmt das Innere der Röhre gegenüber äußeren Feldern ab. Dadurch werden auch alle Elektronen zur Anode umgelenkt (Bild 7.14j).

Das Digitron arbeitet mit *positivem* Gitter und *positiver* Anode. Hierdurch ist eine geringe Betriebsspannung von etwa 20 V möglich. Dadurch ergibt sich allerdings eine ungünstige Aufteilung des Kathodenstromes: 10 % gelangt auf das Gitter, 65 % auf die Schirmelektrode und nur 25 % auf die Anode. Den leuchtenden Betriebsbereich zeigt Bild 7.14k. Soll ein Anodensegment nicht leuchten, so muß es selbst *oder* das zugehörige Gitter nur genügend negativ gemacht werden. Die typischen Leuchtdichten betragen 300 bis 2000 cd/m^2. Sonderausführungen erreichen bis 35 000 cd/m^2. Der typische Sichtwinkel liegt bei 160°, die Arbeitstemperatur zwischen -55 und +95 °C. Sie besitzen eine hohe Beständigkeit gegenüber Vibrations- und Schockbelastungen. Angewendet werden sie vorwiegend in HiFi-Anlagen, Videorecordern, Fotokopierern, elektronischen Kameras, Spielautomaten usw. Es gibt kaum Standardtypen. Die Fertigung erfolgt vorwiegend kundenspezifisch, überwiegend in 7-Segment-, 16-Segment-, seltener in 5×7-Matrix-Anordnung. Pixel-Matrizen kommen bis maximal 400×200 Pixel vor. Die feinsten Pixelraster liegen bei 0,45 mm. Der Leuchtstoff ist meist Zinkoxid mit einem Maximum bei 505 nm (grün). Die zweite Variante leuchtet blau. Als Sonderlösungen gibt es auch farbtüchtige Ausführungen. Sie haben aber keinen breiteren Einsatz erreicht.

7.8 Grundlagen für Anzeigen

7.8.1 Möglichkeiten und Varianten

Licht ermöglicht Sehen, und Sehen ist immer (noch) die wichtigste Komponente der Mensch-Technik-Schnittstelle. Wenn es allerdings um Warnungen und ähnliche Hinweise geht, dann ist Schall günstiger. Wir können zwar die Augen, aber nicht die Ohren schließen. Um ähnliche Aufmerksamkeit zu erreichen, muß sich ein Lichteindruck (ständig) deutlich ändern. Wir kennen dies beim blinkenden Cursor. Wenn es um die Vielfalt der Darbietungen geht, dann ist allerdings die Lichtausgabe kaum zu übertreffen. Für die zugehörige Hardware gibt es eine größere Anzahl von Bezeichnungen. Es seien nur Anzeige, Display, Bildschirm und Monitor genannt. Mit der folgenden Aufzählung wird versucht, ihre Vielfalt systematisch darzustellen:

- **Lichtsignale** mittels Lampen, LED usw. zeigen uns an, ob ein bestimmter Zustand vorliegt, z. B. ob etwas arbeitet oder nicht. Sie können an oder aus sein, aber auch blinken.
- **Zeichen** erfüllen fast immer eine ebene Fläche und bestehen (zumindest technisch) aus mehreren zur Einheit zusammengefaßten Pixel (Lichtsignale). Als Mensch schreiben wir sie dagegen meist als Linienzug. Typisch für sie sind u. a. Zahlen, Buchstaben und Sonderzeichen. In vielen Fällen werden sie rechnerintern über den ASCII- oder bei neueren Entwicklungen über den Unicode gespeichert. Noch immer besitzen für die einfache Darstellung die 7- oder 16-Segnent-Anzeige bzw. 5×7 große Matrix Bedeutung (**Bild 7.15**b bis d).
- **Symbole** sind bereits deutlich komplexer aufgebaut. Eigentlich können sie aber noch nicht zu den Bildern gezählt werden. Sie erlangen seit geraumer Zeit aus drei Gründen immer mehr Bedeutung. Einmal beanspruchen sie wegen ihrer „Kleinheit" im Rechner relativ wenig Speicherplatz. Bei ihrer Darstellung auf dem Bildschirm (Pictogramme) beanspruchen wenig Platz und sind so vorzüglich für Steuervorgänge (z. B. Anklicken mit der Maus) geeignet. Sie heißen dann meist Icons. Drittens kommt ihnen so etwas wie eine universelle Sprache zu. Man denke nur an die Sportsymbole bei der Olympiade, an die Firmen-Logos und die Hinweiszeichen im innerstädtischen Raum, wie Männer-Frauen-Toilette, Bank zum Wechseln von Geld usw. Weiter sei auf die fachsprachlichen Symbole der Mathematik, Chemie, Biologie, Geographie usw., aber auch auf die Nutzungshinweise von Textilien u. v. a. m., verwiesen.
- **Bilder** betreffen gewöhnlich einen Inhalt, wie z. B. bei einer Photographie. Wie wichtig dies ist, besagt ein chinesisches Sprichwort: „Ein Bild sagt mehr als tausend Worte". Aber insbesondere vom Fernsehen kennen wir auch das Gegenteil: „Nichts kann gründlicher lügen als ein Bild". Weiter ist dieser Unterschied wichtig: Wir sehen und denken viel in Bildern, aber *„ausgeben"* können wir sie nicht. Wir benötigen dazu den Umweg über die Technik. So ergibt sich eine wechselseitige Bildvermittlung zwischen Mensch und Technik, wie sie Bild 7.15a zu systemati

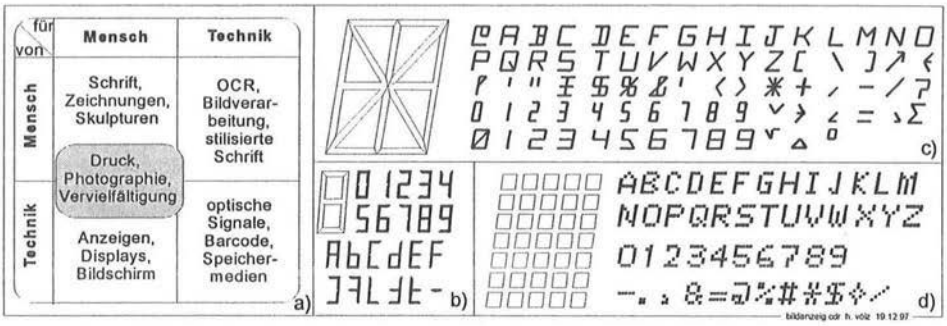


Bild 7.15 Varianten der Bildkommunikation (a) und einfache Zeichendarstellungen

sieren versucht. Auf sie wird noch in mehreren Abschnitten einzugehen sein. Dennoch ist der Inhalt eines Bildes technisch (immer noch) nicht erfaßbar. Ob das je einmal gelingen wird, ist z. Z. ungeklärt. Die Darstellung von Bildern an der Mensch-Technik-Schnittstelle erfolgt heute fast ausschließlich über eine Pixel-Wiedergabe mit etwa 100×100 bis über 1000×1000 Pixel. Die Herkunft des Begriffes „Pixel" von „Picture-Element" weist schon auf diese Pixeldarstellung deutlich hin. Die Qualität eines Bildes ist dabei weitgehend durch ihre Anzahl bestimmt. Sie ist auch eng mit dem Begriff *„Auflösung"* verbunden. Er wird noch genauer bei den Druckern und Scannern behandelt. Früher gab es auch zeitweilig Vektor-Displays. Rechnerintern können die Bilder unterschiedlich repräsentiert sein. Einmal gibt es auch entsprechende Pixel-Dateien (PCX, GIF, TIF usw.), die aber vielfach komprimiert sind. Als weitere interne Varianten sind u. a. üblich: Vektor-Dateien (DRW, CDR usw.), fouriertransformierte Darstellungen, fraktale Programme und Wavelet-Umwandlungen.

- **Gebilde** sind räumlich-dreidimensional. Sofern wir die Zeit außer acht lassen, entsprechen sie weitgehend unserer Wahrnehmung der Umwelt. Eine entsprechende interne technische Speicherung bereitet kaum noch Probleme und ist heute daher bereits vielfach gebräuchlich. Weitaus schwieriger ist jedoch ihre Darstellung. Daher werden einige mehr oder weniger leistungfähige Teillösungen angewendet:
  1. Am einfachsten ist es, eine (eventuell frei wählbare | steuerbare) *Projektion* auf die Bildschirmfläche zu wählen. Dann wird auch von $2^1/_2$-dimensionaler Darstellung gesprochen. Da hierzu fast immer Softwarelösungen genutzt werden, wird im folgenden darauf nicht weiter eingegangen.
  2. Unser räumliches Sehen geschieht durch die Kombination der Eindrücke beider Augen. Dies ist technisch leicht mit zwei zueinander passenden Bildern nachzubilden. Zu dieser *Stereo-Bild-Technik* stehen mehrere Möglichkeiten, u. a. Stereobrillen verschiedener Art, Headsets, usw. zur Verfügung (vgl. S. 223ff).
  3. Schließlich gibt es *echt räumliche Darstellungen*, um die man „herumgehen" kann. Das Musterbeispiel hierfür ist die Holographie. Sie ist aber (noch) nicht für die (elektronische) Mensch-Technik-Schnittstelle nutzbar. Auf anderer Basis sind jedoch mit den 3-D-Methoden zumindest Lösungsansätze verfügbar (vgl. S. 226ff).
- Die **Zeit** kann schließlich zu den drei genannten Bildtypen als weiterer Parameter hinzukommen. Eigentliche neue Probleme treten dadurch kaum auf. Jedoch kann der technische Aufwand um Größenordnungen steigen.
- Die **Farbtiefe** ist ein weiterer, wichtiger technischer Parameter. Hier werden unterschieden:
  1. 1-Bit-Darstellung, bei der jedes Pixel nur schwarz oder weiß bzw. an oder aus, 0 oder 1 sein kann,

2. Grauwert-Darstellung, welche nur Helligkeitswerte kennt und daher gewöhnlich mit 8 Bit je Pixel (256 Graustufen) auskommt sowie
3. Farb-Widergabe mit recht unterschiedlicher Anzahl von Farben, von 2 Bit = 4 Farben bis zu mehr als 24 Bit = 16 777 216 Farben.

- Schließlich werden noch **selbstleuchtende** (aktive) und **beleuchtete** (passive) Anzeigen unterschieden. Selbstleuchtende (z. B. LED und Monitore) sind gut in dunkler Umgebung zu erkennen. Bei ihnen kann es aber z. B. in hellem Sonnenlicht Probleme geben. Passive Displays (z. B. LCDs) führen dagegen oft in dunkler Umgebung zu Schwierigkeiten. Sie benötigen folglich meist eine zusätzliche Beleuchtung.

Diese Fülle von Varianten kann natürlich (ökonomisch) nicht mit einer einzigen Anzeigentechnik gelöst werden. Daher gibt es eine große Vielfalt technischer Anzeigen. In diesem und dem folgenden Kapitel werden nur die physikalisch-chemischen (u. a. Leuchtphosphore und Flüssigkristalle) und technischen Grundlagen sowie die Varianten der einfachen Zeichendarstellung (Elektrolumineszenzdisplays, LED, Laser, chemische Anzeigen usw.) behandelt. Alle komplexeren Anzeigen, wie z. B. Monitore, Großprojektions- und Stereobildtechniken, werden im Kapitel 9 behandelt.

7.8.2 Leuchtphosphore

Ein Leuchtphosphor ist eine Substanz, die energiereiche Strahlung, z. B. ultraviolettes Licht und/oder Elektronenstrahlen, in sichtbares Licht umwandelt. Die meisten Leuchtstoffe sind Kristallite aus Oxiden, Silikaten, Sulfiden oder Fluoriden der Elemente Zink, Calcium, Cadmium und/oder Magnesium. Für einen guten Wirkungsgrad müssen sie so hohe Reinheit besitzen, wie sie in der Halbleitertechnik üblich ist. Eine weitere Verbesserung und Ausrichtung auf eine gewünschte Farbe erfolgt durch Dotieren. Hierzu dienen vor allem Metalle, insbesondere Mangan, Kupfer, Silber, Blei und Zink. Der Leuchtmechanismus kann im Bändermodell (vgl. S. 139) beschrieben werden (**Bild 7.16a**). Von einem Aktivatorniveau – nahe dem Valenzband – wird ein Elektron durch die zugeführte Energie ins Leitungsband gehoben. Unter Lichtausstrahlung kann es danach direkt zu einer leeren Aktivatorstelle zurückkehren und dabei Licht gemäß des Energieunterschiedes abstrahlen. Dann liegt Fluoreszenz vor. Bei der Phosphoreszenz existieren nahe dem Leitungsband Haftstellen. Sie werden auch Zwischenterme, metastabile Terme, Traps oder Elektronenfallen genannt. Auf sie fällt zunächst das Elektron. Infolge der geringen Energiedifferenz liegt die zugehörende Strahlung meist im fernen Infrarot und ist daher nicht sichtbar. Diese Terme halten das Elektron meist für längere Zeit fest. Es kann frühestens nach 10^{-6} s, aber auch erst nach Sekunden und Minuten zum Valenzband unter Ausstrahlung von sichtbarem Licht zurückkehren. Die Anwendung von Leuchtstoffen ist sehr vielfältig. Allein für die Anzeigen kommen die folgenden Varianten in Betracht. In Klammern dahinter stehen die Anregungsart und der Abschnitt der entsprechenden Behandlung:

- Leuchstofflampen, Kaltlichtlampen (Plasma, hier nicht behandelt)
- Monitor-, Fernseh- und Oszillographenröhren (Elektronenstrahl, S. 128 + 205ff)
- Lumineszenz-Zellen (elektrisches Feld, S. 130)
- Digitrons (Elektronenstrom, S. 124)
- Farbige Plasmapanals (Plasma, S. 218f).

Leuchtstoffe (und damit auch Leuchtschirme) sind meist aus mehreren Leuchtsubstanzen zusammengesetzt. Ihre Eigenschaften werden in speziellen Nomenklaturen festgelegt. Hierfür ist JEDEC (Joint Electron Device Engineering Committee) ein wichtiges Normungsgremium. Es verwendet zur Kennzeichnung den Buchstaben P und eine laufende Nr., z. B. P11. Diese Normung bestimmt nur wesentliche Fakten. Daher kann der so benannte Leuchtstoff von Firma zu Firma etwas abweichen. Typischer ist die Kurve der spektralen Energieverteilung. Einige Beispiele zeigt Bild 7.16b. Hieraus geht z. B. hervor, daß der Leuchtstoff P7 zumindest zwei Schichten enthält. Sie sind meist übereinander angebracht. Dort, wo die Elektronen auftreffen, befindet sich ein blauer Leuchtstoff und darüber, zur Glasseite hin, von wo aus beobachtet wird, ein gelb-orangefarbiger. Dieser wird vor allem vom Licht des blauen Leuchtstoffes angeregt. Hierdurch und infolge vieler Haftstellen leuchtet er

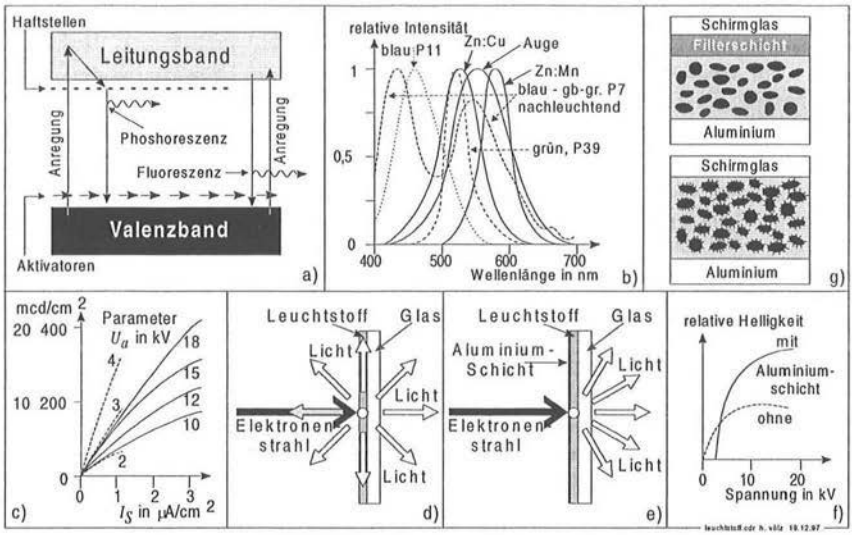


Bild 7.16 Eigenschaften und Wirkung von Leuchtstoffen

verzögert. Er ist „nachleuchtend". Dies hat zur Darstellung sehr langsam verlaufender Vorgänge, z. B. bei Radarschirmen, große Bedeutung. Um ein weniger flackerndes Bild zu erhalten, wird dann mittels Farbfilter die Primärkomponente weitgehend unsichtbar gemacht. Umfangreiche Aussagen zur Chemie und Technologie enthält u. a. [NN11].

Für das Farbfernsehen und für Monitore wird von drei nahezu monochromatischen Leuchtphosphoren ausgegangen. Sie sind im Bild 3.18 auf S.38 als Punkte eingetragen und erzeugen das erreichbare Farbdreieck (vgl. auch S.37). Ihre Werte sind heute genormt. Im folgenden bedeuten die beiden Zahlenwerte den *x*- bzw. *y*-Ort im Farbdreieck. Das chemische Element hinter dem ":" ist das hauptsächlich verwendete Dotierungselement. In den USA wurde für das Fernsehsystem NTSC 1954 festgelegt:

rot $Zn_3(PO_4)_2$:Mn 0,67|0,33; grün Zn_2SiO_4:Mn 0,21|0,71; blau ZnS:Ag 0,14|0,08.

Für Europa gilt heute bei PAL und SECAM:

rot YVO_4:Eu 0,65|0,35; grün ZnCdS:Ag 0,295|0,595; blau ZnS:Ag 0,155|0,065.

Wieweit die Abweichungen aber gehen können, zeigt der 1994 von Philips eingeführte neue, rote (deep red) Phosphor mit 0,63|0,33. Durch ihn wird gelb und purpur besser wiedergegeben.

Die Intensität eines Leuchtstoffes kann mittels der Beschleunigungsspannnung (Geschwindigkeit der auftreffenden Elektronen) und der Strahlstärke (Anzahl der Elektronen) verändert werden. Dies zeigt Bild 7.16c in zwei Maßstäben für kleine und große Spannungen. Der energetische Wirkungsgrad liegt dabei bei wenigen, höchstens 10 Prozent.

Bei Leuchtschirmen kann das nutzbare Licht durch eine Metallisierung deutlich vergrößert werden. Ohne sie strahlt nämlich der Leuchtstoff nahezu gleichmäßig in alle Richtungen (Bild 7.16d). Mit der Metallisierung (meist eine dünne Aluminiumschicht) wird alles Licht nach vorne reflektiert (Bild 7.16e). Ein gemessenes Ergebnis zeigt Bild 7.16f. Eine weitere Verbesserung wird durch Einfärbung des Glases der Röhre erreicht (Bild 7.16g, oben die Filterschicht). Während das Licht des Schirmes nur einmal zu passieren braucht, gilt das für das reflektierte Licht der Umgebung zweimal. Es wird also deutlich stärker geschwächt (e^{dx}). Es wurde auch schon erfolgreich versucht, diesen Effekt direkt durch Beschichtung der Leuchtstoffe zu erreichen (Bild 7.16g, unten).

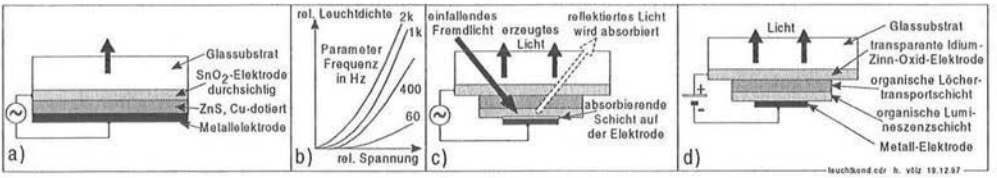


Bild 7.17 Daten und Aufbau von einigen Elektrolumineszenzdisplays

7.8.3 Elektrolumineszenzzellen

Lumineszenz existiert u.a. als Injektionslumineszenz bei den LED (S. 140ff.). Für die hier zu behandelnden Zellen kommt die Feldlumineszenz bzw. der Destriau-Effekt zum Einsatz. Dabei wird ein Leuchtphosphor im elektrischen Wechselfeld zu „kaltem" Leuchten angeregt. Die zugehörigen Bauelemente besitzen mehrere Namen, u. a. ELD = EL-Displays = Elektrolumineszenzdisplays, Elektrolumineszenzzellen, LEF = light emitting films oder Leuchtkondensatoren. Ihre Grundlage bildet vorwiegend Mn- und/oder Cu-dotiertes ZnS-Pulver mit einer Kristallitgröße von 5 bis 50 µm. Weitere Substanzen sind CaS und SrS. Das Pulver wird in ein Bindemittel mit hoher Dielektrizitätskonstante (z. B. Cyanostärke) eingebettet, dann in einer dünnen Schicht (meist großflächig bis zu einigen hundert cm^2) zwischen zwei Glasplatten eingeschlossen und beidseitig mit Elektroden versehen. Die rückseitige Elektrode wird reflektierend gehalten. Die vorderseitige besteht aus einer dünnen Schicht aus SnO_2 oder In_2O_3 und ist daher transparent. An beide Elektroden wird eine Wechselspannung von einigen zehn bis zu mehreren hundert Volt angelegt (**Bild 7.17**a). Für die Lumineszenz sind nämlich Feldstärken von 10^4 bis 10^7 V/cm notwendig. Die geeigneten Frequenzen liegen im Bereich von etwa 50 Hz bis zu einigen kHz. Dabei werden freie Elektronen so stark beschleunigt, daß sie das ZnS-Pulver zum Leuchten anregen. Den typischen Verlauf der Leuchtdichte zeigt Bild 7.17b. Die spektrale Verteilung der Lumineszenz ist relativ breitbandig und reicht oft von Gelb bis Blau mit einem Schwerpunkt bei Grün. Neuere Zellen besitzen ein Maximum bei 580 nm, leuchten also bernsteingelb. Über Filter sind daher Abstufungen von Rot über Gelb bis Grün möglich. Höhere Anregungsfrequenzen heben die kürzeren Wellenlängen hervor. Die Farbe ist deutlich von der Herstellung und der Dotierung der ZnS-Kristallite abhängig. Kupfer kann z. B. mit 0,05 bis 0,5 % während einer Wärmebehandlung bei etwa 1100 °C im ZnS gelöst werden. Beim Abkühlen fällt es als Cu_2S aus und kann von der Oberfläche der Kristallite abgewaschen werden. An Versetzungen und Kristallfehlern im Innern der Kristallite verbleibt aber Cu angelagert. Eine höhere Cu-Konzentration und eine niedrigere Erwärmungstemperatur verschieben das Emissionsmaximum zum Blauen, die umgekehrte Behandlung dagegen zum Gelben. Eine Gelbverschiebung wird auch durch zusätzliche Mn-Dotierung erreicht.

Seit etwa 1975 werden EL-Zellen auch in Dünnfilmtechnik produziert. Es werden dann 6 bis 8 Schichten auf das Glassubstrat aufgebracht. Dabei werden im Ultrahochvakuum nur wenige 100 nm dünne Zinksulfid-Mangan-Schichten (ALE = atomic layer epitaxy) auf das Glassubstrat mittels einer Art Epitaxieprozeß abgeschieden. Auch die Elektroden und dielektrischen Schichten (z.B. Y_2O_3, Al_2O_3, Si_3N_4) werden aufgedampft. Die Gesamtdicke eines Displays beträgt dann nur 1 bis 2 mm. Inzwischen ist man dazu übergegangen, den Kontrast durch schwarzes Einfärben der Betrachterseite deutlich zu erhöhen (Bild 7.17c).

Im Gegensatz zu vielen anderen Anzeigen vertragen EL-Anzeigen tiefe Temperaturen, Vibrationen und rauhe Bedingungen. Sie sind druckunempfindlich und ermöglichen einen großen Betrachtungswinkel. Von ihnen geht im Betrieb praktisch keine elektromagnetische Strahlung aus. Die Lebensdauer (MTBF) beträgt mindestens 30 000 h. Die typische Helligkeit liegt bei 100 bis maximal 1000 cd/m^2. Es wird ein Wirkungsgrad von 1 bis 10 lm/W erzielt. Die Zellen werden mit Wandlern so zusammengebaut, daß nur +5 und +12 V für den Betrieb erforderlich sind. Die Hersteller garantieren, eingeführte Typen – im Gegensatz zu vielen anderen Flachdisplays – über viele Jahre hinweg zu lie-

fern. Trotz all dieser guten Eigenschaften existieren EL-Displays eigentlich nur in Nischenanwendungen. Dies betrifft insbesondere Industrie, Meßtechnik, Transport, Militärtechnik, Luftfahrt und Eisenbahn (ICE-Züge). Es gibt auch anspruchsvolle Weiterentwicklungen für Großanzeigen. Diese Module besitzen eine Zeichengröße von 20 bis etwa 60 mm. Sie sind als Matrix von einzelnen, 5×5 mm^2 großen Leuchtpunkten eines 5×7- oder 8×11-Rasters ausgebildet. Mit dieser Technik werden z. B. flache Bildschirme mit 512×256 Pixel auf einer Fläche von 200×100 mm^2 hergestellt.

Eine heute nur noch wenig gebräuchliche Variante der EL-Displays sind gleichspannungsbetriebene, großflächige Zellen (Bild 7.17d). Sie bestehen aus Mn-dotiertem ZnS-Pulver, das mit etwa fünf Gewichtsprozent Binder zusammengehalten wird. Auf die anodenseitige Oberfläche wird bei der Herstellung eine kupferreiche Phase aufgebracht. In den ersten Betriebsminuten findet dann ein einmaliger, irreversibler Formierungsprozeß statt. Dabei fällt der Strom stark ab. Wahrscheinlich entsteht eine ebene Cu_2S-Schicht (*p*-leitend), die mit den ZnS-Kristalliten (*n*-leitend) Heteroübergänge bildet. Zum Betrieb sind bei einer Spannung von ca. 100 V Stromdichten um 50 mA/cm^2 erforderlich. Die Zellen emittieren gelbes Licht mit einem Leistungswirkungsgrad zwischen 0,1 und 0,3%. Die Leuchtdichte liegt bei einigen zehn cd/m^2.

7.8.4 Flüssigkristalle

Die flüssigen Kristalle wurden 1888 entdeckt und galten bis um 1960 als wissenschaftliche Kuriosität. 1970 gab es dann schon mehr als hundert Anwendungen. Heute sind sie für die Mensch-Technik-Schnittstelle unverzichtbar. Sie werden allgemein als LCD bezeichnet, wobei die Abkürzung vom englischen „liquid crystal display | device" herrührt. Sie betrifft daher sowohl eine vollständige Anzeige als auch nur den eigentlichen Teil des Flüssigkristalls. Es gibt inzwischen sogar eine solche Fülle unterschiedlicher Varianten, daß es sich als notwendig erwies, die gebräuchlichsten Abkürzungen extra im Abschnitt 7.8.6 ab S. 137 alphabetisch zusammenzufassen. Dennoch kommen sie immer noch nicht im üblichen physikalisch-chemischen Modell vor. Dort sind nur die folgenden drei (evtl. vier) Aggregatzustände gebräuchlich:

- **fest**: alle Atome | Moleküle sind unveränderlich an Orte gebunden. Ist ihre Anordnung völlig regelmäßig, periodisch, so liegt ein Kristall vor. Bei unregelmäßiger Anordnung ist das Material amorph. Bei einer wenig ausgeprägten (Fern-) Ordnung liegen Quasikristalle vor. Je nach der Temperatur schwingen die Atome | Moleküle verschieden stark um ihre Ruhelage. Oberhalb der Schmelztemperatur gehen sie gewöhnlich in eine Flüssigkeit über.
- **flüssig:** Die Atome | Moleküle sind relativ frei beweglich, besitzen also keine festgelegten Orte mehr. Sie sind aber noch dicht gepackt. Ihr Abstand nimmt jedoch deutlich mit der Temperatur zu. Oberhalb der Siedetemperatur werden sie zu einem Gas.
- **gasförmig:** Die Atome | Moleküle besitzen soviel kinetische Energie, daß sie frei durch den Raum fliegen. Sie stoßen dabei teilweise aufeinander und | oder an die Wände des Gefäßes und werden dabei reflektiert. So nutzen sie allen verfügbaren Raum völlig aus. Bei hoher Temperatur kann Ionisierung eintreten. Dann wird zuweilen vom vierten Aggregatzustand (Plasma S. 120ff.) gesprochen.

Flüssigkristalle besitzen – wie schon ihr Name sagt – sowohl Eigenschaften der Flüssigkeit als auch des Festkörpers. Sie folgen einer gewissen „Fern-" Ordnung, die maximal bis zu fast einem Millimeter reicht. Beim Erhitzen geht daher der Festkörper zunächst in eine „trübe Flüssigkeit" über. Erst später wird die Flüssigkeit „klar". Daher wird zusätzlich zum Schmelz- und Siedepunkt der Klärpunkt eingeführt. So entsteht der für Flüssigkristalle typische Zwischenbereich gemäß **Bild 7.18**e (umseitig). In ihm sind mehrere Eigenschaften – wie Dielektrizitätskonstante, Brechungsindex, Leitfähigkeit und Elastizität – richtungsabhängig. Die Atome | Moleküle müssen also irgendwie systematisch angeordnet sein. Die drei wichtigsten Varianten dieser Anisotropie (Mesophasen) zeigt, im Vergleich zum üblichen isotropen (ungeordneten) Fall, Bild 7.18i. In der Darstellung sind die besonders häufigen Moleküle in Form langgestreckter Toroide ausgewählt.

Smektische Flüssigkristalle sind hochviskose Pasten mit ausgeprägter, zweidimensionaler Schichtenstruktur. Sie setzen einer Verschiebung der Schichten gegeneinander fast keinen Widerstand ent-

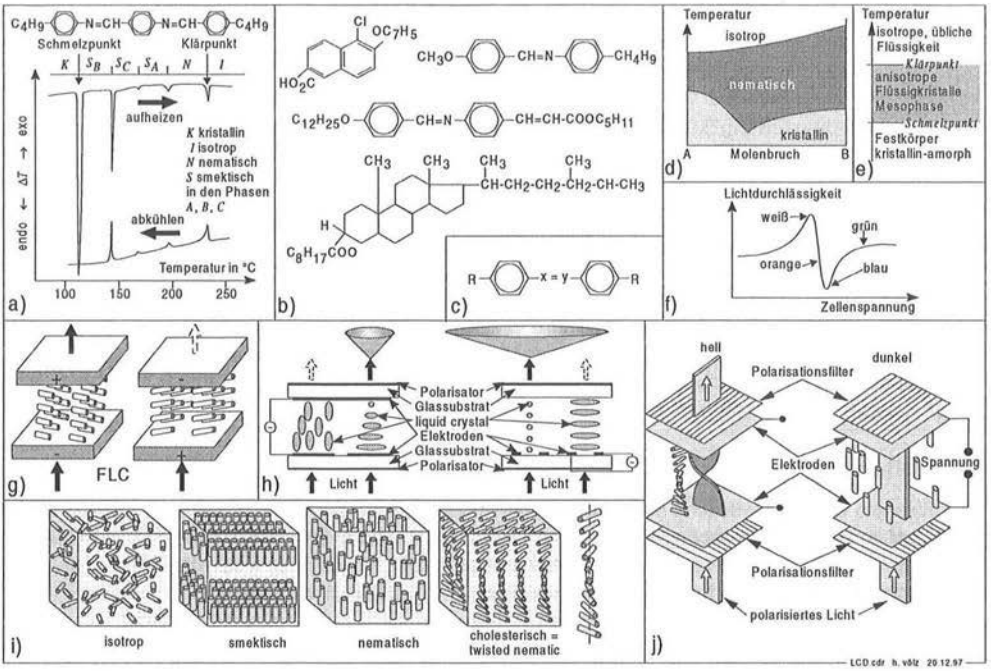


Bild 7.18 Grundlagen für die LCD-Technik

gegen. Deutlich erschwert ist jedoch die dazu senkrechte Verschiebung, also jene in Längsrichtung der Moleküle. Für Anzeigen haben diese Flüssigkristalle keine Bedeutung erlangt.

In der *nematischen* Phase sind die Moleküle parallel ausgerichtet. Ansonsten sind sie, wie bei der isotropen Flüssigkeit, rein zufällig angeordnet. Jedes Molekül weicht um einen Winkel Θ von der gemittelten Symmetrieachse des ganzen Flüssigkeitskristalls ab. Daher kann ein Ordnungsgrad

$$S = 1 - \frac{3}{2}\overline{\sin^2(\Theta)}$$

eingeführt werden. Für eine ideale, nematische Substanz beträgt er 1, für reale liegt er bei 0,7 bis 0,8. Mit einer Temperaturerhöhung wird er kleiner und bei ungefähr 0,4 folgt sprunghaft der Klärpunkt mit $S = 0$.

Die *cholesterische* Phase kann als verdrillte nematische (englisch: twisted nematic =TN) betrachtet werden. In ihr existieren schraubenförmig angeordnete Molekülgruppen (Wendeltreppe), die gedanklich an einen Faden gebunden sind (Bild 7.18i ganz rechts). In dieser Phase „hängen" viele solche Molekülfäden parallel nebeneinander. Die Drehachse der Moleküle liegt dabei senkrecht zur Längsachse der Moleküle. Die Periodenlänge (je Windung) hängt von vielen Einflüssen ab und variiert etwa zwischen 0,2 und 20 µm. Ein genau definiertes Verdrehen kann durch Eigenschaften der begrenzenden Wände erzwungen werden. Auf deren Oberfläche wird dazu z. B. durch Reiben mit einem Tuch, einem schrägen Bedampfen oder durch Auftragen eines Polymers eine spezielle Textur erzeugt.

Heute gibt es eine sehr große Anzahl von Substanzen für Flüssigkristalle. Es wird angenommen, daß ca. 5 % aller organischen Flüssigkeiten hierzu fähig sind. Ganz wenige, zufällig ausgewählte Beispiele zeigt Bild 7.18b. Besonders typisch ist die Grundstruktur von Bild 7.18c. Unter anderem können für die Mittelgruppe (–x=y-) auftreten: -N=NO- (Azoxybenzole), -CH=N- (Schiffsche Basen), -CH=CH- (Stilebene) und -O-CO- (aromatische Ester). Bei den Biphenolen fehlt (–x=y-) sogar. Für

die Flügelgruppen treten u. a. auf: - $(CH_2)_nCH_3$ (Alkyl-), $-O(CH_2)_nCH_3$ (Alkoxy-), $-OCO(CH_2)_nCH_3$ (Acyloxy-) und -C=N (Nitrilgruppe). Der Übergang zwischen den einzelnen Phasen erfolgt bei recht unterschiedlichen Temperaturen. Bild 7.18a zeigt dazu das Beispiel eines Differential-Thermo-Diagramms. Der für Anwendungen günstige Temperaturbereich wird häufig mit Mischsubstanzen erreicht. Dies deutet das Phasendiagramm von Bild 7.18d an. Für alle Anzeigen mit Flüssigkristallen sind zwei Erscheinungen entscheidend:

- Die spezifischen Eigenschaften der Flüssigkristalle sind relativ leicht elektrisch, magnetisch, thermisch und epitaktisch zu beeinflussen. Hierfür ist eine Vielzahl von Effekten bekannt. Bei der verdrillten cholesterischen Phase kann z. B. durch ein elektrisches Feld die Orientierung der einzelnen Moleküle unter Beibehaltung ihres Schwerpunktes verändert werden. Dadurch wird dann zumindest teilweise die typische Verdrehung aufgehoben.
- Es besteht eine beachtliche Wechselwirkung mit Licht. So wird von der cholesterischen Phase die Polaristionsebene des Lichts vom Drall „mitgeführt".

Den typischen Aufbau eines cholesterischen LCD-Pixels zeigt Bild 7.18j. Im linken Teilbild ist zu sehen, wie das von unten kommende Licht am unteren Polarisationsfilter (dichroitische Folie) linear polarisiert wird. Von den verdrillten Molekülen wird seine Polarisationsebene mitgeführt. Dadurch kann es das obere „gekreuzte" Polarisationsfilter ungehindert passieren. Die Fläche erscheint hell. Eine Spannung an den beiden durchsichtigen Elektroden (z. B. aus Indium-Zinn-Oxid = ITO) löst die verdrillte Struktur auf (Teilbild rechts). Dieser Feldeffekt heißt auch TN-FEN (twisted nematie field effect mode) oder Schadt-Helfrich-Effekt. Er wird seit etwa 1976 genutzt und gilt für die meisten heutigen LCDs. Hierdurch gelangt das Licht mit unveränderter Polarisationsebene zum oberen Polarisationsfilter und kann folglich nicht passieren. Die Fläche bleibt dunkel.

Die typische Dicke eines Flüssigkristalls ist ≤ 1 mm. Durch eine im Bild nicht gezeigte Isolation (meist SiO) wird auch bei einem ungewollten Gleichstrom vermieden, daß in der Flüssigkeit bzw. an den Elektroden elektrolytische Prozesse ablaufen. Die Hintergrundbeleuchtung der LCDs erfolgt heute meist mit dünnen Kaltkathoden-Leuchstoff-Röhren (CCFL, cold cathode fluorescent lamp), Elektrolumineszenz-Folien (EL) oder Leuchtdioden (S. 120ff, 130ff). Sie bestimmt den Energieverbrauch von LCD-Anzeigen. Infolge der geringen Lichtdurchlässigkeit von LCDs können nur wenige Prozent genutzt werden. Die Energie zur Steuerung des Flüssigkristalls ist dagegen extrem klein. Günstiger sind folglich LCDs, die von „vorn" in Reflexion beim Umgebungslicht zu betrachten sind. An der Rückseite der LCD – also dort, wo im Bild 7.18j das Licht eintritt – befindet sich dann hinter der Polarisationsfolie eine Reflexfolie. Varianten beider Techniken werden im nächsten Abschnitt detaillierter behandelt. Hier folgen noch einige abweichende Lösungen.

Die bisher beschriebenen Displays ermöglichen selbst unter günstigen Bedingungen (nächster Abschnitt) nur einen Betrachtungswinkel von etwa 40° vertikal und 90° horizontal (Bild 7.18h links). Es entstand daher eine andere Betriebsweise, nämlich das Schalten mit vertikalem (transversalem) Feld (IPS, in plane switching). Die beiden Elektroden liegen dann gemäß Bild 7.18h (rechts) nebeneinander. Zusätzlich verringert sich sogar die Layerzahl auf zwei. Hiervon sind wiederum zwei Varianten in Gebrauch: Entweder liegt die Bezugselektrode ober- oder unterhalb (bevorzugt) der SiO_2-Isolatorschicht. Mit dieser Technik wird ein Winkel von 140° horizontal und vertikal erreicht. Leider ist aber eine noch stärkere Hintergundbeleuchtung notwendig.

Ähnlich den ferroelektrischen Folien (S. 145) gibt es auch ferroelektrische LCD (FLC). Diese Flüssigkeitskristalle besitzen eine „eingefrorene" Polarisation. Dadurch sind sie bistabil mit zwei spiegelsymmetrischen Zuständen (Händigkeit) hoher innerer Ordnung (Bild 7.18g). Dazwischen schalten sie in etwa 100 ns um. Für mehrere Helligskeitsstufen ist also eine Zeitmodulation erforderlich. Weitere Bezeichnungen sind z. B. **SSFLCD** (surface stabilized ferroelectric LCD) und **SSCT** (surface stabilized cholesteric texture mode).

Bei den üblichen LCD sind für eine Farbdarstellung (nächster Abschnitt) Filter erforderlich. Im beschränkten Umfang können Farben jedoch auch direkt über elektrisch gesteuerte Laufzeiteffekte (Dispersion und Doppelbrechung) innerhalb der Zelle erreicht werden. Die cholesterischen Molekülstrukturen sind hier im Ruhezustand in der Ebene der Anzeigefläche ausgerichtet. Das elektrische

Feld zwingt die Strukturen dann mehr oder weniger stark in die Richtung der Elektroden. Derartige Zellen werden in Reflexion betrieben und heißen ECB (electrically controlled birefringence), CCSTN (color coded super twisted nematic), DAP (deformation of aligned phases) oder SCR (super reflective color). Dieses optische Medium ist anisotrop, also doppelbrechend mit zwei verschiedenen Brechungsindizes n_i. Das Licht spaltet sich dadurch in zwei senkrecht zueinander polarisierte Richtungen auf, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit c_i und Wellenlänge λ_i fortbewegen.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Durch Polarisationsfilter ist es möglich, beide Wellen zu trennen. Über das elektrische Feld sind die Parameter zu ändern. So ist eine kontinuierliche Durchstimmung in vier bis fünf Farben möglich: weiß, orange-rot, grün, blau und schwarz. Eine typische Kurve zeigt Bild 7.18f.

Bei den üblichen LCD geht ca. 70 % des Lichtes an den Polarisationsfolien verloren. Deshalb sind sie reflexiv unterhalb von 100 Lux kaum mehr ablesbar. Hier bietet das fluoreszenzaktivierte Display FLAD eine Lösung an. Es enthält einen mit fluoreszierenden Molekülen versehenen Kunststoff, der das einfallende Licht sammelt und mehrfach reflektiert. So ist die Ablesbarkeit bis herab zu 5 Lux möglich. Für eine Anzeige bei völliger Dunkelheit wurde zeitweilig eine Tritiumquelle zur zusätzlichen Anregung verwendet. Dies sind kleine Glasröhren, in denen unter erhöhtem Druck Tritiumgas (H_3) eingeschlossen ist und deren Wände mit Leuchtphosphor überzogen sind. Beim radioaktiven Zerfall wird ein Elektron frei, das den Leuchtstoff anregt. Es gibt auch Tritiumleuchtfarbe, in der H_3 chemisch gebunden ist. Die Halbwertszeit dieser Quellen liegt bei einigen Jahren. Wegen der Strahlung sind jedoch besondere Sicherheitsmaßnahmen notwendig.

7.8.5 Ansteuerungen von LCD

In mehreren Bereichen der Technik – z. B. bei Displays für die Pixel und bei Datenspeichern für die Speicherzellen – besteht folgende Aufgabe: Das System besitzt x (10^3 bis 10^9) Objekte. Sie müssen im Betrieb einzeln „angesprochen" werden. Die verfügbare Technologie ermöglicht jedoch nur, z (etwa ≤ 200) Leitungen anzuschließen. In dem Spezialfall, bei dem zu jedem Zeitpunkt immer nur eine *einzige* Zelle auszuwählen ist, läßt sich das Problem noch einfach lösen. Das gilt besonders bei den Speichern. Es wird aber deutlich komplizierter, wenn zu jedem Zeitpunkt eine Auswahl von y Objekten mit $1 \leq y \leq x$ ansteuerbar sein soll. Das tritt besonders bei Bildschirmen auf. Deshalb werden im folgenden die Objekte Pixel genannt. Die bekannten Lösungen lassen sich im wesentlichen auf die Kombination von vier Prinzipien zurückführen:

- **Taktung und Speichern:** Bei fast allen Lösungen ist der Zeitpunkt des Ansprechens nicht ganz frei wählbar. Es wird ein zeitliches Regime realisiert, welches garantiert, daß jedes Pixel periodisch (getaktet) in hinreichend kurzen Zeitabständen T erreicht wird. T kann z. B. der gerade noch verträglichen Flimmerfrequenz $f_{Fl} \geq 50$ Hz entsprechen. In der Zwischenzeit darf das Pixel seine relevanten Eigenschaften nicht ändern; es muß sie beibehalten|speichern.
- Die **sequentielle Ansteuerung** liegt z. B. beim Bildschirm vor. Die Punkte werden in genau gegebener Reihenfolge angesprochen. Es ist eine sehr hohe Taktfrequenz $f = x/T$ erforderlich.
- In einer **Matrix** existieren n Zeilen und m Spalten. Sie definieren $m \times n$ Felder für die Pixel. *Ein einzelnes* Pixel ist dann durch $m+n$ Leitungen zu adressieren. Für eine gegebene Pixelanzahl sind die wenigsten Leitungen bei einer quadratischen $m \times m$-Matrix notwendig. Dann gilt $y = 2 \cdot \sqrt{x}$. Gleichzeitig ansprechbar sind jedoch nur soviel Pixel, wie in einer Zeile bzw. Spalte vorkommen. Die Taktung muß also n- bzw. m-mal beschleunigt erfolgen. Das Prinzip dieser Technik zeigt schematisch **Bild 7.19**a auf S.136. Mit den Zeilenimpulsen wird eine Zeile angesteuert, mit den Spaltenimpulsen werden innerhalb dieser Zeile bestimmte Pixel ausgewählt.
- Die **Codierung** erfolgt durch eine kombinatorische Schaltung im System. Sie beruht darauf, daß mit s Bit (Speicherzellen) 2^s Zustände herstellbar sind. Werden also mit den Zuständen die z Leitungen (z. B. Zeilen) adressiert, so reduziert die Codierung sie auf $s = \log_2(z)$. Der Nachteil ist, daß dabei immer nur eine der z Leitungen ansprechbar ist. Im Bild 7.18a wären das also die

Zeilen und nicht die Spalten. Soll jedoch prinzipiell nur ein Punkt der Matrix angesprochen werden, so ist die Codierung auch für Zeilen und Spalten zulässig. Bei einer quadratischen Matrix sind dann nur noch $s = \log_2(2 \cdot \sqrt{x}) = 1 + {}^1/_2 \cdot \log_2(x)$ erforderlich.

Eine spezielle, jedoch nicht genau definierte Kombination ist der **Multiplex**-Betrieb. Bei LCD-Anzeigen wird hierunter eine Kombination von Matrix-Schaltung und periodischer Tastung verstanden. Dabei wird jedes Pixel relativ kurz im Vergleich zu seiner Ruhepause angesprochen. Der Multiplexgrad ist die Anzahl der Pixel, welche innerhalb einer Taktperiode aktiviert werden. Hierdurch entstehen vor allem drei Probleme, die mit dem Multiplexgrad zunehmen, aber auch deutlich von typischen Eigenschaften (Parametern) der LCD-Anzeigen beeinflußt werden:

- Der **Kontrast** der Anzeige sinkt: In den Pausen ändert sich unerwünscht der Zustand der Pixel.
- Es gibt ein **Übersprechen**: Benachbarte Pixel beeinflussen sich sowohl bei der Adressierung als auch in den Pausen.
- Die Anzeige zeigt eine **Trägheit**: Die Taktung erfolgt in einem relativ großen Zeitabstand. Spezifische Effekte der LCD-Anzeigen haben hier besonders großen Einfluß.

Unter sonst gleichen Bedingungen sind die nachteiligen Folgen meist um so ausgeprägter, je weniger Anschlußleitungen verwendet werden, je höher also der Multiplexgrad ist. Die einzelnen LCD-Zellen besitzen nämlich eine elektrische Kapazität. Sie muß mit den Multiplex-Impulsen auf- und entladen werden. Dazu ist Energie notwendig. Außerdem entlädt sich diese Kapazität durch innere Verluste der Zelle. Dadurch nimmt zumindest der Kontrast ab. Die wesentlichen Verbesserungen der letzten zehn Jahre betreffen daher vor allem die LCD-Zellen. Erst dadurch konnte u. a. der Multiplexgrad deutlich erhöht werden. Das führte einmal zu einer höheren Auflösung, also zu einer größeren Anzahl von Pixel. Außerdem wurden farbtüchtige Displays möglich. Ein „sichtbares Farbpixel" besteht dann nämlich aus drei LCD-Zellen, die je mit einer Farbfolie (Rot, Grün oder Blau) versehen sind. Die erreichten Fortschritte betreffen drei Ansätze:

- Durch technologische Fortschritte können statt der üblichen 90°-Drehung (cholesterisch) 180 ° (**STN** = super twistet nematic) oder gar 270° (**DSTN** = double super twisted nematic) erreicht werden. Dadurch wird die elektrooptische Kennlinie (Helligkeit als Funktion der angelegten Spannung) deutlich steiler und u. a. der Kontrast verbessert.
- Es wurden Flüssigkeitskristalle mit **Gedächtnis-Effekt** (Speicherung) entwickelt.
- Durch Hinzufügen eines Transistors (**TFT** = thin film transistor) zu jedem Pixel werden die getaktet übertragenen Werte hinreichend langfristig im zugehörigen Kondensator relativ verlustarm gespeichert. So werden Übersprechen, Kontrast und Trägheit deutlich verbessert. Als Folge lassen sich feinere Helligkeitsstufen (Grauwerte) erreichen. Diese Technik heißt auch **Aktiv-Matrix**.

Mit den Fortschritten traten natürlich auch neue Störungen auf. Alle Stoffe, damit auch Flüssigkristalle, besitzen eine Dispersion; ihre Eigenschaften sind also von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Die großen Drehwinkel verstärken diesen Effekt. Bildpunkte, die eigentlich weiß sein sollen, erscheinen etwas bläulich oder grün auf gelbem Grund. Zur Kompensation entstanden zwei Varianten. Bei den **DSTN** (double super twisted nematic) wird eine zweite STN-Zelle ohne Ansteuerung in Reihe mit der angesteuerten angeordnet. Bei den **FSTN** (film super twisted nematic) wird dagegen eine spezielle Kompensationsfolie eingefügt. Beim **TSTN** (triple STN) wird durch mehrere Filme ein noch besserer Farbausgleich erreicht.

Das Hauptproblem der **TFT**-Zellen besteht in der zuverlässigen Herstellung der Dünnfilmtransistoren auf dem Glassubstrat. Von Millionen Transistoren darf kein einziger fehlerhaft sein. Das reduziert deutlich die Ausbeute und macht aktive Displays so teuer. Ein Vergleich mit der üblichen Halbleitertechnik ist kaum angebracht. Einmal ist die Displayfläche um ein Vielfaches größer als ein Chip. Zum anderen wird nicht von einkristallinem Basismaterial, sondern von amorphem, speziell aufbereitetem, alkalifreiem Glas ausgegangen. Die Dotierung muß durch Aufdampfen der richtigen Materialien ersetzt werden. Der Transistor kann allerdings deutlich größer ausfallen. Neuere Lösungen versu-

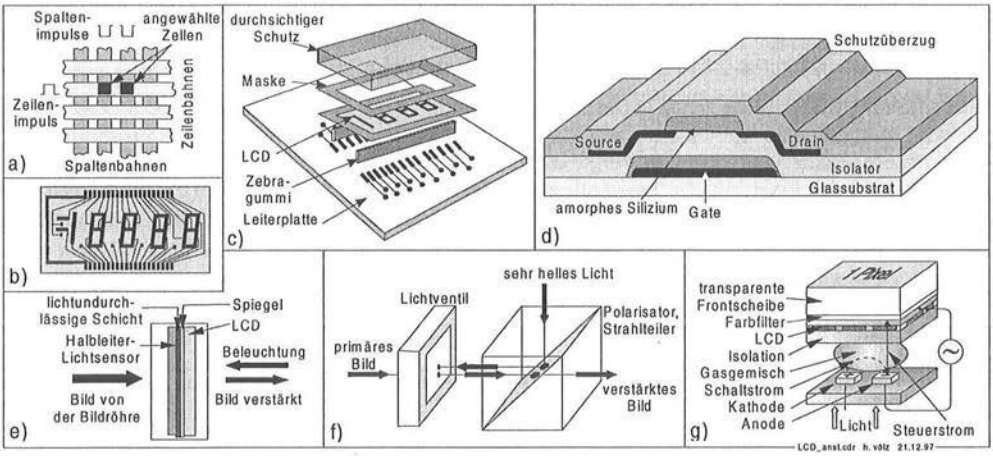


Bild 7.19 Aufbau einer einfachen LCD-Anzeige (b, c) und Ansteuerung von LCDs

chen, die Probleme durch eine andere Transistorart, den **MIM** (metal isolator metal), oder mittels Dioden **TFD** (thin film diode), zu lösen | zu verringern.

An den Beispielen des **Bildes 7.19** werden im folgenden einige Lösungen und Details behandelt. Den Aufbau einer mehrstelligen Siebensegmentanzeige zeigt Bild 7.19c als Explosionszeichnung. Auf zwei Glasplatten sind die entsprechenden Elektroden mit Zinn- oder Indiumoxid aufgebracht. Auf dem oberen Glas befinden sich die einzelnen Segmente (Bild 7.19b). Auf dem unteren sind sie für jede Ziffer ganzflächig ausgelegt. Darüber folgen isolierende Schutzschichten. Dann erhalten beide Platten durch Wischen oder auf anderem Wege die Richtungsorientierung für die cholesterischen Flüssigkristalle. Beide Glasplatten werden mit den Elektroden nach innen mit etwa 10 µm Abstand montiert. In den Zwischenraum wird die Flüssigkeit eingefüllt. Anschließend wird die Zelle mittels Glaslot oder hochentwickelter Klebetechnik verschlossen. Dies muß sehr zuverlässig erfolgen. Denn einmal hängt davon wesentlich die Lebensdauer ab und zum anderen sind die Flüssigkeiten oft umweltschädigend bis giftig. Auf beiden Außenseiten wird nun je eine dichroitische Polarisationsfolie befestigt. Abschließend werden noch die Kontakte zum Anschluß zusammengefaßt und verstärkt. Damit ist der eigentliche Anzeigenteil, kurz auch LCD genannt, für die Montage fertig. Die Kontaktierung zur Leiterplatte erfolgt über Zebragummi. Er besteht aus einer regelmäßigen Abfolge leitender und isolierender Streifen. Ihr Abstand ist deutlich geringer als die Kontaktabstände der Leiterplatte bzw. der LCD und deren Abstände. So können seitliche Toleranzen überbrückt werden, ohne daß dabei Kurzschlüsse verursacht werden. Außerdem werden Unebenheiten und Toleranzen ausgeglichen und schließlich wird der Druckempfindlichkeit der Zelle Rechnung getragen. Die das System abschließende durchsichtige Schutzhülle bewirkt die richtige Zuordnung der Anschlüsse von Leiterplatte und LCD.

Die Anwendung der LCD-Technik ist heute äußerst vielfältig. Sie reicht vom einfachen Display mit nur wenigen Zeichen, z. B. Armbanduhren und Taschenrechner, bis zum hochauflösenden Monitor mit teilweise 1024×768 oder ganz selten sogar 1280×1024 Pixel. Es gibt weiter viele Sonderlösungen. Auf der einen Seite sind es Großanzeigen, LCD-Projektoren und Zusätze für Overheadprojektoren. Infolge der Stabilität der Glasplatten und ihres geringen Zwischenraumes sind LCD-Panals jedoch in der Größe deutlich begrenzt. Deshalb wurden für größere Flächen Abstands-Säulchen eingeführt. Bei den Farbdisplays sind sie mit der Black-Matrix – welche die Räume zwischen den einzelnen Farbfiltern schwarz ausfüllt – kombiniert. Durch Aufbau aus vier Teilen wurde bisher maximal 1 m Diagonale erreicht. Auf der anderen Seite liegen Miniaturanzeigen u. a. für Monitore der Camcorder, digitalen Kameras, Taschenfernseher und Datenhelme. Ihre Größe reicht herab bis

0,7 Zoll ≈ 18 mm. Für die Ablesung mit Lupe gibt es sogar eine Variante von 0,25 Zoll Diagonale (4,8×3,6 mm^2) (s. S. 225). Diesen vielen Varianten muß auch der Betriebstemperaturbereich angepaßt sein. Während -15 bis +60 °C typisch sind, gibt es je nach gewählter Technik und Flüssigkeit auch Zellen für z. B. -25 bis +85 °C oder -15 bis +100 °C.

Am meisten verbreitet sind immer (noch) 90°-TN-Zellen mit reiner Schwarz-Weiß-Anzeige. Sie ermöglichen auch Graustufen. Wegen der Probleme bei der Multiplex-Ansteuerung wird hiervon aber kaum Gebrauch gemacht. Selbst bei den verbesserten STN-Zellen gibt es, durch die verzögerte Einstellung der Moleküle des Flüssigkristalls, Schwierigkeiten. Dadurch verschwindet auf Monitoren bei schneller Bewegung der Mauszeiger (er „taucht" unter) und kehrt erst bei Ruhe wieder. Eine gewisse Verbesserung – auch des Kontrastes – konnte durch doppeltes Scannen zwischen einem Bildwechsel erreicht werden (dual Scan). Neben diesen passiven Displays gewinnt das aktive Display mit Dünnfilmtransistoren immer mehr an Bedeutung. Seinen prinzipiellen Aufbau zeigt Bild 7.19d. Auf den Glasträger wird zunächst das Gate aufgedampft und mit einer Schutzschicht versehen. Dann folgt der Isolator und darauf als Leiter Source und Drain. Sie werden zur Erzeugung des Kanals mit polykristallinem Silizium verbunden. Schließlich wird alles mit einer Schutzschicht abgedeckt. Neben den beiden o. g. Varianten (MIM, TFD) ist in der letzten Zeit auch versucht worden, reflektierende Displays auf einem Si-Substrat zu erzeugen.

Schließlich sollen noch zwei Sondervarianten der LCD-Ansteuerung beschrieben werden. Für die Großbildprojektion hat die **Lichtventiltechnik** eine gewisse Anwendungsbreite erlangt. Den Kern bildet dabei eine Lichtventilzelle (engl. ILA = image light amplifier), deren Aufbau Bild 7.19e zeigt. Sie ist eine Kombination aus Halbleiter- und LCD-Technik. Eine Halbleiterschicht wird von links mit dem Bild beleuchtet (Bild 7.19f). Dadurch ändert sich lokal ihre Leitfähigkeit und folglich die Ladungsdichte. Über mehrere Zwischenschichten, darunter ein Spiegel, beeinflußt sie so elektrostatisch die reflexive LCD-Schicht. Diese wird von rechts (oben) über einen Polarisations-Strahlteiler mit sehr hellem Licht angestrahlt. Beim Hin- und Rückweg im Flüssigkristall erfolgt, je nach primärer Lichtintensität, eine Drehung der Polarisationsebene. Beim Rückweg über den Strahlteiler entstehen daraus die notwendigen Helligkeitsänderungen.

Eine weitere Sonderansteuerung erfolgt über Plasmen in den **PALC** (plasma addressed liquid crystal). Sie wurde etwa 1990 von Tektronics erfunden, und 1995 wurden erste Muster vorgestellt. (weitere Details S. 218ff). Den typischen Aufbau eines Pixels zeigt Bild 7.19g. Zum „Einschalten" der Zelle wird zwischen Kathode und Anode ein Plasma gezündet. Die dabei auftretenden, freien Ladungen beeinflussen ebenfalls statisch den Flüssigkristall. Da diese Ladungen nur langsam abgebaut werden, wirken sie auch als Speicher. Mit diesen Anordnungen lassen sich daher ähnliche Leistungen wie mit einer TFT-Zelle erreichen. Sie sind jedoch wesentlich einfacher herzustellen.

7.8.6 Abkürzungen für Flüssigkristalle

In den beiden letzten Abschnitten wurden viele Abkürzungen für die LCD-Technik benutzt. Sie sind hier durch einige ergänzt und zu einem alphabetischen Überblick zusammengefaßt worden. Z. T. sind sehr kurze Erklärungen hinzugefügt.

AM(D)	Aktiv-Matrix-(Display) =TFT
CCSTN	color coded STN = ECB
CSTN	color STN; durch Vorsetzen vor RGB-Filtern entstehen farbige Displays.
DAP	deformation of aligned phases = ECB
DSM	dynamic scattering mode = elektrodynamischer Effekt. Mit ihm wurden ab 1973 die ersten Rechnerdisplays in japanischer Massenproduktion hergestellt. Sie haben heute kaum noch Bedeutung. Beim Anlegen einer Wechselspannung entstehen in einem nematischen Flüssigkeitskristall Turbulenzen. An ihnen wird Licht durch Doppelbrechung gestreut. Der zuvor klare Flüssigkeitskristall erscheint dadurch im Durchlicht schwarz, in Reflexion milchig-weiß. Für die Turbulenz werden relativ große Spannungen und Leistungen benötigt.
DSTN	double super twisted nematic. Es realsiert 270°-Drehungen und/oder vermeidet „störende" Farbeffekte durch Hintereinanderschalten von zwei Zellen.

ECB electrically controlled birefringence. Eine elektrisch gesteuerte Doppelbrechung in der Zelle wird zur kontinuierlichen Farbsteuerung genutzt: weiß, rot, grün, blau, schwarz.

F(E)LC(D) ferroelektrische LCD; also FLC, FELC, FLCD, FELCD. Dies ist ein bistabiler Flüssigkristall mit eingefrorener Polarisation, Schaltzeit ≈ 100 ns. Helligkeitssteuerung ist über Zeitmodulation möglich.

FLAD fluoreszenzaktiviertes Display. Zum Anzeigen in sehr dunklem Umlicht benutzt es Fluoreszenz zur Verstärkung des Lichts und teilweise zusätzlich radioaktives Tritium.

FSTN film super twisted nematic. Durch spezielle Filme werden Farbstörungen vermieden.

HCAD high contrast addressing display; eine Speziallösung von Toshiba

ILA image light amplifier; eine LCD zur Lichtverstärkung in Großbildprojektoren

IPS in plan switching. Das Steuerfeld liegt hier parallel zur Oberfläche des LCD.

LCD liquid crystal display|device; Flüssigkristallanzeige bzw. -system

MIM metal isolator metal ≈ TFD, jedoch mittels anderer Transistortechnik

MLA multi line addressing. Es werden gleichzeitig mehrere Zeilen adressiert.

PALC plasma addressed liquid crystal. Die übliche elektrische Steuerung erfolgt hier durch ein Plasma.

PDLC polymerdispergierte LC. Ein nematischer Flüssigkeitstropfen umhüllt mit einem Polymer. Es entstehen reflektierende farbige Tröpfchen. Nicht die Polarisation sondern die optische Dichte, d. h. der Brechungsindex werden elektrisch beeinflußt.

PMD Passiv-Matrix-Display

SCR super reflective color = ECB.

SSCT surface stabilized cholesteric texture mode

SSFLCD surface stabilized ferroelectric LCD; nichtflüchtige Zellen ≈ FLC

STN super twisted nematic; cholesterische LCD mit einem Drehwinkel von 180° oder 270° (DSTN)

TFD thin film diodes. Statt des TFT wird eine Dünnfilmdiode einsetzt.

TFT thin film transistor. Es werden zusätzlich Dünnfilmtransistoren zur Verbesserung der LCD-Eigenschaften eingesetzt.

TN twisted nematic. Die Flüssigkeit ist identisch mit cholesterisch.

TN-FEN twisted nematie field effect mode = Schadt-Helfrich-Effekt; die gebräuchlichste TN-Technik

TSTN triple STN. Es werden mehrere Filme zur besseren Korrektur der Farbfehler verwendet.

7.8.7 Das Bändermodell

Grundlage aller Halbleiter ist das Bändermodell. Ein Atom besteht aus dem positiven Atomkern und den negativen Elektronen. Sie ziehen sich elektrostatisch an. Diese Kraft (Energie) nimmt quadratisch mit der Entfernung ab (S. 114). Im klassischen Atommodell wird sie durch die Fliehkraft des um den Kern kreisenden Elektrons kompensiert. Dafür gibt es aber nur wenige stabile Bahnen (**Bild 7.20**a). Sie können gemäß der Quantentheorie als diskrete Energieterme interpretiert werden. So ergibt sich das Modell des Potentialtopfes (Bild 7.20a, unterer Teil). Die gekrümmten Kurven entsprechen dem Gleichgewichtszustand zwischen Anziehung und Fliehkraft. Im Festkörper sind die Atome so dicht gepackt, daß sich die Terme der äußeren Bahnen überschneiden (Bild 7.20b). Elektronen, die sich hier bewegen, gehören daher nicht mehr einem einzelnen Atomkern an. Sie bilden ein „Elektronengas" und können sich im Festkörper frei bewegen (S. 117). Das Pauliverbot besagt nun aber, daß keine zwei Teilchen eines Quantensystems identische Energie besitzen dürfen. Daher werden diese Energieterme unscharf und weiten sich zu Bändern aus. Auch die freie Elektronenbeweglichkeit trägt mit ihrer „unbestimmten" Energie dazu bei. Die *erlaubten Bänder* sind meist weiterhin durch *verbotene Bänder* getrennt. Auch jetzt können keine Elektronen die verbotene Energie annehmen.

Schon beim einzelnen Atom sind nicht alle Terme (zulässigen Bahnen) mit Elektronen besetzt. Analog gibt es in den erlaubten Bändern *besetzte* und *leere* Subterme. Das letzte vollständig besetzte Band heißt *Valenzband*. Seine Elektronen bestimmen wesentlich die chemischen Bindungskräfte. Das erste leere oder teilweise besetzte erlaubte Band heißt *Leitungsband*. Der Energieunterschied zwischen beiden heißt Bandabstand ΔW. Das Leitungsband ist u. a. für die elektrische Leitfähigkeit des Stoffes zuständig. Durch den Wechsel in andere unbesetzte Subterme können Elektronen dann nämlich Bewegungenergie annehmen. So erlangt die Belegungsdichte der Bänder große Bedeutung. Sie wird durch die Fermistatistik (S. 119) bestimmt. Für einfache Betrachtungen genügt jedoch die Boltzmannstatistik. Daher können Elektronen der Temperatur T mit der Wahrscheinlichkeit

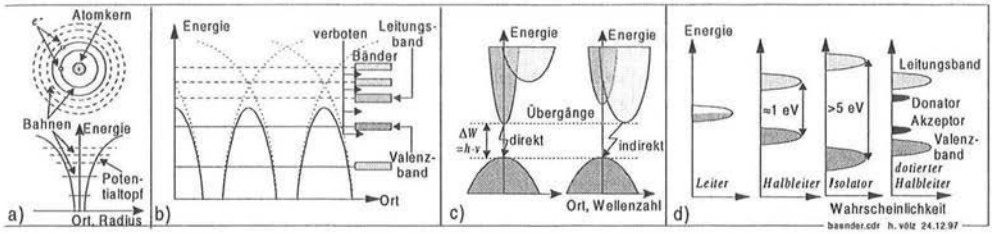


Bild 7.20 Das Bändermodell für die Halbleitertechnik

$$p = e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}}$$

den Bandabstand überspringen. Darin ist k die Boltzmannkonstante ($\approx 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K). Die Anzahl der Leitungselektronen hängt also wesentlich vom Bandabstand ab. So können Leiter, Halbleiter und Isolatoren gemäß Bild 7.20d unterschieden werden. Nur bei *Leitern* existiert bei Zimmertemperatur ein nur teilweise belegtes Band, das Leitungsband. Hier können Elektronen jederzeit kinetische Energie aufnehmen und sich daher frei bewegen. Die Leitfähigkeit des Materials nimmt mit steigender Temperatur ein wenig ab. Die thermische Energie der Elektronen belegt dann immer mehr energetisch höhere Terme, die daher für die Bewegung nicht mehr nutzbar sind. *Halbleiter* haben einen Bandabstand um 1 eV. Hier kann nur etwa jedes 10^{-7}-te Elektron ins Leitungsband gelangen. So entsteht eine geringe Leitfähigkeit, die deutlich mit der Temperatur steigt. Sobald der Bandabstand ≥ 5 eV ist, liegt ein *Isolator* vor. Bestenfalls kann jedes 10^{-85}-te der Elektronen ins Leitungsband gelangen. Selbst wenn die Temperatur um einiges zunimmt, kommt keine wesentliche elektrische Leitung zustande. Bei extrem hohen Temperaturen werden jedoch fast alle Materialien mehr oder weniger leitend.

Die bisherigen Betrachtungen gelten für einen exakten Kristall. Enthält er Fehlstellen, z. B. infolge von geometrischen Unregelmäßigkeiten oder Einlagerung von Fremdstoffen, so entstehen dadurch zusätzliche erlaubte Bänder (Bild 7.20d, ganz rechts). Bei beabsichtigter Erzeugung wird von Dotierung des Materials gesprochen. Die zugehörigen Stoffe heißen *Donatoren*. Sie schaffen Terme, die nahe dem Leitungsband liegen. Aus ihnen können selbst bei geringer thermischer Energie zusätzliche Elektronen ins Leitungsband gelangen. Andere Stoffe, die *Akzeptoren*, erzeugen ein Band, daß dem Valenzband nahe ist. Hierhin gelangen Elektronen bereits bei geringen Temperaturen. Sie verringern so die Zahl der Elektronen, die sonst in das Leitungsband gelangen könnten.

Gelangen Elektronen vom Valenzband ins Leitungs- oder Akzeptorband, so hinterlassen sie dort freie Subterme. Nehmen andere Elektronen des Valenzbandes Bewegungsenergie auf, so können sie diese Terme wieder besetzen. Auch deren Löcher können erneut durch zusätzlich bewegte Elektronen besetzt werden, die ihrerseits dadurch wieder freie Subterme hinterlassen. So trägt dann auch das Valenzband zur Leitfähigkeit des Materials bei. Dieser Effekt kann auch so interpretiert werden, als ob sich positive Ladungsträger, *Löcher* genannt, bewegen. Daher heißt diese Leitfähigkeit Löcher- bzw. *p-Leitung* (von positiv). Sie ist das Gegenstück zur Bewegung der Elektronen im Leitungsband, die daher *n-Leitung* heißt. Donatoren fördern also die *n*-Leitung und Akzeptoren die *p*-Leitung. Beide Leitungstypen zusammen bestimmen die vollständige Leitfähigkeit eines Materials. Infolge der Dotierung sind meist unterschiedlich viele Terme für Elektronen und Löcher vorhanden. Je nach der größeren Anzahl wird von *n*- bzw. *p*-leitendem Material gesprochen. Die überwiegenden Ladungsträger heißen *Majoritäts-* und die anderen *Minoritätsträger*.

Die Elektronen können auch wieder das Leitungsband verlassen und ins Valenzband zurückkehren. Dabei wird die zugehörige Energie als elektromagnetische Strahlung mit der Frequenz υ bzw. der Wellenlänge λ frei

$$\upsilon \approx \frac{\Delta W}{h} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{1}{c \cdot \upsilon} \approx \frac{h}{c \cdot \Delta W}.$$

Darin ist h die Planck-Konstante und c die Lichtgeschwindigkeit. Dieser Effekt heißt Lichtemission. Da sich beim „Herunterfallen" des Elektrons auch seine kinetische Energie ($^1/_2 \cdot m_0 \cdot v^2$) ändern kann, steht das Näherungszeichen in der Formel. Bei der Lumineszenz erfolgt die „Anhebung" nicht nur thermisch, sondern teilweise auch über Licht. Dann sind besonders gut zwei Fälle zu unterscheiden. Jedes Elektron kann nämlich nur eine gewisse Zeit im Leitungsband – im *angeregten* Zustand – verbleiben. Ist die Verweilzeit $< 10^{-6}$ s, dann wird von Fluoreszenz, andernfalls von Phosphoreszenz gesprochen.

Nicht immer erfolgt die Rückkehr des Elektrons mit der oben angegebenen Strahlungsenergie. Dies ist nur bei einem strahlenden Übergang der Fall. Dann rekombinieren ein Elektron im Leitungs- bzw. Donatorband mit einem Loch im Valenz- bzw. Akzeptorband. Bei nichtstrahlendem Übergang erfolgt der Energieabbau in so kleinen Zwischenstufen, daß nur sehr langwellige Strahlung, also bevorzugt Erwärmung im Kristall auftritt. Hierzu tragen u. a. unerwünschte Zwischenterme oder Auger-Effekte bei. Im dotiertem oder Misch-Halbleitermaterial können sich Atome etwas „versetzt" im Gitter anordnen. Die Terme sind räumlich etwas verschoben (Bild 7.20c). Nur beim *direkten* Übergang liegt der geringste Bandabstand im Kristallgitter sich genau gegenüber. Beim *indirekten* Übergang ist er um eine Wellenzahl k seitlich versetzt. Für einen strahlenden Rückfall des Elektrons ist dann eine entsprechende, zusätzliche Gitterschwingung (Phonon) erforderlich. Deshalb ist bei indirekten Halbleitern ein strahlender Übergang um rund vier Zehnerpotenzen unwahrscheinlicher. Durch den Einbau isoelektronischer Störstellen ins Gitter lassen sich dann deutlich bessere Werte erreichen. Das sind Atome, welche die gleiche Valenz besitzen und daher nicht dotierend wirken. Sie besitzen abweichende Atomradien, binden zeitweilig die beiden Rekombinationspartner und bringen also die Gitterschwingung auf. Bei GaAs bzw. GaP werden u. a. Zn, O und N genutzt.

Von großer praktischer Bedeutung ist weiterhin der *pn*-Übergang. Bei ihm treffen in einem Kristall zwei Halbleitermaterialien mit unterschiedlicher Dotierung aufeinander. Beide besitzen daher auch einen Unterschied in den einzelnen Bändern. Um ihn auszugleichen, diffundieren Elektronen und Löcher in die benachbarten Bereiche. Das geschieht solange, bis die dabei entstehenden lokalen Ladungen die Potentialunterschiede ausgeglichen sind. Die Folge ist eine trägerverarmte Zone (Sperrzone) am *pn*-Übergang. Durch Anlegen einer äußeren Spannung kann je nach Polarität diese Zone schmaler oder breiter werden. Verbreitert sie sich, so wird der *pn*-Übergang in Sperrichtung betrieben. Andernfalls liegt die Durchlaßrichtung vor. Bei hinreichender Spannung kann hier die trägerverarmte Zone ganz verschwinden, der *pn*-Übergang wird leitend. Durch den Stromfluß (Energiezufuhr) werden zusätzliche Ladungsträger erzeugt, d. h. Elektronen ins Leitungsband gehoben. Dieser Effekt heißt *Injektion* oder *elektrische Generation* von Ladungsträgern. Er ist im folgenden für die LED und den Laser wesentlich.

7.8.8 LED

Eine LED (light emitting diode) heißt zuweilen auch Lumineszenzdiode, Leuchtdiode, Injektionsdiode oder Signallampe. Sie muß deutlich vom ELD (Elektrolumineszenz Display, S. 130) unterschieden werden. Eine LED ist eine Halbleiterdiode mit speziell präpariertem *pn*-Übergang. Sie strahlt bei geringer elektrischer Leistung (ca. 10 mA, 2 V) und hoher Lebensdauer Licht ab. Dazu wird sie in Durchlaßrichtung so betrieben, daß eine beträchtliche Ladungsträgerinjektion erfolgt. Dabei werden viele Ladungsträger ins Leitungsband gehoben. Sie hinterlassen ähnlich viele Löcher im Valenzband. Um diesen Zustand geringer (thermischer) Wahrscheinlichkeit auszugleichen, fallen ständig Elektronen ins Valenzband zurück. Bei richtiger Gestaltung des *pn*-Überganges erzeugen sie dabei Photonen, deren Energie dem Bandabstand entspricht (s. S. 139). Dafür sind die im vorigen Abschnitt erklärten direkten Bandübergänge günstig. Bei richtiger Anordnung des *pn*-Überganges (s. u.) können auch die Photonen als Licht nach außen gelangen. Für eine LED gilt also:

- Der pn-Übergang muß direkte Strahlungsübergänge besitzen.
- Sie muß so strukturiert sein, daß möglichst viel Licht abgestrahlt wird.
- Durch das Material und die Dotierung muß der richtige Bandabstand für die gewünschte Lichtwellenlänge (Frequenz, Farbe) entstehen.

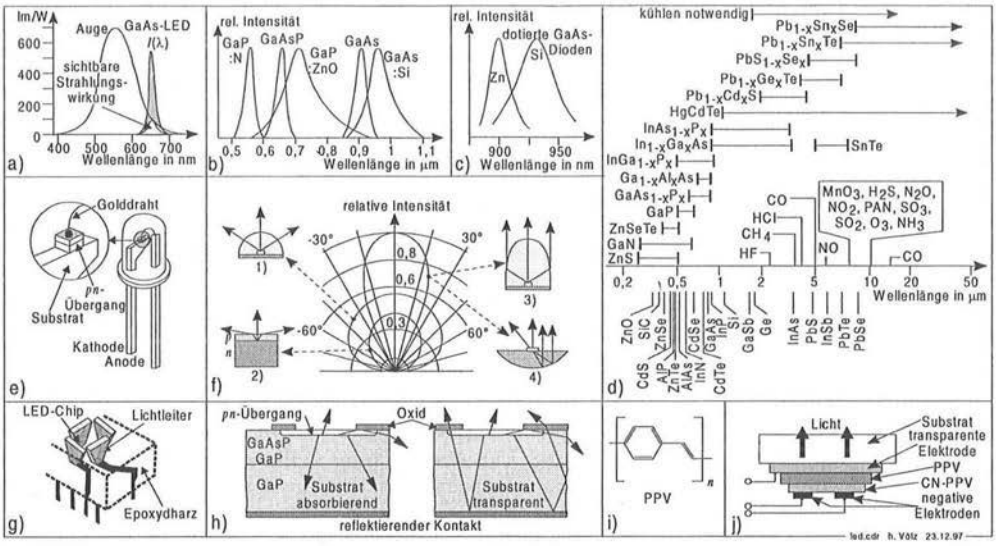


Bild 7.21 Aufbau und Eigenschaften von LED

Bezüglich der Anwendung sind vor allem zwei LED-Varianten zu unterscheiden. Einige erzeugen sichtbare und andere nicht sichtbare infrarote (IR) Strahlung. Bei sichtbarem Licht ist nämlich für die Helligkeit eine Bewertung mit unserer Augenempfindlichkeit (s. S. 29ff.) notwendig. Sie erfolgt gemäß **Bild 7.21**a und reduziert besonders bei Rot den subjektiv wahrgenommenen Wert erheblich. Infrarote LED werden dagegen nur in technischen Bereichen eingesetzt. Dabei ist keine Bewertung erforderlich. Das abgestrahlte Spektrum aller LED ist relativ schmal. Die Bandbreite wird vor allem thermisch bestimmt und liegt daher bei $k \cdot T$, also um 10 nm. Hierdurch sind die Farben fast gesättigt. Sie liegen nahe der Randkurve der Spektralfarben (S. 32). Einige typische Spektren zeigt Bild 7.21b. Der Einfluß der Dotierung geht deutlich aus Bild 7.21c hervor. Den heute möglichen, sehr großen Spektralbereich zeigt Bild 7.21d. Er reicht vom ganz nahen UV (ultra-violett) bis zum sehr fernen IR. Jedoch werden nicht alle angegebenen Bereiche großtechnisch gut beherrscht. Schon blaue LED für $\lambda < 480$ nm, also $\Delta W > 2{,}6$eV, sind auch noch heute schwierig, also nicht preiswert zu produzieren. Theoretisch kommen hierfür u. a. GaN, ZnS und $ZnS_{1-x}Se_x$ in Betracht. Für GaN lassen sich keine *pn*-Übergänge erzeugen. Große Hoffnung wurde zeitweilig auf SiC gesetzt. Bereits 1923 wurde von Lichterscheinungen an elektrisch vorgepolten Siliziumkarbid-Kristallen berichtet. Sie dienten damals der Gleichrichtung von HF-Schwingungen. Sie waren daher die ersten, wenn auch unbeabsichtigten Lumineszenzdioden. Für SiC-LED sind sowohl um zwanzig Modifikationen – u. a. kubische, hexagonale und rhomboedrische Kristallstruktur – als auch die Hochtemperaturtechnologie um 2000 °C schwer zu beherrschen. Deshalb vergingen über vierzig Jahre, ehe erste SiC-Leuchtdioden angeboten wurden. Inzwischen sind sie weitgehend durch III-V-Halbleiter verdrängt. Sie bilden ja ohnehin die Grundlage der LED mit sichtbarer Strahlung, also von Rot (1,6 eV) mit gleitendem Übergang zu Gelb bis Grün (2 eV). Hier werden vor allem GaAs und GaP genutzt. Im infraroten Bereich wird die Variantenzahl wieder größer. Besonders wichtige Anwendungen sind hier Lichtschranken, Fernsteuerungen, Optokoppler und Übertragungen in Lichtleitfasern. Dabei ist zu beachten, daß im Betrieb oberhalb von 1,5 µm eine Kühlung erforderlich ist. Je langwelliger nämlich die Strahlung ist, desto stärker machen sich die thermischen Energien störend bemerkbar. Für diesen Bereich sind im Bild 7.21d auch noch einige Gase eingetragen. Sie haben bei den Gaslasern (S. 144) größere Bedeutung erlangt.

LED des sichtbaren Bereichs werden vor allem als Signal-, Segment- und Punktanzeigen verwendet. Eine typische Signal-LED zeigt Bild 7.21e. Bei den Segmentanzeigen sind monolithische und

diskrete Typen zu unterscheiden. Bei den monolithischen strahlen entsprechend flächenhaft ausgebildete *pn*-Übergänge das Licht direkt ab. Es sind aber z. T. Sondermaßnahmen notwendig, damit kein Licht auf Umwegen in andere Segmente überstrahlt. Bei den diskreten Segmentanzeigen war es früher üblich, mehrere einzelne Leuchtpunkte zu einer Linie zu kombinieren. Dieses Verfahren ist heute durch die Lichtschacht- bzw. Lichtleitertechnologie (s. S. 147ff.) gemäß Bild 7.21g abgelöst. An der Oberfläche der flächigen LED wird meist eine Folie angebracht, welche möglichst nur das emittierte Licht durchläßt. Dadurch wird der Kontrast bei Tageslicht erheblich erhöht. So sind derartige Anzeigen selbst bei hellem Sonnenlicht (10000 lx) noch gut erkennbar.

Die einer LED zugeführte Leistung ergibt sich aus dem Produkt des Stromes I und der Spannung U. Jede Diode besitzt aber einen ohmschen Verlustwiderstand R_d. Die an ihm abfallende Leistung $I^2 \cdot R_d$ kann also nicht bei der Strahlung wirksam werden. Doch es gibt noch weitere und meist größere Verluste. So ist u. a. der Brechungsindex n des Halbleitermaterials bedeutsam. Es kann nämlich nur jenes Licht den Kristall verlassen, das steiler als unter dem Grenzwinkel

$$\varphi_g = \arcsin\left({}^1/_n\right)$$

auf die Kante Halbleiter-Luft auftrifft. Andernfalls erfolgt Totalreflexion. Für GaAs beträgt dieser Winkel 16,2° und für GaP 17,7° (n = 3,6 bzw. 3,3). Aber auch für steiler auftreffendes Licht erfolgt teilweise Reflexion. Selbst für senkrechte Strahlung beträgt der Transmissionskoeffizient nur

$$T_0 = \frac{4 \cdot n}{(n+1)^2}$$

(GaP 0,715). Gemittelt über alle Winkel ist der Wert deutlich kleiner. Von einer ebenen Oberfläche können daher bei GaP nur etwa 1,7 % der erzeugten Strahlung den Kristall auf direktem Wege verlassen. Deshalb wurden effektivere Oberflächenstrukturen entwickelt. Beispiele mit den zugeordneten Richtdiagrammen der Strahlung zeigt Bild 7.21f; zugehörige Daten die obenstehende Tabelle. Der Transmissionskoeffizient kann zusätzlich durch eine angepaßte $^{\lambda}/_4$-Schicht vergrößert werden. Die gemittelte Strahlungsausbeute steigt dadurch um 30 bis 45 %.

	1	2	3	4
ausgekoppelte Leistung	0,013	0,34	0,25	0,3
maximale Strahldichte	0,042	0,054	9,8	5
mittlere Strahldichte	0,039	0,054	0,39	0,2

Auch im Inneren des Halbleiters wird Strahlung absorbiert. Deshalb sollte der strahlende *pn*-Übergang möglichst dicht an der Oberfläche liegen. Er darf aber auch nicht zu dicht liegen, weil dann Oberflächenterme zu viele nichtstrahlende Übergänge erzeugen. Bei dem Substrat *n*-GaP kann seine Durchlässigkeit für die emittierte Strahlung vorteilhaft genutzt werden. Mit einer Reflexschicht an der Unterseite (Bild 7.21h) kann dann auch die nach unten gehende Strahlung zusätzlich genutzt werden. LED mit dieser aufwendigen TSN-Technologie (transparent substrate nitrogen) sind 5- bis 10mal heller als die üblichen mit dem absorbierenden GaAs-Substrat.

In den letzten Jahren sind polymere LED (**PLED**) entstanden. Sie heißen auch OLED (organisch), LEP oder PLD. Das Konzept geht auf C. W. Tang und S. A. van Slyke (Kodak) von 1987 zurück. Es wird meist ein PPV (Polyparaphenylen; Bild 7.21i) verwendet. Es besitzt eine Beweglichkeit um 10^{-5} $cm^2/(V/s)$ (amorphes Si rund 1 $cm^2/(V/s)$). Die Leitfähigkeit entsteht dadurch, daß die Elektronen nicht an feste Positionen gebunden (konjugiert) sind, sondern gleichzeitig zu mehreren Molekülen gehören. Als Donator ist J, als Akzeptor Na und beim *p*-dotierten Polymer Al, Ca oder Mn geeignet. Den Aufbau zeigt Bild 7.21j. Die Elemente werden mit etwa 5 V betrieben und erreichen Leuchtdichten um 20 cd/m^2 bei einem Stromverbrauch um 1 mA/cm^2. Der typische Wirkungsgrad liegt bei 3 % oder 4 lm/W. Im Labor wurden bei Impulsbetrieb maximal 100000 cd/m^2 erreicht. Für die Funktion genügen sehr dünne aktive Schichten (≈100 nm). Sie ermöglichen eine flexible, verformbare Gestaltung und großflächige Anzeige. Prinzipiell lassen sich mittels Drucktechnik sogar Transistoren herstellen. Für die Kontakte wird dann „Graphittinte" verwendet.

7.8.9 Laser

Laser ist ein Kunstwort, das von „light amplification by stimulated emission of radiation" abgeleitet wurde. Seine Funktion beruht also darauf, daß mit ihm Strahlung (u. a. Licht) durch die stimulierte Emission (s. u.) verstärkt wird. Heute geht es beim Laser jedoch meist weniger um die „Verstärkung"

von Strahlung als um die Erzeugung von Licht mit speziellen Eigenschaften. Übliches Licht besteht aus einer Vielzahl von Frequenzen. Im Modell der Quantentheorie handelt es sich dabei um Photonen unterschiedlicher Energie. Wegen dieser Quantelung können die zugehörigen Wellenzüge (Wellenpakete) auch nur endlich lang sein. Für typisches Tageslicht sind das wenige mm. Weißes Licht kann folglich etwa so wie im **Bild 7.22**a (umseitig) dargestellt werden. Das elektrische Feld elektromagnetischer Wellen zeigt auch immer in eine Richtung. Übliches Licht besitzt keine Vorzugsrichtung. Jeder Wellenzug hat seine eigene Richtung. Das Licht ist unpolarisiert (Bild 7.22a, links oben). Für spezielles Licht können beide „Zufälligkeiten" beseitigt werden. Wird nur die Unordnung der Feldvektoren aufgehoben, so liegt polarisiertes Licht vor. Wird nur eine Wellenlänge zugelassen, so ist das Licht monochromatisch (einfarbig). Weiter besteht noch die Möglichkeit, mehrere monochromatische Wellenzüge phasenrichtig so aneinander zu „hängen", daß ein längerer (kohärenter) Wellenzug entsteht. Dies kann bisher nur mit der stimulierten Emission erfolgen. Die Länge des Wellenzuges heißt dann Kohärenzlänge. Nur ein langer kohärenter Wellenzug ähnelt der kontinuierlichen Schwingung eines Senders der Nachrichtentechnik. Nur innerhalb der Kohärenzlänge kann bei Licht Interferenz auftreten. Hier liegt heute die große Bedeutung der Lasertechnik.

Die stimulierte Emission wurde bereits 1917 von Einstein vorausgesagt, aber erstmals 1928 von Ladenberg und Kopfermann nachgewiesen. Sie kann sowohl als Resonanzeffekt als auch als gleichzeitige Absorption *und* Emission aufgefaßt werden (Bild 7.22b). Bei der *Absorption* wird ein Lichtquant dazu „verbraucht | benutzt", um ein Elektron auf ein höheres Niveau zu heben. Bei der *spontanen Emission* fällt das Elektron zu einer „zufälligen" Zeit vom höheren auf das Grundniveau und strahlt dabei einen Wellenzug der zugehörigen Energie ab. Bei der *stimulierten Emission* wirken ein Photon und ein Elektron auf höherem Niveau zusammen. Der Wellenzug des Photons „holt" über einen Resonanzeffekt das Elektron vom höheren Niveau herunter. Der dabei entstehende, zusätzliche Wellenzug muß sich dabei phasenstarr an das primäre Wellenpaket anhängen. Der neue Wellenzug ist also bereits doppelt so lang. Durch mehrfache Wiederholung lassen sich so prinzipiell sehr lange Wellenzüge erzeugen. Hierfür müssen jedoch gleichzeitig viele Elektronen auf dem hohen Niveau vorhanden sein. Bei „normalen" Substanzen ist so etwas nicht möglich. Sie streben nämlich spontan für die einzelnen Bänder (Terme, s. S. 138) eine Besetzung an, die der thermischen Boltzmann-Verteilung entspricht, also exponentiell zu höheren Energien abfällt. Für ein System mit 3 Termen gilt z. B. Bild 7.22c. Für die eine wiederholte stimulierte Emission muß aber ein höherliegendes Band deutlich stärker mit Elektronen besetzt sein. Hierfür ist zumindest ein spezielles 3-Term-System gemäß Bild 7.22d erforderlich. Dabei muß der Term E_2 metastabil sein. Hier müssen die Elektronen also eine relativ lange Aufenthaltsdauer besitzen. Ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist hier also sehr groß. Dann geschieht bei einem Laser der folgende typische Ablauf:

- Mittels „Pumpen" werden durch Energiezufuhr möglichst viele Elektronen auf das Niveau E_3 überführt. Es wird eine Ladungsträger-Inversion erzeugt.
- Von dort fallen sie spontan (schnell) auf das metastabile Niveau E_2, wo sie über relativ lange Zeit verweilen können.
- Durch ein äußeres Photon, oder auch spontan, gelangt ein Photon in das System: Es treibt mit einem Lawineneffekt viele Elektronen von E_2 nach E_1. Die dabei hervorgerufenen Wellenpakete synchronisieren sich zu einem langen kohärenten Wellenzug.

Aus diesen Prozessen ergibt sich die Grundstruktur eines Lasers gemäß Bild 7.22f:

- Es ist eine Quelle notwendig, welche die Energie für das *Pumpen* liefert.
- Es ist ein „aktives" Lasermaterial notwendig, das den *metastabilen Term* E_2 besitzt.
- Es ist ein Resonator (Interferometer) erforderlich, der die stimulierte Emission dadurch fördert, daß sich in ihm eine „stehende" Lichtwelle der passenden Wellenlänge ausbildet. Im Inneren des Resonators muß dabei immer mehr Licht existieren, als hinausgelassen wird. Deshalb ist der eine Spiegel vollständig reflektierend und der zweite zu wenigen Prozenten durchlässig. Er läßt den Laserstrahl austreten.

Für das *Pumpen* gibt es heute mindestens fünf Varianten:

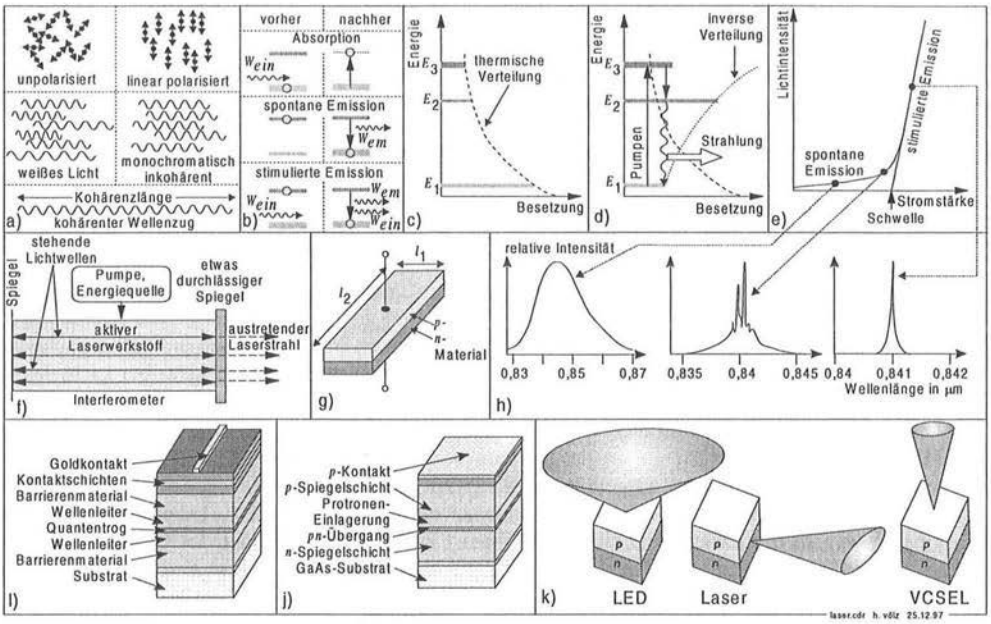


Bild 7.22 Stimulierte Emission und Lasereigenschaften

- Beim *Gas-Laser* liefern Gasentladungen, z. B. in CO_2, He-Ne, N_2 usw. die Ladungsträger mit den hohen Energien (S. 120f.).
- Beim *Festköper-Laser* wird den speziell dotierten Kristallen, z. B. Al_2O_3 mit Cr (Rubin), durch Lichtblitze von Blitzröhren die Energie zugeführt.
- Beim *Farbstoff*-Laser werden in ähnlicher Weise Farbzentren für die Terme genutzt und meist mit Blitzröhren gepumpt.
- Beim *Halbleiter*-Laser erfolgt das Pumpen durch den Stromfluß in einem *pn*-Übergang.
- Beim *chemischen* Laser stammt die Pumpenergie von chemischen Reaktionen.

Heute sind mit Lasern vier wichtige Besonderheiten zu erreichen:

- Ausgeprägt monochromatisches und stark kohärentes Licht, auch in UV und IR,
- sehr große Strahlungsintensität und -dichte (erstens werden durch die stimulierte Emission quasi schlagartig sehr viele Photonen frei gesetzt und zweitens läßt sich der kohärente Lichtstrahl gut bündeln),
- extrem kurze Lichtimpulse durch einmaliges Auslösen der stimulierten Emission und
- durchstimmbare Lichtquellen.

Für die Mensch-Technik-Schnittstelle hat nur der *Halbleiter-Laser* Bedeutung. Er kann als eine besonders aufgebaute und betriebene LED aufgefaßt werden. Neu kommt vor allem der Resonator hinzu. Dazu wird der Halbleiterkristall so gestaltet, daß er ein Fabry-Perot-Interferometer bildet. Hierzu sind die „Randflächen" senkrecht zum *pn*-Übergang gemäß Bild 7.22g entsprechend „verspiegelt". Weitgehend genügt jedoch schon der hohe Brechungsindex des Halbleitermaterials. Da die typischen Längen l_1 bzw. l_2 bei einigen 100 µm liegen, besitzt die stehende Welle hundert bis tausend Knoten. Folglich können sich unerwünscht für mehrere Wellenlängen stehende Wellen ausbilden. Für den Stromdurchfluß eines Laserkristalls ergibt sich eine Kennlinie, wie sie Bild 7.22e zeigt. Bei geringem

Strom tritt zunächst die normale LED-Emission auf (linkes Teilbild von Bild 7.22h). Mit zunehmender Stromstärke gibt es einen Knickpunkt (Schwelle, Schwellstromstärke). Von hier ab steigt die Lichtintensität stark an. Die Generation der Ladungsträger überwiegt deutlich die Absorption. So kommt es zur Ausbildung von Superstrahlung. Es beginnt also die stimulierte Emission. Dabei wird das Spektrum schmaler und es verstärken sich mehrere „Resonanzfrequenzen" (Bild 7.2h, Mitte). Noch gibt es mehrere, ungekoppelte Gebiete stehender Wellen. Bei weiterer Erhöhung des Stromes überwiegt schließlich nur eine Frequenz (Bild 7.22h, rechts). Damit ist der Laserbetrieb erreicht. Es werden lange, hoch kohärente und nahezu monochrome Wellenzüge ausgestrahlt.

Zu Beginn der Laserentwicklung war die Schwellstromstärke so hoch, daß der Kristall sich durch die starke Erhitzung bei der Laserstrahlung sofort selbst zerstörte. Ein Hauptproblem der Laser-Entwicklung war es folglich, die Schwellstromstärke soweit zu senken, daß ein längerer Betrieb möglich war. Von ursprünglich 10^5 A/cm^2 ist sie auf etwa 500 A/cm^2 gefallen (bei LED sind ≈10 A/cm^2 üblich). Hierzu sind viele mehrfach ineinandergeschachtelte Dotierungen des *pn*-Überganges erforderlich. Bild 7.22l zeigt ein Beispiel. Ferner erfordert der negative Temperaturkoeffizient zusätzliche Maßnahmen. Wenn nämlich der Strom durch einen Zufall ansteigt, so nimmt die Erwärmung zu und der Strom steigt weiter an. Dies kann sich schnell bis zur Selbstzerstörung aufschaukeln. Deshalb ist heute fast jeder Laser mit weiteren Bauelementen gekoppelt, welche den Strom begrenzen bzw. konstant halten. Nur so konnte eine große Lebensdauer und bei vielen Wellenlängen sogar ein Betrieb ohne zusätzliche Kühlung erreicht werden.

Vor einiger Zeit ist es gelungen, den Resonator auch parallel zum pn-Übergang anzuordnen. So entstand der VCSEL (vertical cavity surface emitting laser), den Bild 7.22j in einer typischen Struktur zeigt. Mit ihm wird eine weitaus bessere Bündelung der austretenden Strahlung erreicht. Der Kegel besitzt nur noch eine Öffnung von 12°. Im Vergleich zum großen Öffnungswinkel der LED und zur elliptischen Strahlungscharakteristik eines „üblichen" Lasers zeigt dies Bild 7.22k. U. a. ist durch den kleineren Öffnungswinkel auch eine bessere Einkopplung bei Lichtleitern möglich.

Immer noch bereiten – ähnlich wie bei der LED – kurzwellige Halbleiterlaser große Probleme. Die typischen roten Laser basieren auf GaAs bzw. InP. Ab etwa 1996 entstanden jedoch erste Laser für blau mit 470 nm auf Basis von ZnSe und für tiefblau bis ultraviolett aus GaN. ZnSe benötigt dabei zusätzliche Schichten aus ZnCdSe und ZnSSe, teilweise auch Zink-Magnesium-Schwefel-Selenid. Bei diesen Lasern besteht immer die Gefahr einer speziellen Selbstzerstörung. Sie beginnt an Fehlstellen und weitet sich von dort im Betrieb aus. Außerdem gibt es Probleme bei der Erzeugung leitfähiger Stromübergänge.

7.8.10 Sonstige einfache Anzeigen

Neben den zuvor behandelten „wichtigen" Anzeigen gibt es noch einige, die immer wieder mal in der Praxis oder in der Literatur auftauchen. Einige davon sollen im folgenden kurz erwähnt werden. So sind immer noch schlichte **mechanische Anzeigen** vorhanden. Sie besitzen Vorteile in der Einfachheit und der langfristigen Erprobung und bieten daher eine hohe Zuverlässigkeit. Außerdem lassen sie sich leicht so gestalten, daß nur zum Ein- bzw. Umschalten der Anzeige sehr kurzfristig Energie benötigt wird. Dann bleibt über Wochen, Monate und Jahre ihre Anzeige stabil. Ähnlich wichtig sind trotz aller Fortschritte **Glühlampen** geblieben. Sie entsprechen in guter Näherung dem Schwarzen Strahler und besitzen daher Spektralkurven, wie sie **Bild 7.23**a (umseitig) zeigt. Sie strahlen also nur bei hinreichend hoher Temperatur ausreichend sichtbares Licht aus. Das begrenzt bei aller sonstigen Robustheit und Einfachheit ihre Lebensdauer.

Relativ wenig bekannt sind **elektrochemische Anzeigen**. Sie besitzen aber Vorteile, wie einen Speichereffekt, meist hohen und dazu oft farbigen Kontrast, die Möglichkeit für großflächige Anzeigen und eine einfache Herstellbarkeit. Als Nachteile stehen dagegen eine zuweilen geringe Lebensdauer und die große Schaltzeit von meist mehreren zehntel Sekunden. Praktisch erprobt wurden u. a.

- eine reversible Abscheidung dünner Schichten,
- die Erzeugung und Löschung von Farbzentren,
- die Elektrophorese,

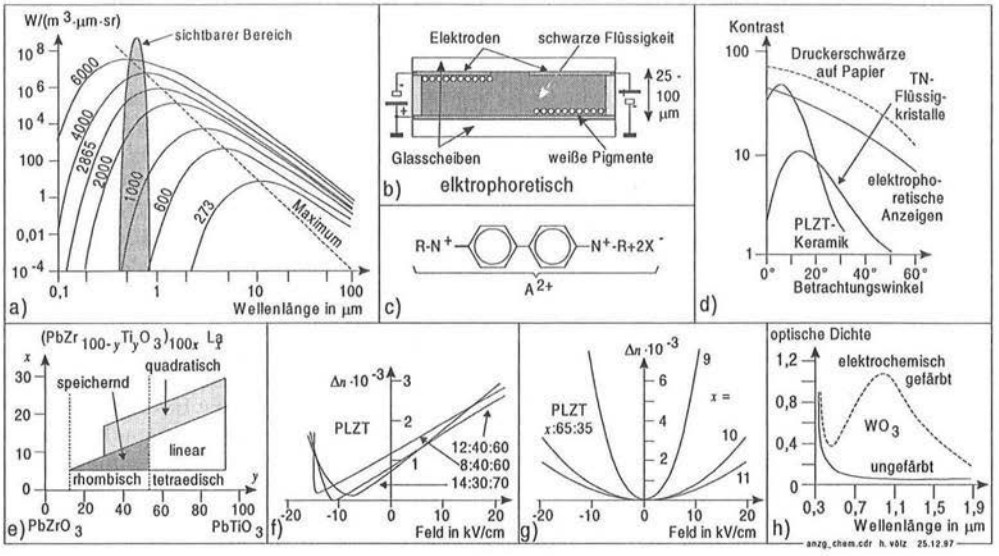


Bild 7.23 Elektrochemische und keramische Anzeigen

- die Nutzung chemischer Reaktionen und
- eine chemisch erzeugte Lichtstrahlung (Chemolumineszenz).

Hier wird nur eine kleine Auswahl beschrieben, z. B. läßt sich WO_3 mit H^+-Ionen blauviolett färben:

$$nH^+ + WO_3 + e^- \leftrightarrow H_n\,WO_3.$$

Die Absorptionskurven beider Wolframsubstanzen zeigt Bild 7.23h. Die Betriebsspannung muß größer als 0,5 V (ca. 500 V/cm) sein. Je Schaltzyklus sind $\approx$ 10 mW/cm^2 erforderlich. Als Elektrolyt wurde zunächst eine Mischung aus schwefliger Säure und Alkohol bzw. Schwefelsäure und Glycerin verwendet. Seit längerer Zeit sind auch feste Elektrolyte, z. B. Natrium-Aluminium-Keramik, möglich. Wird statt WO_3 Iridiumoxid verwendet, so sind sogar Grautöne bis schwarz möglich. Eine andere elektrochrome Anzeige nutzt Viologen gemäß Bild 7.23c. Dabei ist das Radikal R eine Alkylgruppe, wie z. B. C_7H_{15} und X^- ein Anion, z. B. Br^-. Das A^{2+}-Ion ist ungefärbt, das reduzierte A^+ dagegen tiefblau. Eine Anzeige nutzt dabei aus, daß beide Ionen große Lebensdauer besitzen und mittels Stromzufuhr reversibel ineinander überführbar sind. Dabei scheidet sich das A^+ als Farbfilm an der Kathode ab. Auch Silber-Natrium-Jodid ist geeignet. Es wird in organischen Lösungsmitteln, z. B. Methanol oder Azetonnitrid verwendet. Durch Elektrolyse wird eine dünne (ca. 5 nm) Silberschicht abgeschieden. Solche Anzeigen werden u. a. zur Überwachung der Betriebszeit von Geräten eingesetzt.

Den Aufbau eines **elektrophoretischen Displays** zeigt Bild 7.23b. In einer schwarzen Flüssigkeit befinden sich kleine weiße oder farbige Pigmentpartikeln mit weniger als 1 µm Durchmesser. Sie sind permanent elektrisch aufgeladen. Bei positiver Ladung lagern sie sich an der jeweils negativen Elektrode an, von der positiven werden sie abgestoßen. Die Oberfläche der Zelle erscheint dann entweder schwarz oder in der Farbe der Partikel. Während der Schaltzeit werden 20 bis 50 µW/cm^2 benötigt.

1967 gelang es G. Haertling, eine **transparente** Blei-Lanthan-Zirkonat-Titanat-**Keramik** (PLZT) herzustellen. Bei ihr lassen sich u. a. Doppelbrechung und Lichtstreuung durch ein elektrisches Feld verändern. Weiter existiert eine ferroelektrische Hysterese, so daß auch Speichern von Zuständen möglich ist. Die entsprechenden Gebiete zeigt Bild 7.23e. Beispiele für den linearen und quadratischen elektrooptischen Effekt zeigen Bild 7.23f und g. Vorteilhaft ist, daß diese Schichten auch sehr dünn durch Sputtern hergestellt werden können. Nur so sind hinreichend kleine Betriebsspannungen

möglich. Sehr günstig ist die Schaltzeit von nur wenigen µs. Den typischen Kontrastverlauf für elektrophoretische und keramische Anzeigen zeigt im Vergleich zur Druckerschwärze auf Papier und zu den einfachen TN-Flüssigkristallanzeigen Bild 7.23d.

Als letzte Variante seien noch die **magnetischen Flüssigkeiten** genannt. In einem Lösungsmittel sind feinstverteilte magnetische Partikel suspendiert. Unter dem Einfluß eines magnetischen Gradientenfeldes werden die Partikel dichter oder lockerer angeordnet. Für die Anzeige könnte die Hysterese des Materials im magnetischen Steuerkreis als Speichereffekt zusätzlich genutzt werden. Dennoch sind noch keine realisierten Anzeigen bekannt. Die praktische Bedeutung der magnetischen Flüssigkeiten liegt vielmehr bei der Sichtbarmachung von magnetisch gespeicherten Aufzeichnungen, bei magnetisch steuerbaren Kupplungen und bei den magnetischen Druckern (s. S. 280f).

7.8.11 Lichtleitfasern und dichroitische Folie

Zum Abschluß dieses Kapitels werden noch zwei Techniken kurz behandelt, die mehrfach erwähnt wurden, sich aber sonst nicht recht einordnen lassen. Das sind die Lichtleitfasern und die dichroitischen Folien.

Lichtleitfasern werden hauptsächlich für die Nachrichtenübertragung eingesetzt. Sie haben aber auch auf anderen Gebieten Bedeutung. Hierzu gehören u. a.:

- *Informationsübertragung* in|zwischen Geräten|Einrichtungen, bei denen es nicht sinnvoll, effektiv, zuverlässig oder zulässig ist, elektrische Leiter|Kabel zu verwenden, weil elektromagnetische Felder stören oder weil Potentialtrennungen erforderlich sind,
- *Lichttransport* an Stellen, wo die Unterbringung einer Lichtquelle, z. B. wegen ihres Volumens, ihrer Wärmeabstrahlung oder Auswechselbarkeit nicht möglich|günstig ist,
- *Abbildung von Objekten* mittels eines Faserbündels in Gebieten, wo andere Anwendungen zu groß oder nicht ausreichend anpassungsfähig sind, z. B. bei Magenspiegelungen in der Medizin,
- *Leistungsübertragung*, z. B. in der Chirurgie oder zur Materialbearbeitung.

Bei der klassischen Anwendung der Lichtleitfasern sind ihre Verluste durch Dämpfung wichtig. Sie gehorcht der Beziehung

$$V = e^{\alpha \cdot x}.$$

Dabei bedeuten V das Leistungsverhältnis für eine Strecke der Länge x und α die Absorptionskonstante (cm^{-1}). Für die praktische Anwendung ist der Dämpfungswert D besser geeignet:

$$D\ [dB/km] = 10^{-6} \cdot \alpha[cm^{-1}]/\log e \approx 2{,}3026 \cdot 10^{-6}\ \alpha[cm^{-1}].$$

Bei großen Entfernungen hat sich als Material ein spezielles Glas (SiO_2) und teilweise Natrium-Kalk-Glas durchgesetzt. Die typische Dämpfung des kompakten SiO_2 zeigt **Bild 7.24**a (umseitig). Die Absorptionsmaxima stammen von schwer zu beseitigenden OH-Anteilen. Die drei „Fenster" besitzen einerseits günstige Eigenschaften und andererseits gibt es hier preiswerte LED|Laser und Photoempfänger. Beim Dämpfungsminimum um 1,3 µm (Fenster II) werden heute mit optimalen Fasern etwa 0,3 dB/km und bei 1,55 µm (Fenster III) ca. 0,2 dB/km erreicht. Wie Bild 7.24e zeigt, liegt außerdem im Fenster III eine vorteilhaft geringe Dispersion (Änderung des Brechungsindex mit der Lichtwellenlänge) von nur 17 ps/nm/km vor. Mit Spezialfasern läßt sie sich sogar auf 1 ps/nm/km reduzieren. Dies ermöglicht extrem große Bandbreiten, die künftig bis zu 10 GBit/s reichen dürften.

Für die Anwendung über kurze Entfernungen kommen oft Kunststoffasern zum Einsatz. Hier sind die Fortschritte, wie der Vergleich von Bild 7.24d und c zeigt, besonders groß. Zur Leistungsübertragung werden u. a. Fasern aus Chloriden und Bromiden eingesetzt.

Das Grundprinzip einer Lichtleitfaser geht aus Bild 7.24b hervor. Ein Kern mit dem Brechungsindex n_2 ist von einem Mantelmaterial mit dem Brechungsindex n_1 mit $n_2 > n_1$ umgeben. Lichtwellen, die unter dem Grenzwinkel Θ (s. S. 142) auf die Wände des Kerns treffen, werden dort total reflektiert und damit im Kern fortgeleitet. Aus dem Winkel folgt die numerische Apertur N_a

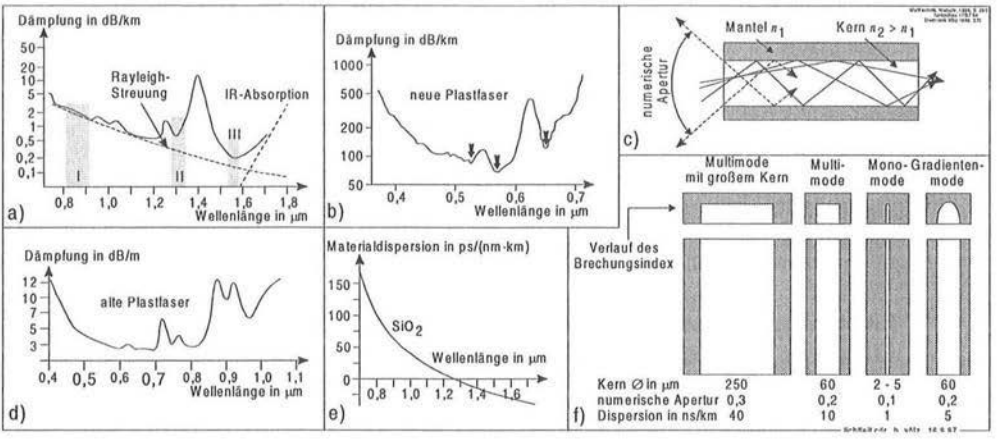


Bild 7.24 Eigenschaften und Aufbau von Lichtleitfasern

$$N_a = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right).$$

Ist sie größer, so ist das Licht leichter einzukoppeln. Nachteilig ist dann aber, daß die einzelnen Lichtstrahlen – wie auch im Bild ersichtlich – unterschiedlich lange Wege bis zum Ende der Faser durchlaufen. Hierdurch wird ein kurzer Lichtimpuls um die Zeit der Wegdifferenz der Lichtstrahlen verlängert. Das reduziert die Übertragungsbandbreite. Dieser Effekt heißt Modendispersion. Er tritt zusätzlich zur schon oben erwähnten Materialdispersion auf. Für die Länge L der Faser und mit der Lichtgeschwindigkeit c gilt

$$\Delta T = \frac{L}{c} \cdot \frac{n_2^2 - n_1^2}{2 \cdot n_2}.$$

Vier mögliche Faserarten zeigt Bild 7.24f mit einigen typischen Daten. Mit der Monomodenfaser – also kleiner Apertur – ist dicht an die theoretischen Werte heranzukommen. Die dickeren Fasern werden heute vor allem bei Kunststoff benutzt. Auch die Gradientenfaser weist sehr günstige Werte auf. Für sie muß der Brechungsindex kontinuierlich vom Kern nach außen zunehmen. Dadurch werden die Lichtstrahlen „weicher" zum Kern gelenkt. Es entsteht ein besseres Verhältnis von Apertur zu Laufzeitdifferenzen. Diese Faser war zunächst technologisch schwierig, ist heute aber Stand der Technik. Schließlich sei erwähnt, daß z. B. mit 0,5 mm dicken Fasern aus einem polykristallinen KBr, KCl, AgCl|TlBr bei einer Wellenlänge von 11 µm ohne Probleme 2 W übertragen werden können.

Dichroitische Folien dienen der Erzeugung von linear polarisiertem Licht. Sie werden aus *Kunststoff-Folien* durch eine einachsige Streckung erzeugt. Dabei orientieren sich die kettenförmigen Makromoleküle weitgehend parallel. Durch Zusatz von Jod werden die Folien leicht eingefärbt. Danach besitzen sie stark optisch anisotropes Verhalten. Sie absorbieren bevorzugt Licht einer Polarisationsrichtung. Bei hinreichender Dicke – meist deutlich unterhalb eines mm – wird vom gewöhnlichen Licht fast nur linear polarisiertes Licht durchgelassen (erheblich besser als 90%). Solche Polarisationsfilter haben vielfältige Anwendungen. Ein Beispiel sind die Flüssigkristallanzeigen (LCD).

8 Eingabetechniken

8.1 Eingabe und Interaktion

Technische Geräte können auf sehr vielfältige Weise gesteuert werden. Im Zusammenhang mit der Mensch-Technik-Schnittstelle sind jedoch vor allem die folgenden Eingabevarianten wichtig:

1. Mit unseren Händen, Fingern, Füßen usw. können wir Tasten, Knöpfe, Pedale, Schiebe- oder Drehregler betätigen bzw. speziell dazu hergerichtete Teile | Geräte | Einrichtungen, z. B. die Maus oder den Stift|Puck eines Digitalisierungstabletts, zielgerichtet bewegen.
2. Spezielle Einrichtungen, z. B. Kameras oder Sensoren, können aus der Bewegung unseres Körpers oder unserer Körperteile (Körper-, Kopfhaltung, Blickrichtung usw.) Signale ableiten, die als Eingabe wirken.
3. Mittels eines Mikrophons kann Sprache bzw. Gesang Aktionen des Systems auslösen.
4. Indirekte Eingaben, z. B. per Kamera oder Scanner, sie können menschliche Eingaben ersetzen. Auch sie lösen dann einen Bearbeitungsprozeß aus.

Für die Mensch-Technik-Schnittstelle sind weitere Möglichkeiten, wie Ereignisse aus der Umgebung des Systems, z. B. eine Änderung der Temperatur, wenig bedeutsam.

Bei den ersten drei Punkten ist zuweilen auch die Rückwirkung des Systems – also eine Interaktion mit dem System – zu beachten. Sie verbessert nicht selten die korrekte Eingabe und schafft neue Möglichkeiten, z. B. eine Erlebnisqualität. Für die obigen Eingabetechniken ist eine größere Anzahl spezifischer Geräte | Systeme entstanden und weitere entstehen ständig. Hierzu tragen gleichermaßen neue Forderungen und Bedürfnisse des Menschen und die zunehmende Leistungsfähigkeit der Technik bei. Trends solcher Entwicklungen sind kaum vorauszusehen. Deshalb wurden in den früheren Kapiteln, die sich weniger ändernden physikalisch-chemischen Grundlagen und die nahezu unabänderlichen physiologischen Gegebenheiten des Menschen behandelt. In diesem und den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Geräte und Techniken bezüglich ihres Aufbaus und ihrer Funktion beschrieben. Dies geschieht möglichst so, daß leicht Varianten und Weiterentwicklungen erkennbar sind. Eine Systematik ist dabei deutlich schwieriger als in den vorangegangenen Kapiteln. So werden heute z. B. die aktiven Eingaben vor allem mit der Tastatur und der Maus vorgenommen. Sie verlangen recht unterschiedliche Handlungen und lösen dennoch z. T. identische Funktionen im System aus. Daher ist es auch kaum verwunderlich, daß gleichartige Funktionen auch noch Trackball, Joystick, Lichtgriffel und Tablett auszulösen vermögen. All diese Fälle entstehen erst durch ein Zusammenwirken von Hard- und Software. Da in diesem Buch Software nicht behandelt wird, gehen hier die Beschreibungen nur bis zu den entsprechenden elektrischen Signalen. Teilweise wird sogar schon beim analogen Signal aufgehört. Die Kenntnis der Wirkungsweise des Analog-Digital-Wandlers wird also vorausgesetzt.

Der zweite Punkt entstand aus der Sicht, die Bedienung von Systemen einfacher und intuitiver zu gestalten. Der Umgang mit Tastatur, Maus, Tablett usw. ist schließlich anstrengend und teilweise sogar gesundheitsschädigend. Seit einigen Jahren erlangen die neuen Varianten auch immer mehr Bedeutung für Behinderte. Hierdurch wird ihnen oft erst der Umgang mit dem Computer ermöglicht. Auf einige, speziell für sie entwickelte Techniken wird zusätzlich noch im Abschnitt 8.8 eingegangen. Nicht behandelt werden indirekte Ableitungen, die durch Drüsenabsonderungen (Schweiß) oder mittels Sonden aus Nervenströmen usw. zu gewinnen sind. Hier sind nur recht spezielle, technische Einzellösungen und kaum eigentliche Geräte entstanden. Ihre Funktion wurde außerdem bereits bei den physiologischen Grundlagen behandelt.

Die sprachliche Eingabe wird – immer wieder seit Jahrzehnten – als hoch effektive und künftige Eingabe prognostiziert. Die Probleme sind jedoch so groß, daß eine riesige Rechenleistung erforderlich ist. Bis heute entstanden deshalb nur Teillösungen, die durch drei Einschränkungen gekennzeichnet sind: Sie sind sprecherabhängig, auf ein Sachgebiet begrenzt und | oder ermöglichen nur einen

begrenzten Wortschatz. Interessant ist gerade deshalb eine Lösung aus dem musikalischen Bereich. Durch Singen oder akustisches Einspielen ist es selbst mit recht einfachen Programmen möglich, sofort die Noten zu erstellen. Doch alle Lösungen dieser Art beruhen auf Software. Folglich können hier nur die Eigenschaften der Mikrophone und einige dazu gehörende Aufnahmeprobleme im Abschnitt 5.8 behandelt werden.

Die letzte Methode hat es ermöglicht, uns aufwendige, anstrengende Tätigkeiten, wie das Eintippen von Text oder das Zeichnen von Bildern, weitgehend abzunehmen. Eigentlich ist sie jedoch keine Eingabe durch uns. Daher spielt Interaktion auch eine Rolle. Wesentlicher ist die zugehörige Software, die hier aber nicht behandelt wird. Andererseits ist aber die spezifische Hardware so komplex und vielfältig, daß für sie eine umfangreiche Beschreibung erforderlich ist.

8.2 Tasten, Schalter und Regler

Aus Tasten, Schaltern und Reglern sind die komplexeren Tastaturen aufgebaut, die weiter unten behandelt werden. Sie sind besonders wichtige „elementare" Möglichkeiten zur Eingabe bei allen technischen Geräten. Wichtige Grundlagen und Eigenschaften von Tasten und Schaltern wurden bereits im Abschnitt 7.2 ab S. 95 behandelt. Offensichtlich werden sie allgemein als fundamental betrachtet. Anders ist es wohl kaum verständlich, warum sie in der Bedienungsoberfläche von der Software möglichst anschaulich nachgebildet werden. Denn eigentlich realisieren Tasten und Schalter logische Funktionen, die in der Wissenschaft doch deutlich anders beschrieben werden. Schiebe- bzw. Drehregler sind dagegen analoge Bauelemente, die einen Zahlenwert repräsentieren. Auch sie werden von der Software möglichst anschaulich nachgebildet. Doch vielfach wird hier der Zahlenwert bereits ergänzend verwendet. Hier kann nicht die Frage beantwortet werden, ob Tasten, Schalter und Regler wirklich fundamental sind bzw. bleiben werden. Wahrscheinlich sind sie eine „Kulturerscheinung", die mit der Sozialisierung erworben wird und sich daher langfristig auch verändern kann. Ihre typischen, funktionellen Eigenschaften können folgendermaßen beschrieben werden:

- Eine **Taste** wird durch Drücken betätigt. Solange sie gedrückt wird, ist ein Kontakt geschlossen. Beim Loslassen öffnet er sich wieder. Eine „gute" Taste hat einen deutlich fühlbaren Druckpunkt, ab dem der Kontakt schließt. Einrastende Tasten (in der Software u. a. „einrastende" Pictogrammflächen), gehören bereits zu den Schaltern. Sie bleiben beim ersten Drücken (sichtbar, fühlbar) vertieft stehen und halten den Kontakt geschlossen. Nach einem zweiten Drücken gehen sie in die Ruhestellung zurück und öffnen den Kontakt wieder. Bei allen Tastenvarianten kann auch Öffnen und Schließen vertauscht sein.
- Ein **Schalter** wird ähnlich wie eine einrastende Taste in zwei oder auch mehrere Stellungen gebracht. Das kann durch Drücken, Kippen, Verschieben oder Drehen erfolgen. In der Regel ist jede Einstellung nur durch genau festgelegte Bewegung in eine neue Position zu bringen. Dadurch ist der Schalter zugleich komplizierter und eindeutiger als eine einrastende Taste zu betätigen. Man „weiß" also intuitiv, wohin man den Schalter bewegen will oder bewegt hat.
- Bei **Reglern** müßte eigentlich von *Stellern* gesprochen werden. *Einstellregler* ist dagegen zumindest sprachlich falsch. Sie besitzen im Gegensatz zu den Tasten und Schaltern keine diskreten Stellungen, sondern lassen sich kontinuierlich verstellen | einstellen. Jede gerade eingestellte Position – sie entspricht einem Zahlenwert – bleibt bis zur nächsten Verstellung erhalten. Es werden allgemein Dreh- und Schieberegler unterschieden. Ursprünglich gab es nur Drehregler, z. B. als Potentiometer oder Sendereinstellungen der Rundfunktechnik. Schieberegler entstanden zunächst in der Studiotechnik der 40er Jahre und zogen dann in den 60er Jahren in die Heimelektronik ein. Sie wurden also relativ spät zum „Kulturgut". Auf der Bedienungsoberfläche von Programmen sind sie dagegen *der* Standard für kontinuierliche Eingaben. Der Drehregler ist mit der Maus oder der Tastatur nicht „einfach" zu bedienen. Unabhängig davon und ohne ersichtliche, sachliche Gründe ist er inzwischen sogar bei fast allen technischen Geräten verschwunden. Dennoch ist er zumindest meist viel genauer einstellbar. Außerdem kann die Genauigkeit zusätzlich durch mehrere Umdrehungen erhöht werden. Das wird u. a. bei hochgenauen Wendelpotentiometern in Meßgeräten genutzt.

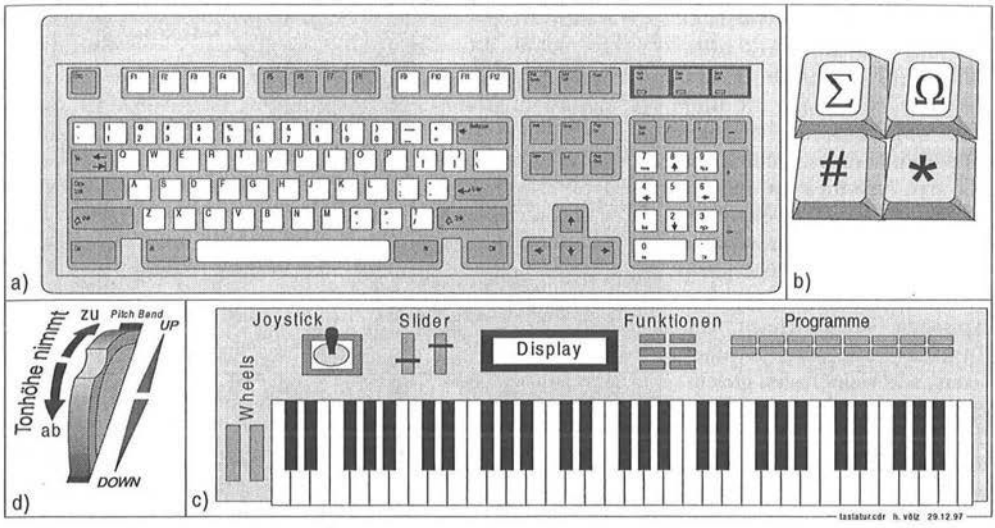


Bild 8.1 Tastaturen für Texteingabe und für Musikerzeugung

Die übliche (Computer-) Tastatur ist eine genau definierte Zusammenfassung von Einzeltasten. Im Englischen heißt sie *Keyboard*, wörtlich übersetzt also Schlüsselbrett. In der Technik gibt es vor allem drei typische Keyboards: 1. die Tastatur eines Computers, 2. die Klaviatur eines Tasten-Musik-Instruments, 3. wird im Bereich der elektronischen Musik auch das ganze elektronische Musikinstrument, also z. B. ein Synthesizer, als Keyboard bezeichnet.

Die **übliche Tastatur (Bild 8.1**a) ist so ausgelegt, daß eigentlich nur eine Taste zur gleichen Zeit betätigt werden darf. Doppel- oder Mehrfachbetätigungen werden je nach Software ignoriert oder als zeitliche Abfolge interpretiert (Scanvorgang des Tastatur-Controllers). Wegen der verfügbaren Fläche und der mnemotechnischen Übersichtlichkeit kann die Anzahl der Tasten auf der Tastatur nicht beliebig erweitert werden. Daher entstanden Zusatzeinrichtungen, welche wie ein Umschalter wirken. Beim Computer sind es u. a. die Tasten „Shift", „Ctrl" und „Alt". Solange sie zusätzlich niedergedrückt gehalten werden, liegt eine andere Belegung der Tasten vor. Es werden veränderte Signale erzeugt. Doch es gibt auch schalterähnliche Tasten, z. B. die „feststellbaren" Shift-, Einfüge- und Numerik-Tasten. Auf den meisten Tastaturen ist jedoch nicht (unmittelbar) erkennbar, in welcher Position sie sich gerade befinden. Hierzu sind gesonderte Anzeigen notwendig. Teilweise erfolgen sie auf dem Bildschirm. Bei der fixen Shift-Taste ist darüber hinaus das Zurücknehmen auch nur mit einer normalen Shift-Taste möglich. Weiter enthält die übliche Tastatur neben den „eigentlichen" ASCII-Tasten auch vielfältige Zusatztasten, wie die F-Tasten, das Cursorfeld und den Ziffernblock. Sie funktionieren zwar genauso wie die ASCII-Tasten, lösen z. T. aber höchst komplexe Funktionen aus. So leiten z. B. die „Print Screen"-Taste gemäß ihrer Bezeichnung den Bildschirminhalt zum Drucker. Aber unter Windows wird er nur noch als Datei in die Zwischenablage kopiert. Die genannten und viele andere Schwierigkeiten führten schon Ende der 80er Jahre zu den u. a. von Siemens produzierten Tastaturen mit zusätzlicher LCD-Anzeige. Der Ausschnitt von Bild 8.1b zeigt unten zwei fest bedruckte, also unveränderliche Tasten. Oben sind zwei Tasten mit LCD-Feld. Sie zeigen durch die Programmierung die gerade aktive Belegung an. Solche Tastaturen haben aber keine praktische Bedeutung erlangt. Die Ursache – Preis oder Versagen des Management – ist nicht klar [NN12]. Die Summe dieser Fakten und ihre Inkonsequenzen zeigen aber deutlich, wieweit bei der Mensch-Maschine-Schnittstelle historisch gewachsene Erscheinungen langfristig Bestand haben. Nur völlig neue Techniken bieten freie Gestaltungsräume. Gerade hier entstehen dann aber meist (über-) schnell geschaffene und oft kaum durchdachte Lösungen.

Die **Tastatur** zur **Musikerzeugung** weicht, trotz ähnlicher Funktion, erheblich von der üblichen Tastatur ab. Bild 8.1c zeigt dies am Beispiel eines Synthesizers. Doch nicht nur das Aussehen ist anders. Da Musik vielstimmig ist, besteht auch die Notwendigkeit der Mehrfachbetätigung von Tasten. Es ist sogar ein typisches Kennzeichnen der Tastatur bzw. des Synthesizers, wie viele Tasten gleichzeitig betätigt werden dürfen, d. h. hier elektronisch erfaßt werden. Darüber hinaus ist es wichtig, wie stark eine Taste angeschlagen wird. Dadurch wird nämlich die Lautstärke des zugehörigen Tones bestimmt. Der Aufwand dafür muß getrennt für jede Taste betrieben werden. Deshalb wurde das Prinzip der Anschlagsdynamik entwickelt. Hierbei hat jede Taste zwei Kontakte, die bei unterschiedlichem Hub schließen. Aus der Zeitdifferenz ihrer Kontaktgabe wird die Lautstärke berechnet. Doch damit ist für kommerzielle Tastaturen noch nicht das Qualitätsende erreicht. Es soll auch die gleiche subjektive Empfindung entstehen, die man an einem „richtigen" Flügel hat. Also werden Massen hinzugefügt, die interaktiv dieses Gefühl erzeugen. Das „Original" ist also auch hier der historisch gewordene Konzertflügel.

Bild 8.2 Oskar Sala am Mixtur-Trautonium aus [WIN], S.107

Der Synthesizer ermöglichte es sehr früh, völlig andersartige Klänge als mit dem Konzertflügel zu erzeugen. Zunächst imitierten sie nur andere Musikinstrumente. Hierzu mußten allerdings neue Tasten und Regler eingebaut werden. Verwunderlich ist dabei nur, daß hier nicht auf die Traditionen der entsprechenden Registrierung des Orgel- und Cembalobaues zurückgegriffen wurde. Dies wird noch erstaunlicher, wenn man sich das erste „wirkliche" elektronische Instrument, das Trautonium von 1928 anschaut. **Bild 8.2** zeigt es mit seinem einzigen Spieler Oskar Sala. Für dieses Instrument wurden viele Kompositionen von bedeutenden Komponisten, u. a. von P. Dessau, P. Hindemith, A. Honegger und C. Orff geschrieben. Durch Erzeugung von Subharmonischen hat es einen noch heute typischen Klang. Mit ihm wurden auch viele Geräusche erzeugt, z. B. zu Hitchcocks „Vögel" und die Sphärenklänge zum „Faust" des Deutschen Theaters. Für heutige elektronische Instrumente hat sich dennoch die Grundstruktur von Bild 8.1c herausgebildet (warum wohl?). Es gibt z. B. Slider (Schieberegler) für Lautstärke und Hall. Es gibt einrastende Tasten für Klänge, für abrufbare Rhythmen, für Transponieren usw. Es gibt fast immer zumindest einen Drehregler, das „Pitch Bend" (Bild 8.1d). Mit ihm kann die Tonhöhe gleitend verschoben werden. Also das, was ein Sänger oder Violinspieler als Glissando realisiert (ist auch beim Trautonium möglich). So etwas ist ja bei den üblichen Tasteninstrumenten nicht möglich. Als Besonderheit geht dieser Drehregler (Rad) beim Loslassen automatisch in seine, zusätzlich gekennzeichnete Grundstellung zurück.

8.3 Die Maus und Verwandtes

Um 1963 entwickelte Douglas Engelbart vom Stanford Research Institute den ersten Prototyp einer Maus. Sie wurde ab 1968 für die graphische Oberfläche beim Rechner „FLEX" des Augmentation Research Center benutzt. Ab 1973 erfolgte dann die Weiterentwicklung beim Palo Alto Research Center (PARC) von XEROX im Zusammenhang mit der grafischen Benutzeroberfläche durch Alan

Kay. 1975 entwickelt Hawley am Stanford Institut die Maus weiter. 1983 bringt Apple seinen ersten Rechner mit Maus heraus. Erste Breitenwirkung erreicht sie 1984 mit dem Macintosh-Rechner. Zwar kündigte bereits 1982 Microsoft sein Windows an und bringt auch 1983 eine Steckkarte für die Maus heraus, doch erst Ende 1985 erschien eine Erkundungsversion von Windows. Ab 1984 ist die Maus dann unter DOS verfügbar. Der eigentliche Durchbruch für sie begann jedoch erst mit dem ab Mai 1990 verfügbaren Windows 3.0. Es ist schon erstaunlich, daß ein so zögerlich eingeführtes Instrument heute nicht mehr fortzudenken ist. Ohne sie geht heute auf einem Rechner fast nichts mehr. Darüber hinaus sind alle „Weiterentwicklungen" (sie werden im nächsten Abschnitt behandelt) kaum imstande, sie zu ersetzen. Allenfalls stellen sie zusätzliche Leistungen bereit. Was ist nun das besondere an der Maus? Wahrscheinlich liegt es in der Kombination von zwei Informationsarten, die mit ihr eingegeben werden:

1. Sie ermöglicht eine Bewegung, die analog mit der Fläche des Bildschirms gekoppelt ist und auch dort erscheint. Man lernt so – ähnlich wie am Lenkrad des Autos – sich intuitiv auf dem Bildschirm zu bewegen.
2. Mit der oder den Tasten der Maus kann man Aktionen einleiten, die Positionen auf dem Bildschirm zugeordnet sind.

Vor der Maus geschah die Bedienung über spezielle Tasten, über einzugebende Befehle oder über zu durchlaufende Menüs. Dies existiert zusätzlich meist immer noch, ist jedoch weitaus weniger unmittelbar einsichtig. Andererseits ist mit dem Tastaturbefehl – sofern man ihn auswendig kennt – die ausgewählte Aktion extrem schnell auszulösen. Mit der Maus ist dagegen erst die entsprechende Position anzufahren und dann dort die Maustaste zu betätigen. Der obige zweite Punkt wiederholt also eigentlich nur das, was schon bei der Tastatur besprochen wurde. Das zusätzliche intuitive Erfassen des Befehls bedeutet höchstens für den Anfänger einen Fortschritt. Die eine Taste erlangt allerdings durch die Bewegung der Maus (1. Punkt) eine gewaltig gesteigerte Befehlsvielfalt. Aus dieser Sicht ist die Maus also das genaue Gegenteil der reinen Tastatur: Es gibt *nicht* eigene Tasten für jede Funktion, *sondern* nur eine einzige Taste, der aber alle Aktionen lokal über den Bildschirm zugewiesen werden. Folglich hätte die oben erwähnte LCD-Tastatur eine Stellung zwischen diesen Extremen einnehmen können. Der eigentliche Gewinn kann also nicht einzeln von den beiden obigen Punkten herrühren. Erst ihre Kombination – das Ganze ist eben mehr als die Summe der Teile – bringt die neue Qualität: Der Bildschirm wird als graphische Fläche handhabbar. Dies wird dann besonders deutlich, wenn man die wesentlichen Funktionen der Maus auflistet:

- Ein **Führen** der Maus ermöglicht | bewirkt eine analoge Bewegung des speziellen Mauscursors auf dem Bildschirm (entspricht 1.). Man „glaubt" den Mauscursor direkt zu bewegen. Man kann ihn so mühelos und recht präzise an jede Stelle des Bildschirms setzen. In einigen Fällen, z. B. bei der Textverarbeitung ist es wichtig, daß Mauscursor und Eingabecursor getrennt existieren. Daher hat der Mauscursor auch ein besonderes Aussehen, z. B. als kleiner Pfeil.
- Das **Klicken** bedeutet ein kurzzeitiges Niederdrücken einer | der Maustaste, die dabei ähnlich wie eine Tastenbetätigung wirkt (entspricht 2.). Meist wird dazu zuvor der Mauscursor auf eine kleine Bildfläche (Symbol | Icon) geführt, die einen intuitiv einsichtigen Hinweis auf die hier auszulösende Aktion vermittelt.
- Das **Anklicken** betrifft ein beliebiges Objekt auf dem Bildschirm (z. B. Bild, Pictogramm oder Text). Dieses Objekt wird dadurch ausgewählt | aktiviert | markiert. Um die Auswahl kenntlich zu machen, wird das Objekt dann meist etwas anders dargestellt, z. B. negiert, farblich verändert oder scheinbar räumlich heraustretend. Die Auswahl kann sowohl nach dem Klick bestehen bleiben als auch nur solange existieren, wie die Maustaste niedergedrückt ist.
- Ein **Doppelklick** entspricht zwei kurz aufeinanderfolgenden Klicken mit der Maustaste. Der Abstand zwischen ihnen ist den Gewohnheiten des Bedienenden meist gut anpaßbar. Der Doppelklick ist eigentlich auch nur ein Tastaturbefehl, jedoch mit zusätzlicher Sicherheit. Er kann so interpretiert werden. Der erste Klick aktiviert das Befehlsfeld (ist also ein Anklicken). Der zweite löst dann den Befehl aus. In neueren Oberflächen erfolgt die Aktivierung bereits dann, wenn der Mauscursor das Icon erreicht. Es kommt dann scheinbar hervor und nun kann mit einem

Klick der Befehl ausgelöst werden. Der Doppelklick ist also nur eine andere Art, etwas auszulösen und entspricht damit auch 1.

- Von **Ziehen** (drag and drop) wird dann gesprochen, wenn man ein Objekt anklickt, die Taste gedrückt hält und dann das Objekt mit gedrückter Maustaste auf dem Bildschirm bewegt. Durch Loslassen der gedrückten Maustaste wird das Objekt an der erreichten Stelle des Bildschirmes ablegt. Damit man weiß, ob man das Objekt erfaßt hat, wird es beim Bewegen meist sichtbar gekennzeichnet | markiert | überwiegend negativ dargestellt. Manchmal erscheint es bei der Bewegung nur als Umriß. Zum Ziehen gehört übrigens auch das Bewegen eines Schiebereglers. Dazu wird sein Knopf angeklickt und dann auf die gewünschte Position verschoben.
- Auch **Zeichnen** oder **Schreiben** kann man mit der Maus. Hierfür gibt es *viele* Varianten. Hier nur *ein* Beispiel: Dazu wird der Maus zunächst eine Farbe und Strichstärke, z. B. durch Anklicken der Parameter zugewiesen. Dann wird irgendwo auf dem Bildschirm begonnen, indem die Taste niedergedrückt wird. Dort, wo die Maus so bewegt wird, hinterläßt sie einen Strich.

Anklicken, Ziehen und Schreiben sind also Aktionen, die kein Pendant bei der Tastatur haben. Sie sind die neue Qualität der Maus und kombinieren die beiden o. g. Informationsarten. Sie machen den Bildschirm zum graphischen Terminal.

8.3.1 Aufbau der Maus

Die entscheidende Baugruppe einer üblichen Maus zeigt **Bild 8.3**a. Die Kugel besitzt einen Durchmesser von 1 - 2 cm. Meist besteht sie aus einem Stahlkern, der mit Gummi überzogen ist. Die Masse und der Reibungskoeffizient bewirken so eine gute Haftung auf der Unterlage, verhindern also ein Gleiten der Kugel. Daher dreht sie sich entsprechend der Bewegung der Maus. Aus ihrer Drehung werden zwei Richtungskomponenten abgeleitet. Hierzu dienen die beiden um 90° versetzen Achsen. Damit die Kugel bei ihrer Drehung diese Achsen einwandfrei mitnimmt, existiert gemäß Bild 8.3c eine diagonal angeordnete Rolle. Mit einer Feder drückt sie die Kugel gegen die beiden Achsen. So werden auch Höhenunterschiede in der Lage der Kugel ausgeglichen. Die Kugel muß ja Unebenheiten der Unterlage folgen und ändert dabei die Angriffspunkte der Achsen. Mit diesem Mechanismus werden also die x- und y-Richtung der Bewegung getrennt. Jede Achse besitzt eine Lochscheibe, die von Lichtschranken abgetastet wird. Jede Drehung bewirkt Lichtimpulse, die in elektrische Impulse umwandelt werden. Aus diesen Signalen muß sowohl die Drehrichtung als auch der zurückgelegte Weg bestimmt werden. Um den Drehsinn zu ermitteln, gehören zu jeder Lochscheibe zwei Lichtschranken, die etwa um ein Viertel des Lochabstandes versetzt sind. Dadurch entstehen Impulse gemäß Bild 8.3b. Wird ein Signal als Bezugswert gewählt, so entspricht der zeitliche Versatz des zweiten Signals der Richtung. Der zurückgelegte Weg ergibt sich aus der Zählung der Impulse. Die Übersetzung von der Kugel zum Achsdurchmesser und die Anzahl der Löcher bestimmen die physikalische Auflösung der Maus. Gebräuchlich sind 200 bis 600 dpi (dot per inch), also 7 bis 25 Impulse je mm. Bei vielen Mäusen lassen sich durch Schalter an der Maus oder per Software hieraus unterschiedliche Betriebsvarianten, d. h. virtuelle Auflösungen der Maus einstellen:

- *normal.* Es wird die physikalische Auflösung verwendet.
- *fein.* Die virtuelle Auflösung wird erhöht. Für den gleichen Weg auf dem Bildschirm ist eine größere Bewegung der Maus erforderlich. Hierdurch erreicht man eine höhere Genauigkeit der Positionierung auf dem Bildschirm.
- *dynamisch.* Zunächst wird die Geschwindigkeit der Mausbewegung aus der Impulsdichte bestimmt. Dieser Wert verändert dann die virtuelle Auflösung. Eine schnelle Bewegung erzeugt eine geringere Auflösung als eine langsame. So kann man mit langsamen Bewegungen den Mauscursor sehr genau positionieren und mit kleinen aber schnellen Bewegungen mühelos entfernte Orte ungefähr erreichen.

Das äußere Aussehen einer Maus kann heute sehr unterschiedlich sein. Das Spektrum reicht von der Luxusausführung bis zur Billigstvariante, von ergonomisch bis exotisch, von oval über rund bis einseitig zugespitzt, von einer bis zu drei Tasten usw. Eine typische Form zeigt Bild 8.3 f. Die Kugel

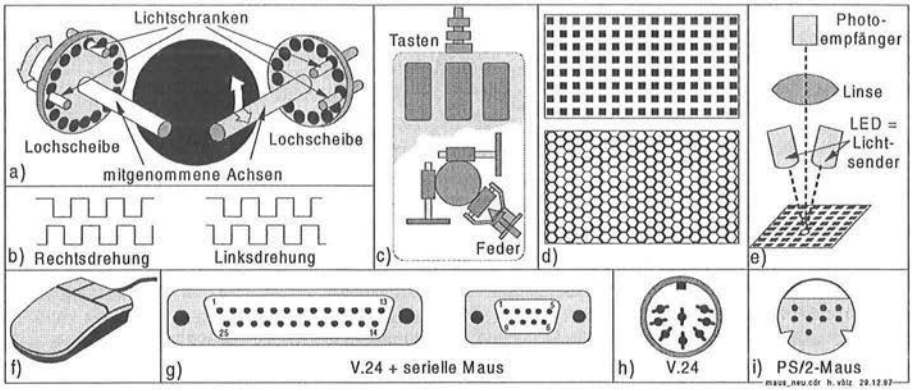


Bild 8.3 Aufbau und Anschlüsse der opto-mechanischen und rein optischen Maus

sollte sich möglichst in der Nähe des Schwerpunktes der Maus befinden. Für den Rechneranschluß der Maus wird meist eine serielle Schnittstelle (RS 232 bzw. V.24) verwendet, die auch die Betriebsspannung der Maus liefert (Bild 8.2g bis i). Etwas abweichend ist die Beschaltung der PS/2-Maus, wie sie von IBM eingeführt wurde, heute jedoch von fast jedem PC durch einen speziellen Port unterstützt wird. Völlig abweichend wird die Busmaus betrieben. Hier wird nicht ein einziges serielles Signal übertragen. Die *x*- und *y*-Werte sowie die Tastenaktionen werden vielmehr auf getrennten Leitungen an eine spezielle Steckkarte, die den Systembus nutzt, weitergeleitet und dort ausgewertet.

Im Prinzip kann die Maus auf jeder ebenen, nicht zu glatten Unterlage verwendet werden. In der Praxis hat sich jedoch das *Mauspad* – z. T. schon als Kultobjekt – durchgesetzt (Pad = Polster, Schreibblock). Meist handelt es sich dabei um ein leicht aufgerauhtes und versiegeltes Gewebe auf einem Unterboden aus Schaumstoff. Eigentlich sollte es nur die Mitnahme der Kugel verbessern und ein angenehmes Gefühl für die Hand vermitteln. Vielfach hat es leider auch nachteilige Eigenschaften. Es zieht nämlich elektrostatisch Staub an und bringt ihn dann auf die Kugel. Sie muß dadurch öfter gründlich gereinigt werden. Am besten erfolgt das in fließendem Wasser.

Bisher wurde das mechano-optische Prinzip der Impulserzeugung beschrieben. Die ursprünglichen elektromechanischen Kontakte gibt es heute praktisch nicht mehr. Bedeutsamer ist die rein optische Maus. Sie enthält keine bewegten Bauteile, also insbesondere keine Kugel. Sie verlangt jedoch ein spezielles Mauspad, das gut reflektiert und aufgedruckte feine Strukturen besitzt (Bild 8.3d). Im Boden der Maus senden zwei infrarote LED periodische Lichtimpulse aus (Bild 8.3e). Je nach ihrer Position bezüglich der Strukturen auf dem Mauspad werden sie unterschiedlich stark zum Photoempfänger reflektiert. Bei einer Bewegung der Maus entstehen daher Impulse, die ähnlich wie bei der mechano-optischen Maus ausgewertet werden können. Vorteilhaft ist die große Robustheit und die geringere Verschmutzungsgefahr. Nachteilig ist jedoch das spezielle Mauspad. In seltenen Fällen neigt die rein optische Maus zum periodischen Wackeln des Cursors. Es gibt also Positionen, die nicht ganz eindeutig sind.

8.3.2 Mausähnliche Eingaben

Wie oben deutlich gemacht wurde, ist die Maus eine praktisch perfekte Lösung für graphische Oberflächen und Anwendungen. Was kann/muß an ihr noch verbessert werden? Was kann sie nicht leisten oder wo bringt sie Probleme? Nur in solchen Fällen besteht eine Notwendigkeit zur Ergänzung oder Änderung. Offensichtlich ist so etwas nur bei zwei Anwendungen der Fall:

1. Bei kleinen *transportablen Rechnern* (Laptop usw.) bedeutet die Maus ein zusätzlich mitzunehmendes Gerät. Außerdem ist bei ihrem Betrieb oft keine ausreichende und glatte Fläche für die Bewegung der Maus vorhanden.

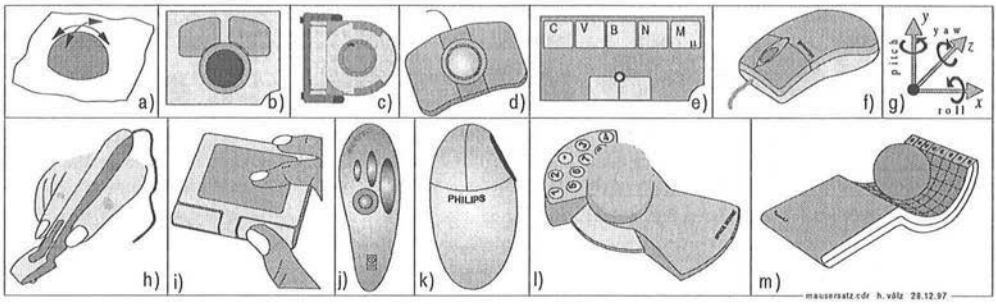


Bild 8.4 Ersatz für die Maus und Erweiterungen der Mausfunktionen

2. Es sind einige zusätzliche Funktionen erwünscht, die zu technischen Ergänzungen führen. So fügte Microsoft 1996 mit der *„Intellimouse"* **(Bild 8.4f)** ein zusätzliches Rad ein, daß zum Scrollen unter Windows 95 dient. Diese Lösung führte auch bei anderen Herstellern zu äquivalenten oder gar noch mehr erweiterten Lösungen.
3. Bei einigen Anwendungen, z. B. im CAD-Bereich oder bei Animationen, ist eine *dreidimensionale* Datenerfassung oder -steuerung notwendig. Dann sind die 6 Freiheitsgrade gemäß Bild 8.4i notwendig.

Historisch gesehen gab es im CAD-Bereich unabhängig von der Maus schon recht früh den „Trackball", auch Rollkugel genannt (Bild 8.4a). Er kann als umgekehrte Maus verstanden werden. Die Kugel zeigt nach oben und wird mit dem Zeigefinger oder der aufgelegten flachen Hand bewegt. Aus entstanden mehrere Varianten für tragbare Rechner (Bild 8.4b bis d). Sie erhielten aber zusätzlich zwei Tasten. Eine Variante ist vor der Tastatur im Rechner fest eingebaut. Ein zweite (Bild 8.4c) wird am Rechner befestigt. Die dritte Variante wird neben den Rechner gestellt (Bild 8.4d). Sie hat nur noch den Vorteil, keinen Pad zu benötigen. Deutlich anders funktioniert die Pen-Mouse (bzw. Maus-Pen) von Bild 8.4h. Hier befindet sich die Kugel vorn an der „Spitze". Sie kann ähnlich einem Kugelschreiber auf allen möglichen, selbst kleinsten, nicht ebenen Flächen benutzt werden. Eine noch stärker abweichende Lösung hat IBM versucht. Zwischen den Tasten ist ein kleiner Stick angeordnet (Bild 8.4 e). Er funktioniert ähnlich wie ein Joystick (s. S. 157). Eine Auslenkung zu irgendeiner Seite bewegt den Cursor in die entsprechende Richtung und zwar, je nach dem Grad der Auslenkung, unterschiedlich schnell. Der Glidepoint von Bild 8.4i entspricht einem verkleinerten Digitizer (s. S. 159ff). Er besitzt eine druckempfindliche Fläche. Sie wird mit dem Finger berührt. Die Bewegung des Fingers bewegt analog den Cursor auf dem Bildschirm. Mit den zusätzlichen Tasten können wieder die entsprechenden Mausfunktionen ausgelöst werden. In einigen Varianten kann das auch durch kurzen zusätzlichen Druck auf die Fläche bewirkt werden. Einige Varianten des Glidepoints sind auch in Laptops vor der Tastatur integriert worden. Diese Aufzählung der Mausvarianten für transportable Rechner ist natürlich nicht vollständig. Alle Beispiele demonstrieren eigentlich nur die Unentbehrlichkeit der Maus, selbst dann, wenn es für sie keine direkte Benutzungsmöglichkeit mehr gibt.

Einige Anwender hat an der Maus offensichtlich das Kabel (das sie kennzeichnende Schwänzchen) gestört. So entstanden batteriebetriebene Sonderlösungen. Sie übertragen die Maussignale mit Ultraschall, Infrarotlicht oder Hochfrequenz an einen besonderen Empfänger, der wieder mit der seriellen Schnittstelle oder dem PS/2-Anschluß verbunden wird. In der Praxis macht sich jedoch oft die begrenzte Betriebszeit der Batterie störend bemerkbar. Bei umfangreicher Benutzung garantiert auch eine automatische Ladestation am Computer nicht beständige Betriebssicherheit.

Sobald jemand im 3D-Bereich – u. a. mit CAD oder virtueller Realität – arbeitet, macht sich die begrenzte Zahl der Freiheitsgrade unangenehm bemerkbar. Dies gilt für die typische Maus und alle bisher behandelten Varianten. Dann sind nämlich die 6 Freiheitsgrade von Bild 8.4g – drei direktionale der linearen Bewegung und drei rotationale – notwendig. Die übliche Maus beherrscht ja nur die zwei direktionalen der x- und y-Bewegung. Deshalb wird oft zeitweilig mittels zusätzlicher Tasten

oder per Software die *x*- und / oder *y*-Bewegung auf andere Freiheitsgrade umgeschaltet. Darüber hinaus sind viele andere Einzellösungen ohne Breitenanwendung entstanden. Hier können nur wenige Beispiele – ohne Bewertung der Leistungsfähigkeit oder des Marktvolumens – kurz erwähnt werden. Im frei beweglichen *Surfman* von Bild 8.4j ist zusätzlich ein Trackball integriert. Der *3D-Pointer* (Bild 8.4k) besitzt einen Kreiselkompaß, über den jede freie Bewegung im Raum erfaßbar wird. Er reagiert auch teilweise auf Drehungen. Am leistungsfähigsten sind die in der Funktion fast identischen Geräte *Spacemaus* (Bild 8.4l) und *Spaceball* (Bild 8.4m). Der flache Zylinder bzw. die Kugel kann in alle drei Richtungen verbogen und verdrillt werden und so alle sechs Freiheitsgrade erfassen. Die Intensität des Verschiebens bzw. Verdrallens bestimmt die zugehörige Änderungsgeschwindigkeit. Die interne Erfassung der Bewegungen erfolgt über Leuchtdioden und Photosensoren. Beide Systeme werden jedoch nur im CAD-Bereich und vor allem von Workstations unterstützt. Da sie recht teuer sind und kaum von Spielen unterstützt werden, hat sie keine Breitenanwendung erlangt. Im Prinzip könnten hier auch noch Varianten zur Positionsbestimmung von Menschen (Bewegungskontrolle) und von Objekten eingeordnet werden. So gibt es eine mausähnliche Anwendung, welche drei Ultraschallsensoren am Bildschirm benötigt. Diese Eingaben werden zusammenhängend im Abschnitt 8.4.3 ab S. 163 behandelt.

Abschließend sei bezüglich der direkten Mausvarianten noch erwähnt, daß es seit kurzem eine Ausführung gibt, die durch *motorische Aktivität* fühlbare Rückmeldungen zu den Fingern liefert. Ob sich hier eine neue, allgemein genutzte Qualität entwickelt, ist noch nicht abzusehen.

8.3.3 Gameport und Joystick

Den ursprünglichen Joystick zeigt **Bild 8.5**a. Er wird auch Paddel oder Steuerknüppel genannt. Er entstand mit 8-Bit-Rechentechnik (Amiga und Atari) und den Videospielen. Daher ist er praktisch so alt wie die Maus. Seine Funktion entspricht einer Kombination folgender Tasten der Tastatur: up, down, left, right und Enter, „↑ ↓ ← → ↵", also den vier Richtungstasten und dem Eingabebefehl. Die Richtungstasten sind in einem, relativ frei beweglichem Hebel zusammengefaßt: Je nach seiner Bewegung schließt er einen oder zwei der vier Kontakte (Bild 8.5b). Einen möglichen internen Aufbau zeigt Bild 8.5d. Die Eingabetaste heißt bei ihm Feuerknopf. Neben dieser diskreten existiert eine analoge Variante. Hier werden über den „Knüppel" bzw. Griff zwei Potentiometer in beide Richtungen verstellt. Dies erfolgt z. B. mit einem Mechanismus, wie ihn Bild 8.5e zeigt. Der zugehörige Gameport-Controller ist heute universell verfügbar. Er wird auch für andere Anwendungen, u. a. gemeinsam mit dem MIDI-Port, benutzt. Er wertet den Widerstandswert jedes Potentiometers über die Zeitkonstante aus (Bild 8.5f). Dabei wird über den veränderlichen Widerstand und einen in Reihe geschalteten Begrenzungswiderstand eine Kapazität aufgeladen. Per Software wird sie in periodischen Abständen kurz geschlossen. Sobald die Spannung danach eine Schwelle *S* erreicht hat, schaltet der Operationsverstärker OV. Damit liegt an seinem Ausgang ein Rechteckimpuls mit der zeitlichen Länge *T* vor: sie kann leicht digital ausgewertet werden. Dieses Prinzip ist bis heute im wesentlichen erhalten. Natürlich sind die Joysticks wesentlich „vornehmer" und robuster geworden. Bei den Spielen, für die sie hauptsächlich benutzt werden, geht es ja meist um (aggressive) Aktionen (Schießen). Dazu ist der Handgriff des Hebels paßgerecht geformt. Der oder die Feuerknöpfe sind ergonomisch gut zugänglich usw. Die Ausführungsformen sind jedoch äußerst vielfältig. So gibt es Anordnungen, die mehr einem Lenkrad ähneln und andere, die besonders bei der Flugsimulation beliebt sind. Auch hier entstehen z. Z. neue Varianten mit mechanischer Rückführung, die dann auch spezielle Erschütterungen, wie das Rattern einer Kettensäge nachbilden. Wegen der hohen Motorleistungen benötigt eine Microsoftvariante sogar einen beachtlich großen, eigenen Lüfter.

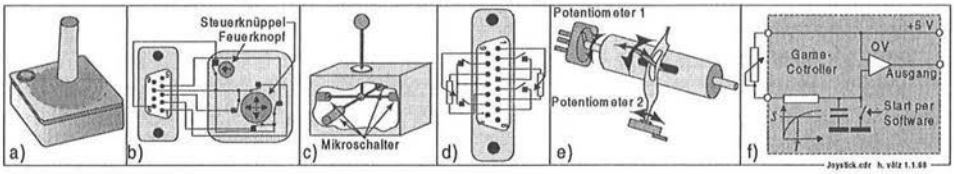


Bild 8.5 Funktion und Aufbau der beiden Joystickvarianten

8.3.4 Datenhandschuh

Mit der Maus und all ihren Erweiterungen kann man wohl recht befriedigend Objekte steuern. Man kann aber nicht einmal annähernd die Komplexität der menschlichen Bewegung erfassen. Dies wird schon deutlich, wenn man sich den wissenschaftlichen Umgang mit radioaktivem Material anschaut. Hinter einer radioaktiv abschirmenden Wand sitzt ein Wissenschaftler und manipuliert mit viel Elektronik und Elektromechanik über gesteuerte Roboterarme das Material hinter der Wand. Er sieht per Monitor und fühlt durch mechanische Rückmeldung unmittelbar was er tut. Ähnliche Probleme hatte Kobrinskij 1960 zu bewältigen, als er die „Moskauer Hand" entwickelte. Das war eine künstliche Hand (eigentlich Prothese), die nur von den neuronalen Aktionsströmen gesteuert wurde. Mit der Entwicklung von virtueller Realität wurden die zugehörenden Probleme immer klarer. Es entstanden mehrere, interessante Lösungen. Im folgenden wird eine kleine Auswahl der Varianten für die Hand gegeben. Solche Gebilde werden meist als Datenhandschuh bezeichnet. Die erste Lösung soll auf den Gitarristen Thomas Zimmermann zurückgehen, der ihn 1981 für sich bastelte. 1985 lag der erste kommerzielle, für die NASA entwickelte DataGlove (s. u.) vor. 1991 lag die erste Kombination mit Datenhelm (s. S. 225) vor. Ein Überblick zum Stand der Technik um 1992 enthalten u.a. [VAU], [BOR].

Von einem Datenhandschuh müssen sensorische *und* motorische Leistungen erbracht werden. Die *Sensorik* sollte folgende Größen ableiten:

- Wo befindet sich die Hand im Raum und wie ist sie ausgerichtet? Auf die entsprechenden Raumsensoren wird noch genauer im Abschnitt 8.7, ab S. 195f eingegangen.
- Wie stark gekrümmt sind die Finger bezüglich der einzelnen Glieder? Wie stehen die Finger zueinander, aber insbesondere bezüglich des Daumens?

Für die *Motorik* sind die Aussagen schwieriger. Hierauf wurde schon auf S. 60f eingegangen. Wegen der hohen Komplexität gibt es praktisch nur Rückmeldungen per Druck und / oder Vibration. Im folgenden werden noch kurz einige Beispiele im Zusammenhang mit **Bild 8.6** besprochen

Im Auftrag der NASA entwickelte die Firma VPL Research den **„DataGlove"** (Bild 8.6b). Er besteht aus leichtem Lycra-Gewebe und schmiegt sich daher gut der Hand an. Seine Sensorik nutzt Eigenschaften von speziell angeordneten und aufbereiteten Lichtleitfasern aus. Sie sind auf dem Hand- und dem Fingerrücken fixiert. Durch die Bewegung entstehen unterschiedliche Biegeradien. Je kleiner der Radius ist, desto mehr wird die Totalreflexion in den Fasern gestört. Entsprechend viel Licht geht bis zum Ende der Faser verloren. Es sinkt der Pegel an der Empfangsdiode. Jedem Finger sind mindestens zwei Lichtleitfasern zugeordnet, die am unteren bzw. mittleren Knöchel enden. Für Positionskontrolle enthält der Handschuh einen Polhemus-Sensor (s. S. 197). Er ermöglicht eine Auflösung von etwa 5°. Sie reicht für viele Anwendungen, genügt aber nicht den höchsten Anforderungen.

Das **Tele-Tact-System** wurde vom Forschungszentrum für fortgeschrittene Robotik in Großbritanien entwickelt (Bild 8.6a). Es besteht eigentlich aus zwei Handschuhen, einem sensorischen und einem motorischen. Derjenige zur Datenaufnahme enthält 20 kraftempfindliche Widerstände an der Hand und den Fingern. Für den aktiven Teil werden kleine Lufttaschen benutzt, die sich schnell füllen und leeren lassen. Die Größe und Dichte der Luftpolster ist proportional zur örtlichen menschlichen Sensorendichte gewählt.

Ursprünglich für Nintendo-Spiele wurde der **Mattel Power Glove** in Zusammenarbeit von VPL und Abrams Gentile Entertainment (AGE) entwickelt (Bild 8.6d). Er hat wegen seines geringen Preises um 100 DM eine relativ große Verbreitung gefunden. Zudem wurde er sehr detailliert, bis einschließlich seiner Programmierung, in der Zeitschrift c't behandelt [KRA]. Trotz seiner geringen Präzision wurde er auch mehrfach für „ernste" Anwendungen benutzt. Bei ihm werden auf den Fingerrücken schmale Plastikstreifen befestigt, die mit elektrisch leitender Tinte überzogen sind. Diese Streifen sind dehnungssensibel. Die Bewegung der Finger beeinflußt also ihren Widerstand. Für die Positionskontrolle enthält er zwei Ultraschallsender. Zusätzlich enthält er noch eine kleine Tastatur.

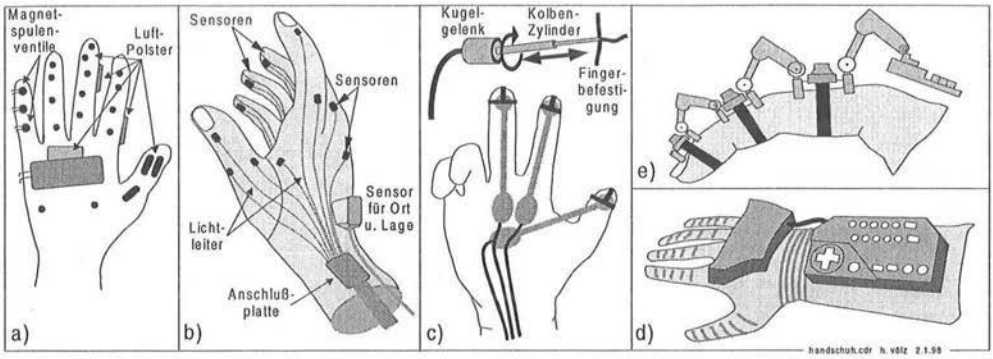


Bild 8.6 Ausführungen einiger Datenhandschuhe

Der **Portable Dextrous Master** wurde vor allem als motorischer Zusatz zum DataGlove entwickelt (Bild 8.6c). Er besitzt kolbenartige luftdruckgesteuerte Zylinder mit Kugelgelenken (im Bild oberer Teil). Sie dienen sowohl der Kraftrückkopplung als auch der Messung. Gegenüber anderen Varianten ermöglichen sie es auch, die Daumenspreizung zu erfassen.

Weiter existiert noch der **Dexterous Hand Master** (DHM) der Fa. Exos. Er ist kein Handschuh, sondern eine komplexe mechanische Anordnung (Bild 8.6e). Sein Skelett besteht aus leichtem Aluminium. Jedes Knöchel-Gelenk wird von einem Scharnier kontrolliert. Je Finger sind es also drei, beim Daumen nur zwei. In den Scharnieren befinden sich je ein kleiner Magnet und ein Hallsensor. Das ermöglicht eine sehr hohe Meßgenauigkeit.

Von der Firma Begej Corporation aus Colorado wurde weiter ein **Begej Glove** Controller mit 48 sensorischen Kanälen an den Fingespitzen entwickelt. Er wird hier nur angeführt, weil in seinem Kontext der Begriff *„Taxel"* (taktiles Pixel) eingeführt wurde. Dadurch soll ein Maß für die Leistungsfähigkeit von Handschuhen definiert werden. Ferner sei der **Talking Glove** erwähnt. Er ist eine Kombination von Hard- und Software und wurde entwickelt, um die Taubstummen-Zeichensprache direkt in eine synthetische Sprache zu übersetzen. Eine wesentliche Weiterentwicklung für die virtuelle Realität ist noch der Datenanzug oder **DataSuite**. Der erste stammt wieder von VPL und ist seit 1987 verfügbar. Er ähnelt einem Taucheranzug. Er bedeckt den ganzen Körper und erfaßt über fünfzig Freiheitsgrade vom Hals bis zum Fußknöchel.

8.4 Tabletts und bildschirmbezogene Varianten

In diesem Abschnitt werden Einrichtungen | Geräte | Anordnungen behandelt, die durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet sind:

- die möglichst präzise Eingabe von Koordinaten,
- ein druckempfindliches Zeichnen|Schreiben,
- eine zeigende Bedienung, vorwiegend mit dem Zeigefinger direkt zum Bildschirm.

Die drei Eigenschaften müssen nicht immer gleichzeitig vorhanden sein. Aber keine von ihnen kann weder mit der Maus noch mit ihren bisher behandelten Varianten verwirklicht werden. Eine weitere Gemeinsamkeit besteht darin, daß die erzeugten Daten immer durch ein Hinweisen auf eine Fläche entstehen. Dieses Hinweisen kann mit einem Gerät (Stift bzw. Puck) oder direkt mit einem Finger erfolgen. Die Fläche kann der Bildschirm oder eine andere Anzeigetechnik sein. Auch eine speziell gestaltete Anordnung, die oft als Tablett bezeichnet wird, ist möglich. Die hier gegebene Beschreibung mag recht abstrakt sein, sie ist aber notwendig, um hinreichend umfassend zu sein. Es gibt heute nämlich sehr viele Techniken, die das o. g. leisten und nebeneinander Bestand haben. Es ist z. Z. auch nicht gewiß, welche sich davon langfristig durchsetzt.

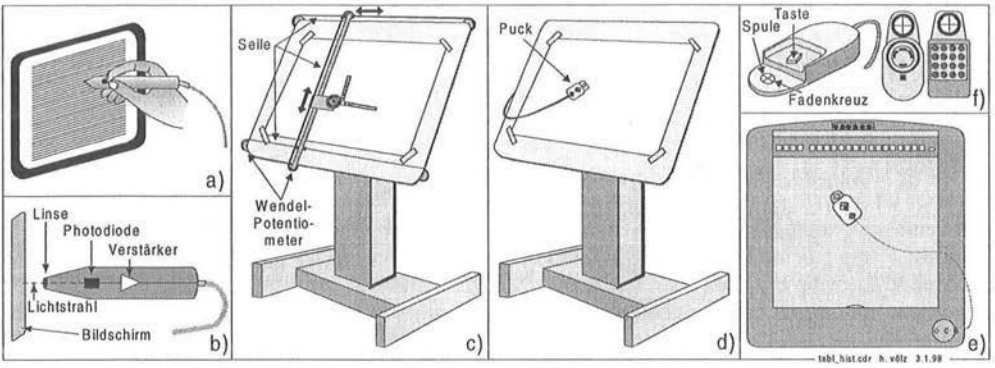


Bild 8.7 Lichtstift (a, b) und einige CAD-Varianten von Zeichenbrettern

8.4.1 Etwas Geschichte

Die wohl älteste Methode einer grafischen Eingabe gemäß den o. g. Kriterien wird dem Doktoranden Ivan Sutherland am MIT zugesprochen. Er schuf 1962 dafür den **Lichtgriffel**, lightpen. Seine Handhabung zeigt **Bild 8.7**a. Ein etwas dicklich aussehender Stift wird so gehalten, daß er zum Bildschirm zeigt. Seine Spitze weist auf eine ausgewählte Stelle. Dann wird eine Taste gedrückt, um jene Aktion auszulösen, die mit dieser Stelle gekennzeichnet ist. Ein Bildschirm schreibt seinen Inhalt ja zeilenweise zwischen 50- bis 100mal in der Sekunde. Daher leuchtet jedes Pixel periodisch zu genau definierten Zeiten kurzfristig auf. Dies wertet der Stift aus. Er besitzt dazu an seiner Spitze eine kleine Linse. Sie bildet die Punkte des Leuchtschirms auf eine Photodiode ab (Bild 8.7b). An ihr entsteht folglich nur dann ein Signal, wenn gerade der Elektronenstrahl vorbeiläuft. Die zugehörigen Impulse werden verstärkt und im Rechner ausgewertet. Da der Tastendruck deutlich länger als die Periode der Impulse dauert, ist so der anvisierte Ort auf dem Bildschirm leicht zu bestimmen.

Eine zweite, sehr alte Variante ist das **elektronische Zeichenbrett**. Bei ihm wird die Parallelführung meist durch Seilzüge erreicht (Bild 8.7c). Sie steuern zwei mehrgängige Wendelpotentiometer, eines für die *x*- und das andere für die *y*-Koordinate. Aus ihrer Spannungsteilung kann sehr genau die Position der Zeicheneinheit bestimmt werden. Dadurch ist es möglich, Konstruktionsdaten mit hoher Präzision dem Rechner zu übergeben. Noch genauer, aber vor allem einfacher geht das mit einem Puck, wie ihn Bild 8.7d zeigt. Er ist frei beweglich, enthält ein Fadenkreuz und mehrere Tasten. Auf die Funktion dieser Anordnung wird weiter unten eingegangen. Hieraus entwickelte sich dann das etwas kleinere Zeichentablett, das flach auf den Tisch gelegt werden kann. Ein Beispiel zeigt Bild 8.7e. Hier sind meist unterschiedliche Pucks anschließbar. Einige Varianten zeigt Bild 8.7f. Sie enthalten ein Fadenkreuz, daß oft mit einer Lupe kombiniert ist, und einige Tasten. Machmal sind sogar Rechner enthalten. Auf der Tablettfläche werden für bestimmte Programme (vor CAD-Programme) häufig Konfigurationsfelder benutzt. Sie ähneln den Pictogrammen bei graphischen Oberflächen und ermöglichen bestimmte Auswahlen, z. B. Füllungen, Schraffuren, Schriften, Kreise, Kreisbögen, Ellipsen, Rechtecke usw.

In Japan entstanden Tabletts Anfang der 80er Jahre, um die 30 000 Schriftzeichen eingeben zu können. Die Initiative soll von Azuma Murakai ausgegangen sein. Mit zwei Geschäftspartnern gründete er 1983 die Firma WACOM. Der Name leitet sich von *wa* (harmony) und *com* (omputer) ab. 1984 lag das erste kommerzielle Grafiktablett vor. Details zu den späteren kabellosen und druckempfindlichen Varianten siehe weiter unten. Doch schon 1958 wurde Calcomp gegründet. Es entwickelte vor allem Trommelplotter. Von Calcomp kam 1987 das erste Tablett als „Drawing board" in den Handel. Später wurden die Stifte statt über das Kabel durch Knopfzellen versorgt.

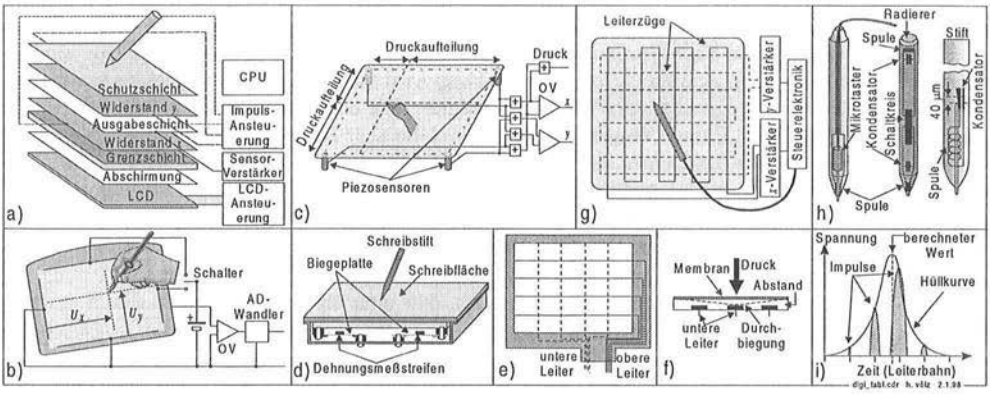


Bild 8.8 Wichtige Varianten von Digitalisierungstabletts

8.4.2 Grafiktabletts

Heute gibt es zeichentischähnliche Varianten in vielen Größen, von etwa DIN A0 bis A6, also herab bis zu kleinen, mausähnlichen Anordnungen. Sie heißen u. a. **Digitizer**, Tabletts, Digitalisierungs- oder Grafiktablett. Ein oft benutztes Prinzip ist die **resistive Technik**. Sie wird auch bei den persönlichen digitalen Assistenten (PDA, Notepad, Pen- oder Stiftcomputer), wie dem Newton (seit 1991 produziert) von Apple, benutzt. Ihr Aufbau geht aus **Bild 8.8**a hervor. Ihre Funktion zeigt etwas vereinfacht Bild 8.8b. Zunächst sei sie für die y-Koordinate beschrieben. An die Widerstandsschicht wird kurzzeitig die Spannung gelegt. Dabei entsteht ein gleichmäßiger Abfall längs der y-Richtung. Wird nun mit dem Stift (Stylus) auf die Schutzschicht gedrückt, so wird an der entsprechenden Stelle ein Kontakt zwischen der Widerstandsschicht und der Ausgabeschicht hergestellt. Dadurch gelangt das entsprechende Potential zum Sensorverstärker (Operationsverstärker OV) und kann ausgewertet werden. Somit ist die y-Koordinate bestimmt. Das gleiche geschieht im Wechsel von etwa 200 Hz für die x-Koordinate. Zusätzlich kann auch ungefähr der Druck aus den sich dadurch ändernden Übergangswiderständen bestimmt werden. Die ganze Anordnung kann äußerst dünn und durchsichtig gestaltet werden. Dadurch ist es möglich, darunter auch ein LCD-Display anzuordnen. Es muß aber wegen der Potentiale abgeschirmt betrieben werden.

Eine andere Betriebsart liegt bei drucksensiblen Tabletts vor. Bei einem Prinzip ist das eigentliche Zeichenbrett auf vier Piezosensoren gelagert (Bild 8.8c). Wird mit dem Finger oder einem Stift an einer Stelle gedrückt, so teilt sich der gesamte Druck entsprechend den Abständen auf die vier Sensoren auf. Durch Addition und Subtraktion können daraus leicht die Koordinaten bestimmt werden. Für den totalen Druck sind nur alle vier Werte zu addieren. Eine ähnliche Variante läßt sich auch mit Dehnungsmeßstreifen gemäß Bild 8.8d aufbauen. Sie ist besonders robust und wird u. a. zur Handschriftidentifizierung benutzt (S. 88/89).

Auch in Anlehnung an die Folientastatur kann ein Tablett aufgebaut werden. Es müssen sich dabei nur hinreichend viele x- und y-Leitungen als obere bzw. untere **Leiterzüge** gegenüberstehen (Bild 8.8e). Beim Drücken mit einer feinen Spitze wird ein Kreuzungspunkt verbunden (Bild 8.8f). Da der Leiterabstand nicht sehr klein zu machen ist, bleibt die Auflösung begrenzt. Auch eine Druckempfindlichkeit ist kaum zu erreichen. Hierzu muß man zulassen, daß gleichzeitig mehrere Kreuzungspunkte geschlossen werden. Dann kann der Druck grob aus deren Anzahl bestimmt werden. Der Ort wird aber wegen der notwendigen Mittelwertbildung ungenauer.

Ein sehr genaues Verfahren beruht auf zwei unter der Oberfläche liegenden **mäanderförmigen Leiterzügen**, die senkrecht zueinander stehen (Bild 8.8g). Sie werden abwechselnd mit sehr kurzen Impulsen erregt. Die zugehörenden Wellen wandern auf den mäanderförmigen Leitungen entlang und

erzeugen dabei ein wanderndes Magnetfeld. Dieses beeinflußt eine Spule, die sich an der Spitze des Zeichenstiftes (Stylus oder Puck) befindet (Bild 8.8h, links). Das entsprechende Signal wird im Empfänger der Steuerelektronik ausgewertet. Eine Funktion wird mit einem Mikroschalter ausgelöst, der gleichfalls in den Stift integriert ist und auf Druck reagiert. Die hohe lokale Präzision des Verfahrens erklärt sich aus Bild 8.8i. Einmal können in die Leiterplatte sehr feine Leiterzüge eingeätzt werden, die sich zudem noch sehr dicht unter der Oberfläche befinden. Außerdem erzeugt die sich vorbeibewegende Welle auch aus den benachbarten Windungen Impulse in der Spule. Es entsteht ein zeitlicher Verlauf, wie ihn Bild 8.8i zeigt. Die Hüllkurve aller Impulse liegt für eine Spulenform und die gewählte Konstruktion fest. Über sie kann aus mehreren Impulsen der Ort genauer berechnet werden. So ist eine Auflösung erreichbar, die bis zu einem Zehntel des Leiterabstandes reicht (≤0,1 mm). Die *x*- und *y*-Komponenten werden nacheinander erzeugt. Für eine absolute Genauigkeit gibt es dann Probleme, wenn der Stift schräg gehalten wird. Für eine Drucksensibilität muß der Mikroschalter durch eine drucksensible Anordnung, z. B. einen Dehnungsmeßstreifen oder Piezoempfänger, ersetzt werden. Der Stift kann auch durch einen Puck von Bild 8.7f ersetzt werden. Dann wird eine noch höhere Präzision erreichbar, welche die Lupe verlangt.

Eine entscheidende Weiterentwicklung der Tabletts ist das GTS (give and take system). Es arbeitet kabellos und zugleich drucksensibel. Zudem ist es deutlich präziser als die resistive Technik. Soweit bekannt, wird es nur von der Fa. WACOM gefertigt. Leider gibt es dazu keine genauen Angaben. Sehr wahrscheinlich arbeitet es ebenfalls mit mäanderförmigen Leiterzügen. Sie senden, ähnlich wie zuvor, etwa alle 64 µs Impulse aus. Diese werden vom Stift mit einer Spule aufgenommen (Bild 8.8h, Mitte). Die Spule ist mit einem Kondensator zusammengeschaltet. Die dadurch entstehende Resonanz läßt die Eigenschwingung mehrere µs andauern. Die Leiterzüge werden nach der Impulsausgabe auf Empfang umgeschaltet und werten das noch anhaltende Signal des Stiftes aus. Die Druckempfindlichkeit soll durch Verändern der Kapazität (Bild 8.8h, rechts) erfolgen. Mit einem Hub von ≤ 40 µm wird der Elektrodenabstand und damit die Resonanzfrequenz verändert. An der Rückseite des Stiftes ist ein zweiter Resonanzkreis (mit anderer Frequenz) angeordnet. Dadurch kann diese Seite wie ein Radierer benutzt werden. Der Stift funktioniert bis zu einem Abstand von 15 mm. Die Tastensignale werden wahrscheinlich ebenfalls durch Frequenzänderung erzeugt.

Schließlich sei noch eine neue Besonderheit, nämlich das EstiMat von 1997 der Fa. CalComp, kurz erwähnt. Dies ist eine bieg- und rollbare Matte, die je nach Ausführung zwischen etwa 76×91 cm^2 und 92×122 cm^2 mißt. Sie funktioniert bis zu 4600 m Höhe und bei Temperaturen von -40 bis +70 °C. Sie arbeitet mit mäanderförmigen Leitern und einem kabelverbundenen Stylus oder Puck.

8.4.3 Touchscreens

Ein Touchscreen ist in gewissem Sinn eine Kombination von Bildschirm und Digitalisierungstablett. Zu ihnen gehören auch teilweise *ScratchScreen*-Modelle. Hierunter werden oft alle Systeme zusammengefaßt, die mit Druck, wie z. B. die resistive Technik, arbeiten. Sie benötigen keinen speziellen Stift und können recht einfach hergestellt werden. Die Haupteigenschaften der Touchscreens betreffen die folgenden Punkte:

- Das tablettähnliche System muß gut durchsichtig sein und sich vor oder auf dem Bildschirm befinden. Es kann oft ähnlich, wie im **Bild 8.9**a gezeigt, getrennt hinzugefügt und mit zusätzlicher Software installiert werden.
- Die Bedienung muß direkt mit dem Finger oder der Hand möglich sein. Zusätzliche Geräte, wie Stylus oder Puck, gibt es nicht. Es fallen also Ein- und Ausgabe-Medium zusammen. So werden ermüdende Augenbewegungen und falsche Eingaben weitgehend vermieden.
- Die Auflösung kann deutlich geringer sein. Typische Werte liegen bei 50×40, also 2000 Punkten. Oft genügen nur wenige ausgezeichnete Flächen.

Einen besonders einfachen Vorsatz für einen Touchscreen zeigt Bild 8.9b. Der durchsichtige Rahmen enthält einzelne, ebenfalls gut durchsichtige *Kontaktflächen*. Sie stehen einer einzigen isolierten Elektrode gegenüber. Die Funktion entspricht also jener mit gekreuzten Leitungen von Bild 8.8e. Das Ka-

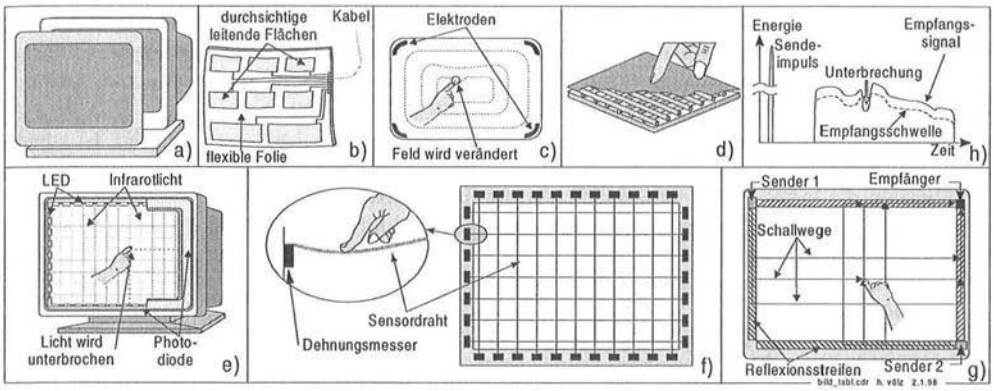


Bild 8.9 Varianten von Touchscreens

bel wird meist mit einer zusätzlichen Steckkarte verbunden. Es können also nur Aktionen ausgelöst werden, die per Software diesen Flächen zugeordnet sind.

Die **kapazitive** Methode geht von vier Elektroden aus, die an den Kanten des Bildschirms (oder auf der Folie) verdeckt angeordnet sind (Bild 8.9c). Ihnen gegenüber steht eine isolierte, ganzflächige Elektrode. Die vier Elektroden erzeugen ein gleichmäßiges elektrisches Feld. In der letzten Zeit werden bevorzugt sinus- oder rechteckförmige Signale verwendet. Bei der Berührung der Oberfläche mit dem Finger wird das Feld verändert. Es wird Ladung abgeleitet. Aus der dadurch entstehenden Veränderung kann der Berührungsort berechnet werden. Bei Rechtecksignalen kann auch die Phasenlage ausgenutzt werden. Dadurch ist eine höhere Genauigkeit erreichbar.

Eine andere *kapazitive* Methode arbeitet mit vordefinierten leitenden Flächen auf einer Membran (wie im Bild 8.9b). Durch Druck wird der Abstand und damit die Kapazität gegenüber der hinteren kompakten Fläche vergrößert. Dies kann in einer elektronischen Schaltung (z. B. als Resonanzfrequenz) ausgewertet werden. Nach dieser Methode hat Apple bei einigen Rechnern als „Mausersatz" einen „Trackpad" realisiert. Unterhalb der Tastatur befindet sich ein kleiner rechteckiger Bereich von etwa 5×7,6 cm^2. Darunter sind gekreuzte Leiter (Bild 8.9d) angeordnet, die auf Berührung durch Veränderung der Kapazität reagieren. Die Bewegung des Fingers auf diesem Trackpad kann so leicht in Signale umgesetzt werden, die der Bewegung einer Maus entsprechen.

Eine ähnlich wie in Bild 8.9b aufgebaute Variante arbeitet mit einer dünnen **halbleitenden** Folie. Hier wird abwechselnd an den gegenüber liegenden Elektroden eine Spannung von etwa 5 V angelegt. Die anderen beiden messen die „Ableitung" durch die Berührung. Sie entspricht also im wesentlichen der **resistiven** Technik. Hierzu sind Monitore leicht und preiswert zu verändern bzw. Folien herzustellen. Probleme bereitet zuweilen die Drift. Die Lichtdurchlässigkeit der Folie liegt bestenfalls bei 80%. Allerdings sind derartige Folien leicht durch spitze Gegenstände, Fingernägel usw. zu beschädigen.

Zeitweilig wurden auch Touchsreens aus **zugsensiblen** Drähten eingesetzt (s. S. 97ff.). Der notwendige, hohe elektronische Aufwand hat sich jedoch nicht bewährt. Effektiv ist dagegen eine Anordnung nach Bild 8.9f. Sie benutzt viele dünne Drähte, die am Rande des Rahmens auf **Dehnungsmesser** (DMS) einwirken. Der Druck auf einen Bildschirmpunkt dehnt waagerechte und senkrechte Drähte. So kann nicht nur der Ort in bis zu 50×40 = 2000 Punkten, sondern auch die Stärke des Druckes ausgewertet werden. Wie bei allen ScratchScreens kann es hier zu unerwünschten Eingaben kommen, wenn man etwa den Handballen auf das Display legt. Durch entsprechende elektronische Schaltungen oder per Software ist es aber möglich, solchen flächigen Druck zu ignorieren.

Das **lichtoptische IR-Verfahren** (Bild 8.9e) enthält am oberen und am linken Rand LEDs mit Linsen, die gebündelt und/oder gepulst infrarotes Licht aussenden. Gegenüber befinden sich Photodioden ebenfalls mit Linsen. Der Finger unterbricht dann horizontale und vertikale Lichtwege. Hier-

bei ist sehr vorteilhaft, daß ohne Lichtverlust und zusätzliche Reflexionen gearbeitet werden kann. Leider läßt sich das Prinzip nur mit einer recht begrenzten Anzahl von „Kanälen" ausführen. Es besitzt daher keine hohe Genauigkeit (≤ 1000 Punkte). Stören können z. B. größere Insekten, IR-Fernbedienungen und IR-Übertragungen.

Weiter sei noch das **SAW-Verfahren** (surface acoustic waves) behandelt (Bild 8.9g). Es arbeitet mit Oberflächenwellen, also bei Ultraschall mit z. B. 5 MHz. An zwei diagonalen Ecken befinden sich Sender, die kurze Impulse aussenden. An den Bildschirmkanten befinden sich verdeckt 5 mm breite Streifen. Sie lassen teilweise den Schall passieren und reflektieren zugleich einen Teil um 90° umgelenkt. Auf der Gegenseite werden sie erneut um 90° umgelenkt und gelangen so zu dem einzigen Empfänger. Insgesamt gelangen daher aus beiden senkrechten Richtungen verteilt über die ganze Bildschirmfläche Signale zum Empfänger. Die Impulsgebung ist so ausgelegt, daß horizontale und vertikale Impulse sich periodisch abwechseln. Ein Finger oder Gegenstand vor dem Bildschirm schwächt nur ausgewählte Signalwege. Sie gelangen zu unterschiedlichen Zeiten zum Empfänger und ermöglichen so die Ortsbestimmung. Einen typischen Ausschnitt aus dem Empfängersignal zeigt Bild 8.9h. Die Schwelle wird durch die Ruheeinstellung festgelegt. Mit dieser Methode sind je nach Eintauchtiefe des Fingers bis zu 256 Druckstufen bestimmbar. Das Verfahren ist relativ robust. Selbst Kratzer lassen sich wegrechnen. Störend ist allerdings Spritzwasser.

Eine interessante **akustische** Variante wurde von Jean Renard Ward und Debra Schultz vorgeschlagen. Hier sendet nicht das Tablett, sondern der Stift 60mal je Sekunde Töne aus. Sie werden von zwei Mikrophonen an den Kanten des Bildschirms empfangen. Die Position des Stiftes wird aus der Laufzeit der Schallsignale berechnet. Ähnlich wie beim IR-System sind deshalb keine Änderungen an der Oberfläche des Systems notwendig. Über ein drittes Mikrophon könnte sogar die Position des Stiftes im dreidimensionalen Raum, also auch der „Druck", bestimmt werden. Eine Variante hiervon wird als 3D-Maus und zur Postionsbestimmung auf S. 197 beschrieben.

Abschließend ist noch eine Tabelle aus [HEE] übernommen. In ihr werden einige Eigenschaften der Touchscreens verglichen. Dabei wird auch berücksichtigt, daß sie oft als öffentliche Terminals eingesetzt werden. Dann müssen sie selbst gegen Witterung, Vandalismus usw. robust sein. Die zweite, etwas ältere Tabelle mit z. T. etwas anderer Einschätzung stammt aus [NN13].

	IR	kapazitiv	Piezo	resistiv	SAW
Lichtdurchlässigkeit	100%	80-85%	92%	55-80%	92%
Drucktiefe, Z-Achse	z.T.	nein	ja	nein	ja
Auslösezeit in ms	10-20	10-15	35	10-15	10
Vandalismus sicher	ja	nein	ja	nein	ja
Feuchtraum möglich	ja	kaum	ja	ja	bedingt
Kratzer stören	nein	gering	keine	stark	nein
Schmutz stört	ja, Partikel	ja (geerdet)	nein	kaum	teilweise
Störanfällig von außen	IR-Sender, Insekten	Erdung, Finger, trocken	Erschütterungen	Sonnenbestrahlung	laufende Tropfen

	IR	kapazitiv	Ultraschall	resistiv
Druckpunkt	einstellbar	nein	bedingt	ja
Schaltzeit	schnell	schnell	> 60 ms	schnell
Erkennung mehrerer Tasten	ja	nein	nein	nein
Transparenz	gut	schlecht	gut	schlecht
UV-stabil	ja	ja	ja	nein
hitzebeständig	nein	ja	bedingt	nein
EMV-fest	nein	ja	nein	ja
Robustheit	gut	sehr gut	gut	gut
Zuverlässigkeit	niedrig	hoch	hoch	hoch
mögliche Bedienung	dicke Objekte	unbedeckte Hand	Hand	druckempfindlich
Mausbetrieb	möglich	möglich	möglich	nein
Auflösung	niedrig	mittel	mittel	hoch

8.5 Akustische Eingaben

8.5.1 Systematik

Schall wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Mikrophone in elektrische Signale gewandelt. Sie unterscheiden sich in mehreren Punkten. Die wichtigsten sind:

- das physikalische Prinzip, nach dem die Schallenergie in elektrische umgesetzt wird,
- der Frequenzbereich und der Frequenzgang,
- die Richtcharakteristik, wie Kugel, Acht, Niere usw.,
- die Erscheinungsform, wie z. B. Lavaliere und Kehlkopfmikrophon sowie
- die Anordnung im Schallfeld, z. B. bei der Stereophonie oder beim Grenzflächenmikrophon.

Eine Systematik der Mikrophone zeigt **Bild 8.10**. Sie soll nur eine Einordnung ermöglichen. Die einzelnen Typen werden in den nächsten Abschnitten genauer behandelt. *Passive* Mikrophone transformieren die Schallenergie direkt in die elektrischen Signale. Bei den *aktiven* Mikrophonen steuert dagegen der Schall eine Hilfsenergie. Sie verstärken also die wirksam werdende Energie des Schalles und können daher empfindlicher sein. Dennoch sind bei den **passiven** Mikrophonen Energiekomponenten erforderlich. Dies wird erst über die genutzten Effekte (Art des Mikrophons) deutlich. Wenn das Schallfeld z. B. einen elektrischen Leiter bewegt, dann ist für das Induktionsgesetz ein Dauermagnet notwendig. So entsteht ein *dynamisches* Mikrophon. Ein *magnetisches* Mikrophon verändert dagegen den Magnetkreis, z. B. den Luftspalt. Eine Gleichspannung wird benötigt, wenn durch den Schall die Membran eines *Kondensators* bewegt und damit dessen Kapazität verändert wird. Diese Gleichspannung kann entfallen, wenn ein Elektret verwendet wird. Bei der Einwirkung auf einen Piezoschwinger (*Kristall, Keramik*) wird schließlich dessen innere Formanisotropie beeinflußt. Das Kondensatormikrophon kann auch **aktiv** betrieben werden. Dann wird seine Kapazität mit einer Induktivität zur Schwingungserzeugung benutzt. Die Energie der dabei entstehenden Hochfrequenz-

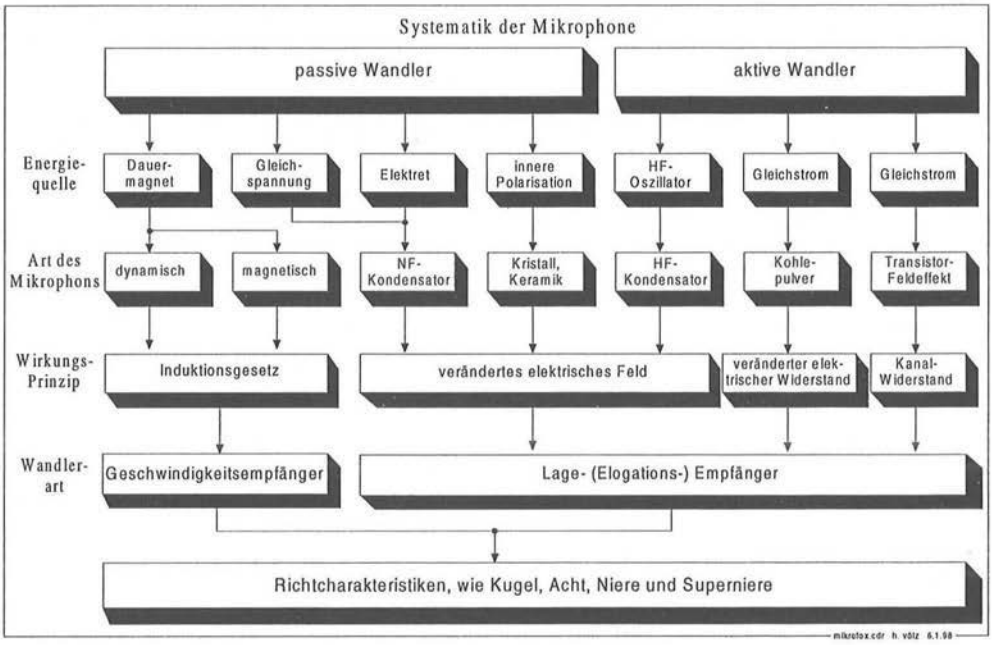


Bild 8.10 Systematik von Mikrophonen

schwingung hängt – wenn überhaupt – höchstens vernachlässigbar von der Schallenergie ab. Ähnlich ist es beim *Kohlemikrophon*. Bei ihm werden vom Schall nur die Kohlekörner lockerer oder dichter zusammengedrückt. Ein ganz neues Mikrophon wurde erst durch die Mikroelektronik möglich. Hier wird der *Kanalwiderstand* eines FET durch den Schall verändert.

Mikrophone können auf unterschiedliche Schallgrößen ansprechen. Zur Erzielung bestimmter *Richtwirkungen* (Kugel, Acht, Niere usw.) wird dies vor allem konstruktiv beeinflußt. Einfluß haben hierauf aber auch die Wirkprinzipien. Bei den statischen Prinzipien, wie z. B. dem Kohle- oder Kristallmikrophon, ist die erzeugte Spannung proportional der Membranauslenkung. Sie gehören daher zur Gruppe der Lage- oder Elongationsempfänger und besitzen primär keine Richtwirkung. Bei Mikrophonen, die das Induktionsprinzip nutzen, bewirkt die Verlagerung der Membran eine proportionale Änderung des magnetischen Flusses Φ. Infolge des Induktionsgesetzes $U \sim d\Phi/dt$ wird deshalb ihre Bewegungsgeschwindigkeit zum elektrischen Signal. Sie entspricht aber nicht dem Schalldruck, sondern der Schallgeschwindigkeit, und ist damit auch von der Richtung des Mikrophons zur Schallquelle abhängig.

8.5.2 Mikrophontypen

Das uralte *Kohlemikrophon* (**Bild 8.11**a) wird wegen seiner Einfachheit und Verstärkerwirkung immer noch zuweilen in Telefonen verwendet. Zwischen der leitenden Membran und der leitenden Gegenelektrode befinden sich kleine Kohlekörner bzw. Kohlegries. Der Schalldruck preßt sie periodisch zusammen und ändert so den Widerstand zwischen Membran und Gegenelektrode. Die dynamischen (elektrodynamischen) Mikrophone haben wegen ihrer hohen Qualität und guten Herstellbarkeit seit langem große Anwendungsbreite erlangt. Ihre Urform ist das *Bändchenmikrophon* (Bild 8.11b). Es war das erste sehr hochwertige Studiomikrophon. Seine „Membran" ist nur ein dünnes geriffeltes Aluminiumbändchen, daß im Luftspalt eines Magneten leicht jeder Schallschwingung folgen kann. Die extrem geringen Induktionsspannungen werden noch im Mikrophon durch einen Transformator deutlich vergrößert. Für die gewünschte Richtcharakteristik wurde der Innenteil des großen und schweren Magneten mit einem Dämpfungsmaterial ausgefüllt. Heute hat es keine praktische Bedeutung mehr. Die modernen *dynamischen Mikrophone* sind eine Umkehrung des dynamischen Lautsprechers. Die Membran ist dabei auf die Kalotte (auch Dom genannt) reduziert (Bild 8.11c.). Es gibt Ausführungen bis zu einem Durchmesser von 1 cm herab. Die optimale Richtcharakteristik und der gleichmäßige Frequenzgang werden durch den rückwärtigen Luftspalt eingestellt. Ein typisches magnetisches Mikrophon zeigt Bild 8.11d. Es entspricht dem Freischwinger-Lautsprecher. Die Membran ist starr mit der beweglichen magnetisierbaren Zunge verbunden. Bei Schallschwingungen nähert sie sich abwechselnd den Leitblechen des Nord- bzw. Südpols des Magneten. Die dabei in der Zunge auftretenden Flußänderungen rufen in der Spule die Induktionsspannungen hervor. Beim *Kristallmikrophon* wird durch den Schall eine Piezokeramik verbogen (Bild 8.11e). Die entstehende Spannung entspricht direkt der Biegung. Die Schallübertragung von der Membran zum Kristall kann direkt oder mittelbar erfolgen. Heute haben diese sehr einfachen Mikrophone kaum noch Bedeutung. Sie sind weitgehend durch die dynamischen und das folgende Kondensatormikrophon verdrängt worden.

Der prinzipielle Aufbau eines Kondensatormikrophons ist sehr einfach. Einer festen Elektrode steht in geringem Abstand isoliert eine dünne bewegliche Membran gegenüber. Gerade deshalb sind speziell ausgeführte Kondensatormikrophone *die* Referenz aller Mikrophone. Doch hierzu muß einiges zusätzlich realisiert werden. So besitzt jede eingespannte Membran Eigenschwingungen, die einen glatten Frequenzgang stören. Um sie zu dämpfen, werden in die Gegenelektrode Sacklöcher eingebracht. Ihr Durchmesser, ihre Tiefe und ihre Anzahl wird so gewählt, daß die besten Eigenschaften entstehen (Bild 8.11f links). Für einen ideal geradlinigen Frequenzgang muß das Luftvolumen auf die Steifheit der Membran abgestimmt sein. Wie im Abschnitt 7.7.6 ab S.116 gezeigt wurde, entsteht bei dieser Ausführung eine kugelförmige Charakteristik. Es liegt nämlich ein reiner Druckempfänger vor. Ändert man diese Gestaltung, so lassen sich leicht andere Richtcharakteristiken erreichen. Werden die Sacklöcher zu Durchgangslöchern verändert, so gelangt der Schall von beiden Seiten auf die Membran. Folglich kann nur die Druckdifferenz (d. h. die Schallschnelle) wirksam werden. Zum Druckgradientenempfänger, der ja ein Geschwindigkeitsempfänger ist, gehört aber eine Achtercha-

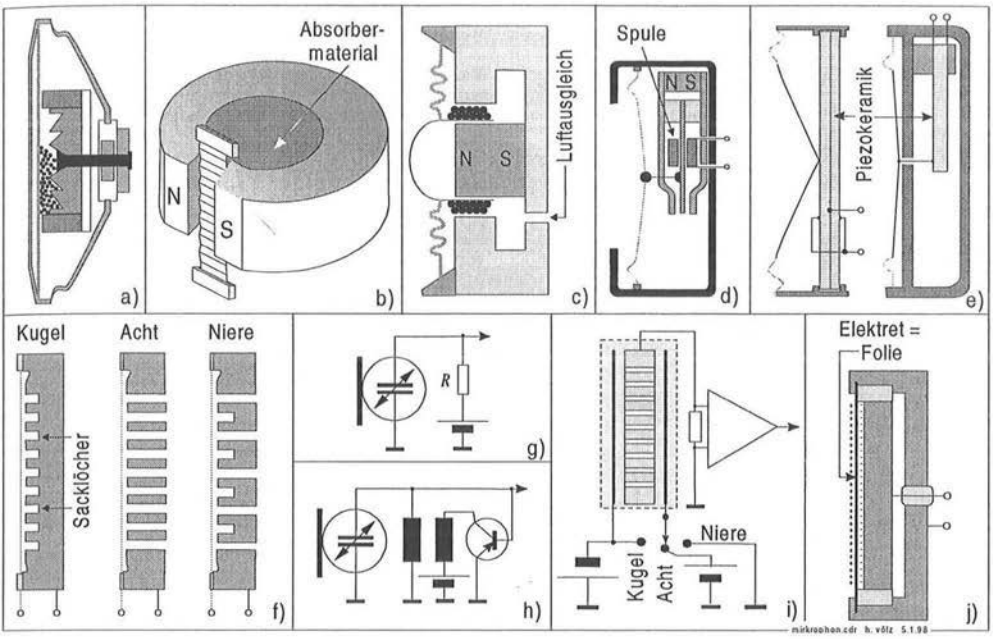


Bild 8.11 Zusammenstellung der wichtigsten Mikrophontypen

rakteristik (Bild 8.11f, Mitte). Kombiniert man beide Varianten, so entsteht eine nierenförmige Charaktesitsik (Bild 7.11c; S. 117). Die hier beschriebenen Methoden lassen sich ähnlich auch bei anderen Mikrophontypen verwirklichen. Jedoch beim Kondensatormikrophon besteht durch die Verwendung von je einer isolierten Membran auf jeder Seite der Kapsel eine weitere Möglichkeit. Mit solch einer Kapsel ist ein manuelles Umschalten zwischen den drei Charakteristiken möglich (Bild 8.11i). Hier wird die Gegenelektrode isoliert zum Verstärker geführt. Je nach der Polaristionsspannung wirken dann die beiden Membranen unterschiedlich zusammen.

Den üblichen (historischen) Betrieb eines Kondensatormikrophons zeigt Bild 8.11g. Über einen sehr großen Widerstand ($R \approx 100$ - 1000 MΩ) wird die Kapazität des Mikrophons ($C \approx 10$ - 100 pF) mit einer Spannung (≈ 100 V) aufgeladen. Die Zeitkonstante $T=R \cdot C \approx 0{,}1$ s ist groß im Vergleich zu den Kapazitätsänderungen durch den Schall. Daher muß die Ladung $Q = C \cdot U$ konstant bleiben. Folglich ändert sich die Spannung umgekehrt proportional zur Kapazität. Sie kann zum Verstärker geleitet werden. Infolge der hohen Impedanz und zur Vermeidung von störenden Leitungskapazitäten muß er unmittelbar mit der Kapsel verbunden sein. Optimal sind hierfür FET-Verstärker. Weiter kann auch auf die Spannungsquelle verzichtet werden. Für die Membran wird dann eine Elektretfolie verwendet (Bild 8.11j). Solche Folien besitzen nämlich ähnliche Eigenschaften wie Dauermagnete. Sie besitzen eine ständig vorhandene elektrische Polarisation (fixierte Ladungen). Die Folie verhält sich daher so, als ob sie im Innern eine Spannungsquelle von hundert und mehr Volt besäße. So entfällt die von außen sonst anzulegende Spannung. In Kombination mit einem FET entsteht dann ein kleines, preiswertes und dennoch hochwertiges Standardbauelement der Unterhaltungsindustrie, das Elektretmikrophon (Bild 8.11j).

Insbesondere bei „drahtlosen" (schnurlosen) Kondensatormikrophonen wird eine andere Betriebsweise gewählt. Die Kapazität des Mikrophons wird mit einer Induktivität zu einem Schwingkreis zusammengeschaltet. Er wird über einen Transistor zur Eigenschwingung angeregt (Bild 8.11h). Diese Schwingung wird durch den Schall also in der Frequenz moduliert. Sie kann über eine kurze

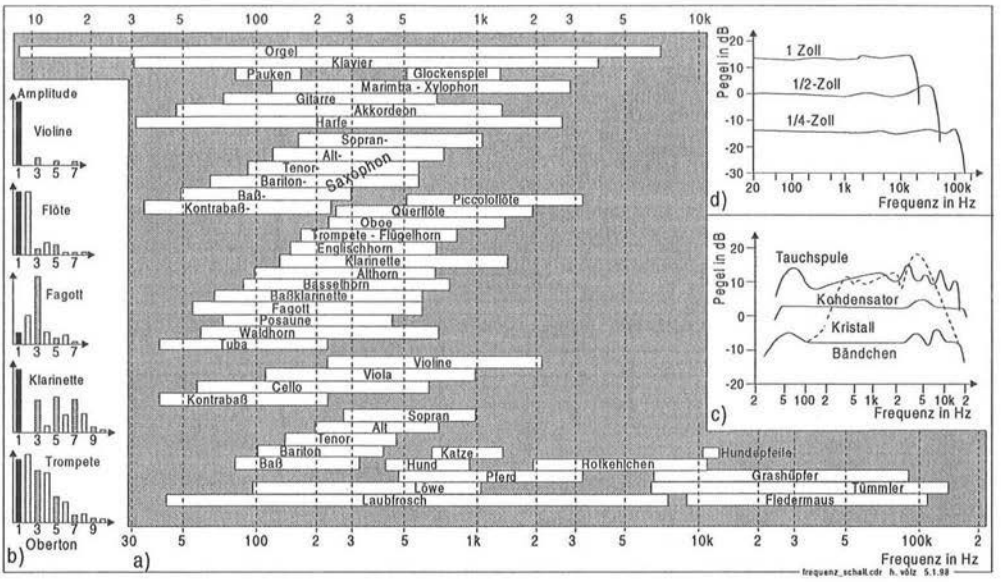


Bild 8.12 Frequenzbereich einiger Schallquellen (a), Oberwellen einiger Musikinstrumente (b) und Frequenzgang einiger Mikrophone

Antenne – das Kabelende, was meist lose dran hängt – abgestrahlt werden. Irgendwo in der Nähe wird es empfangen und zum NF-Signal demoduliert.

8.5.3 Frequenzgänge

Mikrophone sollen Schall in äquivalente elektrische Signale verwandeln. Im Prinzip wird dieser Schall bei der Mensch-Technik-Schnittstelle fast immer unser Gehör und damit den für uns hörbaren Frequenzbereich betreffen. Für Mikrophone ist es jedoch sinnfälliger, von den Schallquellen auszugehen. Auch sie erzeugen Schall nur in einem begrenzten Frequenzbereich. Einen Überblick zu vielen Musikinstrumenten, zu den verschiedenen menschlichen Stimmbereichen, aber auch zu einigen Tieren, gibt **Bild 8.12**a. Bei der Darstellung ist zu beachten, daß die Grenzen unscharf sind. Insbesondere betrifft dies die oberen Grenzen. Hier wirken sich nämlich die Oberwellenanteile der Schwingungen aus. Beispiele für einige Instrumente enthält dazu Bild 8.12b. Für eine hochwertige Schallaufzeichnung oder -übertragung muß der erforderliche Frequenzbereich möglichst gleichmäßig (linear) in elektrische Signale umgewandelt werden. Hierfür zeigt Bild 8.12c Beispiele von einigen wenigen, ausgewählten Mikrophonen. Bei der großen Vielfalt der Mikrophone besitzen die Beispiele bestenfalls Hinweischarakter. Nicht alle Kristallmikrophone haben einen derartig unregelmäßigen Frequenzgang. Gute Tauchspulenmikrophone | dynamische Mikrophone besitzen nicht immer so ausgeprägte Resonanzen. Auch sind die angegebenen Pegel so eindeutig nicht zwischen den Typen vergleichbar. Für hinreichend eindeutige Aussagen ist es schon notwendig, den Frequenzgang des jeweiligen Mikrophons genau zu kennen. Bei guten Mikrophonen gehört seine Dokumentation beim Kauf dazu. Wesentlich aussagekräftiger sind dagegen die Frequenzgänge in Bild 8.12d. Sie betreffen die Größe, genauer den Kapseldurchmesser, von guten Kondensatormikrophonen. Daraus wird deutlich, daß er bereits bei der Kugelcharakteristik die obere Frequenzgrenze deutlich beeinflußt. Je höher die zu übertragende maximale Frequenz ist, desto kleiner muß die Kapsel gehalten werden. Allerdings sinkt dadurch natürlich die Empfindlichkeit. Für sehr hochwertige Aufnahmen sind also die ½-Zoll-Kapseln mit rund 13 mm Durchmesser ideal.

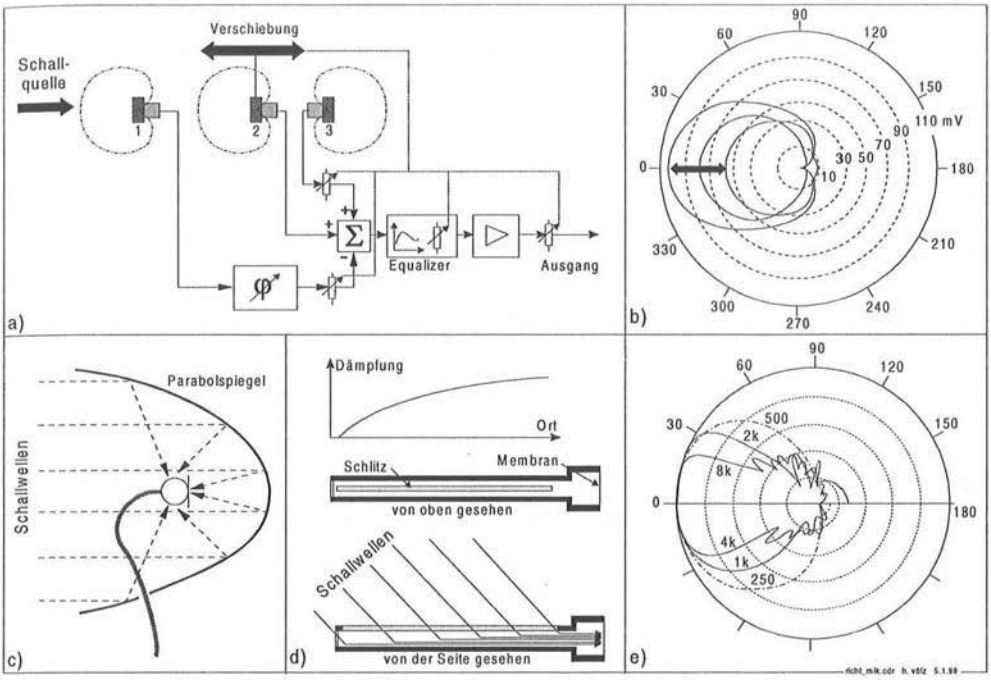


Bild 8.13 Zoommikrophon (a, b) und zwei Richtmikrophone (c bis e)

8.5.4 Sondermikrophone und Zubehör

Für mehrere Anwendungen wurden Spezialmikrophone entwickelt. Einige Beispiele sind im folgenden behandelt. Camcorder haben gewöhnlich eine Zoomoptik. Sie ermöglicht es, den Bildwinkel und damit den subjektiven Abstand von Objekten willkürlich zu verändern. Um bei der parallelen Tonaufzeichnung keinen widersprüchlichen Eindruck hervorzurufen, muß gleichartig das Verhältnis von direktem und indirektem Schall beeinflußt werden. Das kann u.a. durch die Richtcharakteristik des Mikrophons erreicht werden. So entstand u. a. ein System aus drei Mikrophonen, wie es **Bild 8.13**a zeigt. Das Verstellen der Lage des mittleren Mikrophons und der Regler ermöglicht es, die Richtcharakteristik entsprechend Bild 8.13b kontinuierlich zu verändern.

In anderen Fällen sind Aufnahmen aus relativ großer Entfernung zu machen. Dies ist u.a. bei Reportagen erforderlich und verlangt eine sehr starke Richtwirkung. Hierfür entstand das Interferenzmikrophon, auch *Rohrrichtmikrophon* genannt (Bild 8.13d). Vor einer Mikrophonkapsel befindet sich ein 10 bis 50 cm langes Rohr. Es enthält einseitig einen Schlitz von einigen mm Breite und ist geringfügig mit einem Absorptionsmaterial gefüllt. Dadurch ergibt sich ein Dämpfungsverlauf. Als Funktion des Abstandes von der Membran zeigt ihn Bild 8.13d (oben). Der einfallende Schall gelangt nun sowohl schräg durch den Schlitz als auch durch die vordere Öffnung des Rohres zur Membran. Infolge der unterschiedlichen Laufzeiten (verschieden lange Wege) interferieren die Schallwellen teilweise. Dieser Einfluß nimmt mit wachsender Frequenz (kürzere Wellenlänge) zu. Insgesamt ergeben sich dadurch Richtcharakteristiken wie sie Bild 8.13e zeigt. Dabei ist zu beachten, daß die Kurven zur besseren Übersicht immer nur in einer Halbkugel (oberer bzw. unterer Halbkreis) eingezeichnet sind. Natürlich sind die Kurven auch im anderen Halbkreis vorhanden. Bei hohen Frequenzen besitzen sie neben der Hauptkeule viele Nebenzipfel, die aber im Klangbild kaum störend in Erscheinung treten.

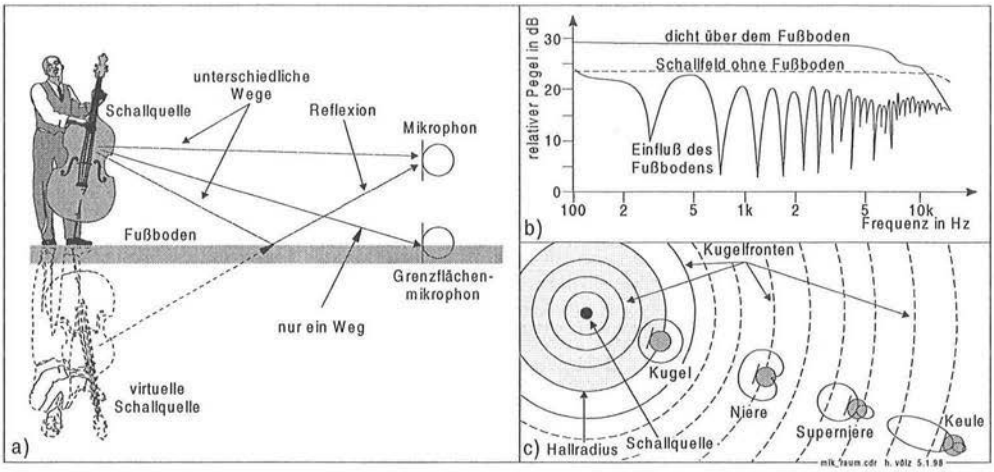


Bild 8.14 Wirkung des Grenzflächenmikrophons (a, b) und Mikrophonwahl in Abhängigkeit vom Hallradius

Eine andere Variante mit hoher Richtwirkung ist das Parabolmikrophon von Bild 8.14c. Die Anordnung ähnelt einer Satellitenantenne mit Parabolspiegel. Derartige Mikrophone werden mit Spiegeln bis zu einem Meter Durchmesser u. a. zur Aufnahme von Tierstimmen in der freien Natur (und zur Spionage) verwendet. Infolge der großen Fläche besitzen sie eine hohe Empfindlichkeit. Sie haben allerdings den Nachteil, daß sie nur bei relativ hohen Frequenzen wirksam sind. Die Bündelung des Schalles tritt erst dann wirksam in Erscheinung, wenn die Wellenlänge deutlich kleiner als der Spiegeldurchmesser ist (s. u.).

Die Interferenz von Schall kann sich im Gegensatz zum o. g. Rohrrichtmikrophon auch sehr störend auswirken. Dies zeigt sich besonders deutlich bei schallhartem Fußboden. Gemäß Bild 8.14a wird dann die Schallquelle an ihm gespiegelt. Zum üblich aufgestellten Mikrophon gelangt der Schall dadurch zumindest auf zwei Wegen. So verstärken oder löschen sich die höheren Frequenzen je nach dem Laufzeitunterschied periodisch aus. Es entsteht der stark wellige Frequenzgang von Bild 8.14b. Würde der Fußboden gut absorbieren (Teppich usw.), so wäre er akustisch nicht vorhanden. Der Frequenzgang wäre glatt. Dasselbe ist aber auch zu erreichen, wenn das Mikrophon unmittelbar am Fußboden angebracht wird. Derartige Spezialmikrophone heißen Grenzflächenmikrophone. Für ein ausgewogenes Klangbild ist die Größe der Grenzfläche wichtig. Der zugehörige Durchmesser ($\approx\lambda/4$) bestimmt die tiefste Frequenz. Die nebenstehende Tabelle zeigt, daß erhebliche Abmessungen erforderlich sind.

Grenzfrequenz in Hz	30	50	100	200	500
Notwendiger Durchmesser in m	5	3	1,5	0,75	0,30

Die vorangegangenen Betrachtungen machen deutlich, daß die Richtwirkung und die Aufstellung von Mikrophonen im Raum eng zusammenhängen. Als Richtlinie kann dafür das Bild 8.14c dienen. In der Nähe der Schallquelle, etwa bis zum Hallradius (s. S. 57ff.), ist ein Kugelempfänger günstig. Ein Richtmikrophon erzeugt dann ein zu trockenes Klangbild. Bis zum doppelten und dreifachen Hallradius bewährt sich die Nierenform. Darüber hinaus sind dann Superniere und starke Richtmikrophone (Keule) erforderlich.

Eine völlig andere Art sind *Körperschall*-Mikrophone. Sie übernehmen Schallsignale im direkten mechanischen Kontakt von Gegenständen, z. B. von Musikinstrumenten oder Maschinen. Dabei können aber auch völlig „ungewohnte" Klangeffekte auftreten. Durch die Übernahme des Körperschalls kann jedoch störender Luftschall gut unterdrückt werden. Deshalb erlangen diese Mikrophone bei der Aufnahmetechnik immer mehr an Bedeutung. Wegen ihrer Funktion werden sie zuweilen auch einfach als „Tonabnehmer" bezeichnet. Das kann aber leicht zur Verwechslung mit den gleich-

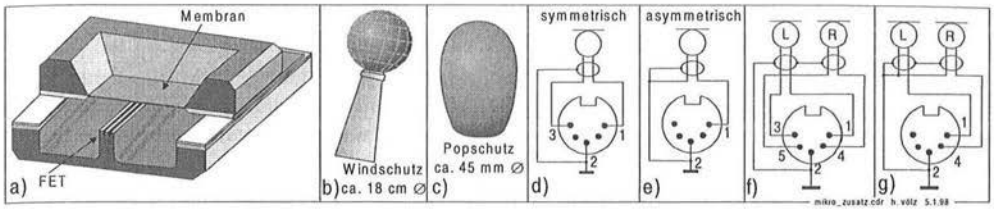


Bild 8.15 Mikroelektronisches Mikrophon (a), Wind- Popschutz (b, c) sowie Mikrophonstecker (d - g)

namigen Schallplattenabtastern führen. Verwandt mit dem Körperschallmikrophon ist das *Kehlkopf*-Mikrophon. Es wird mechanisch unmittelbar am Kehlkopf befestigt und übernimmt daher dessen Schwingungen. Hierbei entsteht allerdings keine besonders gute Sprachverständlichkeit. In sehr lauten Umgebungen (Maschinenräumen, Flugzeugen, Panzern usw.) ist nur so überhaupt eine Verständigung möglich. Der besondere Frequenzgang und das ungewohnte Klangbild kann aber durchaus zu interessanten Effekten führen, die im gewissen Umfange auch elektronisch nachzubilden sind. In anderen Fällen ist Körperschall – z. B. als *Trittschall* – sehr unerwünscht. Solche Störgeräusche können relativ gut durch eine federnde Aufhängung des Mikrophons und mit Baßabsenkung stark gedämpft werden. Auf die drahtlosen Mikrophone wurde bereits oben hingewiesen. Eine relativ freie Bewegung garantiert auch das Krawattenmikrophon oder *Lavalliere* (franz. locker gebundener Künstlerknoten). Dieses Mikrophon ist meist recht klein und vor allem zum Umhängen bzw. Befestigen an der Kleidung (Krawatte) eingerichtet. Spezielle Mikrophone, die zum Belauschen eingesetzt und dazu irgendwo eingebaut werden, heißen im Slang *Wanzen*. In den letzten Jahren ist mittels der *Mikroelektronik* ein extrem kleines Mikrophon möglich geworden (**Bild 8.15**a). Bei ihm sind die fein ausgeätzte Membran und ein FET zur Einheit verschmolzen. Solche Mikrophone sind mit etwa 1 mm extrem klein. Sie sind daher auch für höchste Frequenzen geeignet. Sie sind zugleich recht leistungsfähig und eventuell als Massenprodukt preiswert herzustellen.

Schließlich sei noch auf zwei Effekte und deren Vermeidung hingewiesen. Der Naheffekt, genauer *Nahbesprechungseffekt* entsteht dadurch, daß in unmittelbarer Nähe von Mikrophonen mit Nieren- und Achtercharakteristik eine fehlerhafte Verstärkung der tiefen Frequenzen erfolgt. In etwa 5 cm Abstand entstehen so typische Popgeräusche. Sie werden bevorzugt durch Explosionslaute ausgelöst. Ähnliches gilt auch, besonders bei kleinen Mikrophonen, für Wind. Hier tritt jedoch stärker ein Rauschen in Erscheinung. Der *Pop-* bzw. *Windschutz* (Bild 8.15 b und c) reduzieren diese Effekte deutlich. Sie bestehen aus einer etwa 2 mm starken schalldurchlässigen Schaumstoffschicht. Damit sorgen sie quasi dafür, daß für diese Frequenzen das Mikrophon eine größere Fläche „besitzt". Anders interpretiert gilt, daß die statischen Schwankungen des Schalldrucks über eine größere Oberfläche gemittelt werden. Daher ist der Windschutzkorb auch deutlich größer als der Popschutz. Günstiger als Popschutz ist es jedoch, den kritischen geringen Abstand zu vermeiden. Für große Schalldrucke – wie sie u. a. bei sehr naher Besprechung (Singen, sehr lautes Sprechen usw.) auftreten – ist zu beachten, daß es für jedes Mikrophon einen *Grenzschalldruck* gibt. Das ist der maximale Schalldruck, den es noch verarbeiten kann, ohne daß der Klirrfaktor etwa 1 % übersteigt. Im Bild 8.15 d bis f sind schließlich noch die üblichen Anschlüsse von Mikrophonen bei DIN-Stecker zusammengefaßt. Es gibt aber noch viele andere Anschlußarten, die hier nicht genannt sind.

8.5.5 Stereotechnik

Eine raumbezogene Übertragung|Speicherung von Schall wird meist als stereophon bezeichnet. Trotz der Entwicklungen in den letzten zehn Jahren (Dolby Surround, THX, AC-3 usw.) herrscht aber immer noch die zweikanalige, auch binaurale Technik vor. Sie ist jener Fortschritt, der in den 50er Jahren mit der Schallplatte und dem Rundfunk konsequent begonnen wurde. Deshalb ist heute die einkanalige Technik – sie heißt auch monophon, monaural oder einohrig – relativ wenig in Gebrauch. Von diesen Begriffen sind deutlich die ein-, zwei- oder mehrstimmigen Verfahren zu unterscheiden. Sie

kommen vorrangig im MIDI-Bereich zur Anwendung und bezeichnen dann die Anzahl der verwendeten oder möglichen MIDI-Stimmen (Instrumente). Sie werden auch für die Anzahl der Spuren eines Sequenzers verwendet. Hierbei besteht eine gewisse Analogie zur Speichertechnik. Hier wird die Anzahl der magnetischen Spuren bei der Aufnahme (Mehrspurtechnik) gezählt. Sie entspricht dann meist der Anzahl der eingesetzten Mikrophone (Schallkanäle, Polymikrophonie). Aus ihnen wird erst später das endgültige, mehrkanalige – oft zweikanalige – Klangbild abgemischt. In der zweikanaligen Stereotechnik sind folgende Verfahren in Gebrauch:

1. Die *X/Y*-, *R/L*- (rechts/links) bzw. Intensitätsstereophonie (**Bild 8.16**a) verwendet vorwiegend zwei Nierenmikrophone. Sie befinden sich am gleichen Ort, weichen jedoch in der Richtung so voneinander ab, daß sie die Schallquellen optimal erfassen.
2. Die *M/S*-Stereophonie (mono-stereo bzw. Mitte-Seite) verwendet ein Kugel- (Bild 8.16b) oder Nierenmikrophon (Bild 8.16e) als Hauptmikrophon (*M*). Außerdem befindet sich am gleichen Ort ein Mikrophon mit Achtercharakteristik als Raum- bzw. Stützmikrophon. Es nimmt vorrangig die Raumatmosphäre auf. (»Richtcharakteristik)
3. Die Laufzeitstereophonie (Bild 8.16c) stellt zwei gleiche Mikrophone (Kugel- bzw. Nierencharakteristik) im gegenseitigen Abstand von etwa 50 cm (für ΔT) auf. Hierzu gibt es mehrere Varianten: z. B. die *A/B*-Stereophonie (kopfbezogen, auch Faulkner-Verfahren) mit einem Abstand von etwa 20 cm und die mehr raumbezogene Ambiophonie mit einem Abstand von 25 cm bis 1,5 m. Alle Verfahren werden auch als Delta-Stereophonie-Systeme (DSS) bezeichnet. Sie orientieren sich stärker auf den Klang des Raumes als auf die Richtung der Schallquelle.
4. Die Jocklinmethode (*OSS*-Verfahren = optimales Stereo-Signal; Bild 8.16d) verwendet zwei (meist) Kugelmikrophone im gegenseitigen Abstand von 17,5 cm. Sie werden durch eine etwa 30 cm große, runde und mit Dämmaterial versehene Scheibe (Jocklinscheibe) getrennt.
5. Die Kunstkopfstereophonie (Bild 8.16h) benutzt einen nachgebildeten menschlichen Kopf, den Kunstkopf. In ihm sind zwei Mikrophone so eingebaut, daß sie möglichst genau den Schalldruck und die Schallrichtung so aufnehmen, wie sie unmittelbar am Anfang des menschlichen Gehörgangs auftreten. Die hiermit gemachten Aufnahmen sind sehr wirkungsvoll, jedoch nur mit Kopfhörern gut wiederzugeben.

Zueinander gut kompatibel sind nur die Verfahren 1. und 2. Durch Matrizierung (Bild 8.16f) sind die Signale ineinander überführbar. Das *M/S*-Verfahren hat außerdem den Vorteil, daß sein *M*-Signal zugleich ein gutes monophones Signal ist. Dadurch besteht die Möglichkeit der Abwärtskompatibilität. Sie wird u. a. beim UKW-Stereo-Rundfunk genutzt. Bei den Verfahren 3. und 4. ist es nicht möglich, ein gutes Monosignal zu gewinnen. Sie verlangen immer die zwei Schallkanäle. Für die vier ersten Verfahren ist die Wiedergabe über Kopfhörer oder in der typischen Lautsprecheraufstellung von Bild 8.16g günstig. Die Lautsprechervariante besitzt jedoch eine begrenzte Stereo-Hörfläche. Sie ist im Bild 8.16g eingezeichnet. Der innerste Teil gestattet eine sehr gute Lokalisierung der ursprünglichen Schallquellen. Für die gerade noch brauchbare äußerste Grenze sind im Bild einige Maßzahlen angegeben. Für die optimale Aufstellung der Lautsprecher gibt es viele mehr oder weniger brauchbare Faustregeln. Doch letztlich bestimmen der gewünschte Eindruck und die Erfahrung die beste Lösung. In jedem Fall sollten beide Lautsprecher gleich weit von den Wänden des Raumes entfernt sein und sich etwas unterhalb der Augenhöhe befinden. Der Abstand beider Lautsprecher wird als Basisbreite bezeichnet. In Normalfall kann eine lokalisierbare Schallquelle nur vor dem Hörer und zwischen den beiden Lautsprechern liegen. Wenn die Lautsprecher aber gegenphasig Schall abstrahlen (falsche Polung eines Lautsprechers), geht die Mittenortung verloren und es treten „ungewöhnliche" Raum- und Halleffekte auf. Der Raumeindruck kann durch zwei rückwärtige Lautsprecher zusätzlich erhöht werden. Sie strahlen gegenphasig das (Mitten-) Monosignal ab. Man spricht dann von Pseudoquadrophonie. Derartige Zusatzkanäle werden gezielt bei Dolby Surround, THX, AC-3 usw. genutzt. Sie übertragen dann aber spezielle Signale. Sie werden z. T. als getrennte Signale oder aber in die üblichen zwei Kanäle hineinkodiert übertragen. Dabei werden auch bewußt Laufzeiteffekte genutzt. Verfahren mit mehr als zwei „echten" Kanälen, wie z. B. Eidophonie oder Quadrophonie konnten sich trotz vieler Versuche im Heimbereich bisher nicht etablieren. Eine gewisse Anwendungsbreite – insbesondere

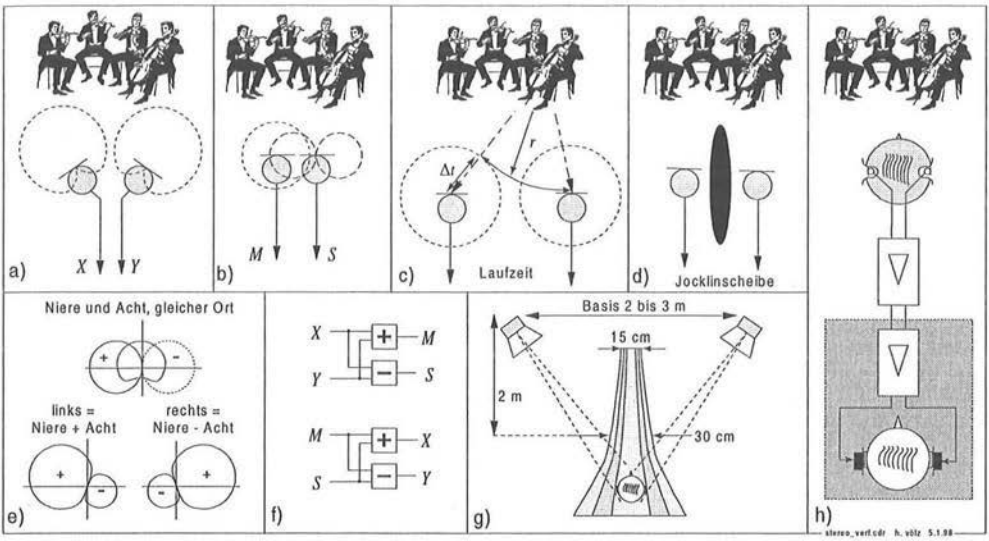


Bild 8.16 Zusammenstellung der zweikanaligen Stereoverfahren

beim Fernsehen und für spezielle CDs – hat in den letzen Jahren der Kino-Raumklang (Surround-Sound) erreicht. Eine weitere Zunahme ist mit der DVD zu erwarten. Auf Simulationstechniken im virtuellen Raum wird noch bei den Lautsprechern (S. 256ff.) eingegangen.

8.5.6 Musik- und Spracherkennung

Für die akustische Mensch-Technik-Schnittstelle sind heute drei Anwendungen wichtig:

- die Steuerung eines Systems mittels Sprache,
- die Umwandlung von gesprochenem in ASCII-Text,
- die Notenerkennung bei Gesang und Instrumentenspiel.

Es ist eigentlich erstaunlich, das **Notenerkennungs**systeme erst in den letzten paar Jahren verfügbar wurden. Die Notenschrift gibt es seit etwa 1300 in Europa. Der Taktstrich kam später hinzu. 1982 wurde international der MIDI-Code eingeführt. Er legt ähnlich dem ASCII-Code in Bytes die Tonhöhe, Tonlänge und Lautstärke fest. Seit vielen Jahren ist er auch Basis für den automatischen Notendruck. Für die akustische Eingabe genügt es daher, die jeweils aktuelle Grundfrequenz herauszufiltern. Aus ihr folgt dann unmittelbar die Note (Tonhöhe). Aus der Dauer der Schwingung folgt die Notenlänge und aus dem Pegel die Intensität (Lautstärke). Damit sind alle Parameter für eine Melodie genau festgelegt. Sie können sofort als digitales Midi-Signal und damit auch für den Notendruck verwendet werden. Deutlich schwieriger wird das bei mehrstimmiger Musik. Aber auch dies ist erheblich einfacher als Spracherkennung. Es dürfte nicht einmal aufwendig sein, aus der Intensität der Obertöne und den Einschwingvorgängen sogar auf die richtigen Instrumente zu schließen. Dennoch sind hierzu keine Systeme bekannt. Besteht dafür kein Bedarf? Ist das Einspielen mit einem Midi-Instrument doch effektiver? Zu beiden Fragen ist keine Antwort bekannt.

Bei Spracherkennung wird immer das Diktieren als Paradebeispiel benutzt. Die **sprachgesteuerte Befehlseingabe** ist technisch deutlich einfacher. Hier werden wenige (10 bis 100) stereotypische Floskeln als Befehle benutzt, z. B. „What can I say", „Where can I go". Sie sind einmal leicht aus anderen Geräuschen herauszufiltern. Zum anderen dürfen sie auch kaum in der Umgangssprache vorkommen. Nur so lassen sich unbeabsichtigte Steuerungen vermeiden. Solche Eingabemöglichkeiten erscheinen heute fast nur als „Nebenprodukt" bei den Diktiersystemen, bestenfalls noch in Systemen

für Behinderte. Es ist auch eine komfortable Oberflächensteuerung möglich. Mit der jetzt verfügbaren hohen Rechenleistung etablieren sich erste Erkennungssysteme auch im PC-Bereich. Einige Experten behaupten nun, daß hiermit eine neue Ära in der Datenverarbeitung einsetzt, die durchaus mit der Einführung der Maus vergleichbar sei. Es werden jedoch keine Argumente dafür genannt. Vergleicht man damit die oben durchgeführte Analyse zur Maus, so sind zumindest zur Zeit keine klaren Kriterien oder spezifischen Eigenschaften dafür zu erkennen. Es sei denn, daß sich der schon mehrfach beklagte „Analphabetismus" einiger junger Menschen massiv vervielfacht. Überzeugender ist da schon ein anderes Argument. Diktierende Sprachverarbeitung dürfte kaum in Großraumbüros möglich werden. Da sie aber in einigen Fällen (s. u.) erhebliche Einsparungen bringt, wäre so ein Ende der Großraumbüros vorbereitet. Ein Arzt erstellt z. B. täglich 50 bis 75 Berichte. Aus zusätzlichen Abschätzungen wurde ermittelt, daß bei ihm mit der klassischen Technik die Schreibmaschinenzeile ca. 0,35 DM, also die A4-Seite 12 DM kostet. Durch ein automatisches Spracherkennungssystem wären im Jahr also rund 20 000 DM einzusparen [LAT]. Dabei ist noch nicht eingerechnet, daß der heute übliche Verzug von etwa einer Woche, bis der Bericht seinen Adressaten erreicht, entfiele. Allein dieser Zeitgewinn könnte für Patienten zusätzliche, kaum einzuschätzende Vorteile bei der Behandlung ergeben. Aber bereits die obige Analyse bezüglich der Maus bestätigte eine sehr allgemeine Erfahrung. Eine breit eingeführte Technik verschwindet nie ganz. Sie wird im ungünstigsten Falle in eine Lücke abgedrängt. Die wenigen dafür bekannten Beispiele sind Dampfmaschine, Zeppelin, Glühstrumpf, Lochkarte und Elektronenröhre (vgl. Bildröhre, S. 205ff). Genau in diesem Sinne blieb auch, trotz aller Vorteile der Maus die alte Technik der Tastenbefehle zusätzlich erhalten. Daher ist es sehr wahrscheinlich, daß selbst dann, wenn die Sprachverarbeitung eine große Breitenwirkung erreichen sollte, die Tastatureingabe von Texten weiterhin Bestand haben wird. Man hat beim Sprechen die Hände und Augen frei verfügbar. Mit einem drahtlosen Telefon ist man nicht einmal an einen Platz gebunden. Nachteilig dürfte es aber immer bleiben, daß ein gesprochenes Wort erheblich mehrdeutiger als ein „getippter" Text ist. Beim Erlernen einer Fremdsprache ist ein Textverarbeitungssystem aber gerade durch seine Schwächen vorteilhaft. Damit der Rechner Wörter versteht, muß man sie exakt aussprechen. Weiter kann man mit einem technischen System nach Herzenslust üben.

Es gibt noch ein Gebiet, daß der Befehlseingabe näher als der folgenden ASCII-Umwandlung steht. Es ist das *Word Spotting*. Es ist hierzu viel zu wenig bekannt. Meist wird darüber der Mantel des Schweigens gelegt. Auch hier genügt es, nur wenige ausgewählte Wortsequenzen zu erkennen. Allein die folgenden Beispiele weisen Ziele dieses Verfahrens aus. Gesprochene Texte werden auf Wörter wie „Bombe", „Geldtransfer", „Plutonium", „Sex" usw. gefiltert. Wenn sie auftreten läuft ein bestimmter Automatismus ab. Kindern und Gefährdeten kann hierdurch z. B. Schutz gegeben werden. Aber auch die Überwachung und Spionage sind so sehr perfekt möglich. Treten solche „Keywords" auf, so wird das Gespräch automatisch gespeichert und einer genaueren Analyse unterzogen. Natürlich wird es auch zur Verbrechensbekämpfung eingesetzt.

Der Beginn von **Sprachverarbeitung** ist bei der automatischen Übersetzung zu sehen. 1954 begann man in den USA mit der IBM 701 die Prawda regelmäßig automatisch von russisch nach englisch zu übersetzen. Wenig später geschah das gleiche in der damaligen Sowjetunion für die New York Times ins russische. Die anfänglichen Erfolge waren groß, doch langfristig konnte keine hinreichend befriedigende Lösung erreicht werden. So wurden um 1965 auf beiden Seiten die Vorhaben eingestellt. Man glaubte nämlich anfangs, von der Syntax über eine Semantik und Pragmatik eine immer bessere Lösung zu gewinnen. In diesem Sinne ist es selbst heute noch üblich, folgende Komponenten einer Lautsprache zu unterscheiden, die sich hierarchisch überlagern sollen:

- *Phoneme* sind die kleinsten bedeutungsunterscheidenden Lauteinheiten (s. S. 77f.). Aus ihnen werden durch Aneinanderfügen in einer bestimmten Reihenfolge Morpheme gebildet.
- *Morpheme* sind die kleinsten bedeutungstragenden Einheiten. Durch Kombination bildet man aus ihnen die Wörter.
- *Wörter* sind einzelne, meist mit Bedeutung versehene, in sich abgeschlossene Einheiten. Ihre Gesamtheit bildet das Lexikon einer Sprache.
- Die *Syntax* begrenzt die zulässigen Kombinationen von Wörtern beim Bau von Sätzen. Sie regelt u. a. dabei die Variation von Endungen. Umgangssprachlich heißt sie Grammatik.

- *Semantik*, die alle lexikalischen Einheiten und Sätze mit einem Sinn | einer Bedeutung | einem Inhalt verknüpft.
- Die *Prosodie* ergibt sich aus den Betonungsmustern und Tonhöhenverläufen. Dadurch kann die wörtliche Bedeutung der Wörter und Sätze modifiziert werden.
- *Diskurs* | *Kontext*. Sie stellen die Sätze eines gesprochenen Textes in einen Gesamtzusammenhang.

Zwei Beispiele mögen andeuten, daß auf der unteren Ebene dieses Modell allgemeingültig ist. Im Englischen gibt es 40 Phoneme, die zu den über 8000 Silben kombiniert werden. Die chinesische Sprache kennt dagegen nur 1300 phonetisch unterscheidbare Silben und bereits 47 Silben machen schon die Hälfte aller benutzen Silben aus. Aber um 1965 wurde dann klar, daß sich mit der Hierarchie keine brauchbare Übersetzung stufenweise aufbauen läßt. Von vornherein muß ein umfassender Kontext existieren, der sich zudem als äußerst kompliziert erwies. Ein typisches Beispiel ist hierfür der Satz „Er schlug den Jungen mit der Mütze". Wurde nun der Schlag mit der Mütze ausgeführt oder hatte der geschlagene Junge eine Mütze auf? Andere Beispiele sind die Metaphern, z. B. „der Apfel fällt nicht weit vom Stamm". Auch bei der automatischen Spracherkennung glaubten viele Experten lange Zeit mit formalen Regeln arbeiten zu können. Um so erstaunlicher ist es, daß man bereits in den 50er Jahren im IBMs „Thomas J. Watson Research Center" mit der heute bei IBM üblichen, völlig anders gearteten Sprachverarbeitung begann. Die Erkennung benutzt eine betont statistische Methode, nämlich die Korrelation des Klanges von Wörtern. Allerdings wurde das Vorhaben ebenfalls in den 60er Jahren eingestellt. Der Grund war jedoch nicht theoretischer sondern praktischer Natur. Die verfügbare Rechenkapazität ließ das Vorhaben als unmöglich erscheinen. Auf Initiative von Peter Welch (IBM) wurden mit der gewaltig gewachsenen Rechenleistung die Arbeiten 1971 erneut aufgenommen. Jetzt sind die Erfolge auch auf dem PC verfügbar.

Bei der **Spracherkennung** als ASCII-Umwandlung im Sinne einer Diktiertechnik muß ein Datenstrom von etwa 0,2 MBit/s auf etwa 100 Bit/s reduziert werden. Bereits heute können mit guter Diktiertechnik bis zu hundert Wörter je Minute erkannt werden. Das ist mehr, als eine Spitzensekretärin zu leisten vermag. Dafür sind aber mindestens 30 MIPS (Millionen Instruktionen pro Sekunde) erforderlich. Daher gibt es Leistungsstufen mit z. T. deutlich geringerem Aufwand:

- *Eingeschränkter* Wortbereich, z. B. zur Eingabe von Zahlen, Fachtermini, Wortlisten, Telefonnummern, Auskunftsdiensten (Bahn-, Flugverkehr), Inventur usw.
- Diktat mit streng *abgesetzten Wörtern*. Es genügen Pausen von 100 bis 200 ms. Sie entstehen meist automatisch bei einem betont langsamen und deutlich artikulierten Sprechen.
- *Fließend gesprochener Text*. U. a. treten zusätzlich Probleme durch folgende Einflüsse auf: *Komposita* wie „Donaudampfschiffahrtsgesellschaftskapitän", *Mehrdeutigkeiten*, z. B. „mehr" ⇔ „Meer" und in „Wenn Fliegen hinter Fliegen fliegen, fliegen Fliegen Fliegen nach" oder „Der geliebte Floh" ⇔ „Der Geliebte floh", Vorsilben und *verschluckte* | *verschlissene* Endsilben.

Sie werden zusätzlich durch davon unabhängige Forderungen ergänzt:

- Sprecherabhängigkeit: ja|nein.
- Notwendigkeit eines Trainings. Es ist zur Erhöhung der Erkennungsrate grundsätzlich nützlich, bedeutet aber einen z. T. recht erheblichen Aufwand. Bei Voicetype von IBM sind z. B. 251 Sätze im Einzelwortmodus (also mit Pausen) zu sprechen, evtl. sogar wiederholt.
- Einfluß von störendem Umgebungsschall, Echo, Hall usw. Hierfür bieten sich Zusatzverfahren an, die weiter unten beschrieben werden.

Diktier- und Spracherkennungssysteme arbeiten heute nach verschiedenen Methoden:

1. Beim *linear predictive coding* (LPC) wird das Signal des akustisch erzeugten Formants durch ein Filter modelliert, welches durch etwa zehn Koeffizienten definiert ist. Hinzu kommen noch Parameter für Sprachfrequenz, Amplitude und stimmhafte oder stimmlose Artikulation.
2. Die *dynamische Programmierung* arbeitet mit Kurzzeitvektoren, die aus den Sprachsignalen abgeleitet werden (s. u.): Sie werden mit vorhandenen Mustervektoren verglichen. Es wird jenes

Wort gewählt, das den kleinsten Abstand im Merkmalsraum hat. Über einen rekursiven Algorithmus kann zusätzlich iterativ ein besseres Ergebnis erzielt werden.

3. Bei *Hidden-Markow-Modellen* (HMM) wird die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen den Wörtern ausgenutzt. Ist T die Länge der Wörterkette und sind n die möglichen Zustände, so sind $2 \cdot T \cdot n^T$ Rechenoperationen auszuführen. Selbst bei einem kleinen Modell mit $n = 5$ und $T = 100$ sind es bereits 10^{72}. Daher wird in der Praxis immer ein verkürztes Modell angewendet. Außerdem benötigen sie meist eine Trainingsphase. Das Wort „hidden" (versteckt) wird deshalb hinzugefügt, weil man nicht bemerkt, welche Übergänge durchlaufen wurden.
4. Bei der Erkennung mit *neuronalen Netzen* werden in der Lernphase Eingangsmuster und dazugehörende Wörter zugeführt. Dabei bilden sich schrittweise Gewichte in den Knoten aus. Sie berücksichtigen auch die Wahrscheinlichkeiten. Nach der Lernphase ergibt sich dann eine überwiegend richtige Zuordnung eingehender Muster zu den Wörtern.

Die heute verfügbaren Spracherkennungssysteme kombinieren in unterschiedlicher Weise zumindest einige dieser Varianten. Sie verwenden praktisch nur noch Wörter als Muster. Der typische Wortschatz liegt bei 20 000 bis 50 000. Er kann meist individuell oder durch Zukauf um fachspezifische Wörter – z. B. für Gynäkologie, Innere Medizin, Wirtschaft, Recht usw. – deutlich erweitert werden. In einigen Fällen wird zwischen einem aktiven, im RAM befindlichen Lexikon, und einem passiven auf der Festplatte unterschieden. Je nach Gebrauch erfolgt zwischen ihnen ein Austausch. Nicht oder wenig benutzte aktive Wörter werden passiv, oft benutzte zusätzlich geladene aktiv. Weil das Sprachsignal für etwa 20 bis 40 ms stationär ist, werden allgemein Zeitscheiben von etwa 10 ms zur weiteren Analyse genutzt. Mittels der schnellen Fouriertransformation (FFT) wird je Zeitscheibe in etwa 20 Kanälen ein Merkmalsvektor gebildet. Ein oder mehrere solche Vektoren bestimmen einen Laut, ein Phonem. Relativ einfach sind hierüber die Vokale zu erkennen. Gemäß S. 77 genügen dafür meist zwei Frequenzen. Weiter zeigt sich, daß für die Erkennung eines Wortes etwa 30 bis 100 Einzelmerkmale ausreichen. Weitere Details seien im folgenden am Beispiel von IBMs Voicetype erklärt. Dabei ist zu beachten, daß die dazu gehörende Sprachsteuerung *Voicetype Navigation* allerdings auf der Erkennung von kontinuierlicher Sprache beruht:

- Das Signal wir in 10-ms-Scheiben zerschnitten. Die n Frequenzbänder erzeugen mit ihren Pegeln einen Vektor im n-dimensionalen Raum. Aus vielen Untersuchungen ergab sich, daß sich für diese Vektoren Cluster bilden lassen. Voicetype benutzt rund 2000.
- Mit den erkannten Wörtern werden über die vorhandenen Markoff-Ketten Hypothesen gebildet und als eine Zustandsfolge gespeichert. Je Wort liegen dann noch ca. 150 Varianten vor.
- Im Modell sind weiter typische Abfolgen von Wörtern als Bi- und Trigramme gespeichert. Dadurch kann die mögliche Wortzahl bereits auf etwa 20 eingeengt werden. Über zusätzliche Hypothesen erfolgt eine weitere Einengung. Das wahrscheinlichste Wort durchläuft dann noch einmal die Analysestrecke. So entsteht schon hier eine Erkennungsrate bis zu 98 %.
- Eine nachgeschaltete Rechtschreib- und Grammatikprüfung reduziert weiter und nimmt auch die für das Deutsche typische Groß- und Kleinschreibung vor.

Taube können Sprache von den Lippen ablesen. Das bietet einen Ansatz zur Spracherkennung über die Videotechnik [KRO]. Zumal ja heute schon oft auf dem Monitor eine Videokamera steht. Allerdings sind Lippen durch ihren geringen Kontrast zur Umgebung schwer zu erkennen. Deshalb sind zusätzliche Informationen, wie Symmetrie und eine Parabelbeschreibung der Lippenform, sehr nützlich. Wichtige Parameter sind Lippenöffnung, Kurvenform usw. Sie liefern die Basis für Viseme (statt Phoneme). Ein beachtlicher Gewinn wäre noch durch eine seitliche Kamera möglich, welche zusätzlich die Lippenwölbung erkennt. Im Beispiel [KRO] wurden 3 Parameter für den Parabelbogen der Lippen und 6 Parameter für die Lippenöffnung benutzt. Die gegenüber befindliche Tabelle weist dafür die Erkennungsraten bei Vokalen aus. In der linken Spalte stehen die zu erkennenden Vokale und oben die erkannten. Die Werte in der Tabelle sind Prozentzahlen und gelten der Reihe nach für: Lippenkontur allein | für Fläche, Umfang und Lippenkontur | für die einfache akustische LPC-Technik akustisch. Hieraus wird deutlich, daß in der beschriebenen Form die Videotechnik allein keine

Spracherkennung ermöglicht. In Kombination mit einer akustischen Spracherkennung sind aber beträchtliche Verbesserungen oder Vereinfachungen zu erwarten.

	a	e	i	o	u
a	45 | 75 | 94	20 | 5 | 1	5 | 20 | 0	0 | 0 | 5	30 | 0 | 0
e	5 | 15 | 13	20 | 30 | 43	65 | 55 | 43	0 | 0 | 1	10 | 15 | 0
i	0 | 10 | 4	10 | 5 | 3	90 | 75 | 90	0 | 0 | 3	0 | 0 | 0
i	15 | 0 | 4	0 | 0 | 0	0 | 0 | 4	40 | 50 | 69	45 | 50 | 23
u	20 | 0 | 1	5 | 0 | 1	0 | 0 | 0	25 | 35 | 24	50 | 65 | 74

Durch gleichzeitigen Einsatz mehrerer (≤ 10) Mikrophone als Array kann eine sehr effektive Geräuschreduktion erreicht werden. Die Signale lassen sich so zusammenschalten, daß die Sprache addiert wird und gleichzeitig viele Störungen kompensiert werden. Dieses Zusammenfassen kann sogar automatisch und dynamisch nachgeführt werden. Es liegt dann so etwas wie eine adaptive Richtwirkung zur Verbesserung des Sprachsignals vor.

8.6 Bildaufnahme

8.6.1 Geschichte

Vor etwa 50 000 Jahren machten die Menschen die ersten bildlichen Darstellungen. 1420 findet der Italiener Filippo Brunelleschi Grundregeln der Perspektive. 1425 wendet sie Tomaso die Giovanni Masaccio bei dem Fresco der Trinität (Dreifaltigkeit) in der Santa Maria Novelli in Florenz als erster Künstler an. Die nachweislich erste technische Abbildung machte am 19.7.1822 Joseph Nicéphore Niépce mit einem Loch in der Wand seines Zimmers auf einer mit Asphalt beschichteten Zinkplatte. Die Belichtungszeit dauerte noch etwa zwölf Stunden. Den ersten auch für Laien handhabbaren Photoapparat (Box) schuf jedoch erst 1888 der Kodak-Gründer George Eastman. Um 1925 entwikkelte schließlich Oskar Barnack die erste Kleinbildkamera, die Leica. Um 1936 entstand die Spiegelreflexkamera. Weiter kam ab den 50er Jahren die automatische Belichtung und Fokussierung hinzu. Doch seit mehreren Jahren stagniert der Markt für Kameras und auch der für die Zahl der „verknipsten" Bilder. Trotz des unverkennbaren Trends zur elektronischen Photographie (s. u.) führten mehrere Firmen im März 1996 das APS (Advanced Photo System) als neues chemisches Photoformat ein. Es verlangt nicht nur neue Photoapparate. Vielleicht trug hierzu auch Kodaks ökonomischer Mißerfolg mit der Photo-CD von 1992 bei.

Die elektronische Bildaufnahme begann zunächst nur mit dem Nachweis von Licht. So beobachteten 1873 May und Smith die Fotoleitung bei Selen und 1888 Hallwachs den äußeren lichtelektrischen Effekt. 1893 erfanden Geitel und Elster die Photozelle. Jedoch nicht Bilder führten hier zum weiteren Fortschritt, sondern das Fernsehen stellte die Forderungen auf. Da hier nur *ein* zeitliches Signal zu übertragen war, mußte von der parallelen Bildtechnik zur sequentiellen Abtastung übergegangen werden. Hierzu erfolgten schon sehr früh rein mechanische Versuche. So entwickelte bereits 1884 Paul Nipkow die nach ihm benannte rotierende Nipkow-Scheibe mit spiralförmig angebrachten Löchern. Sie und auch weitere Varianten, wie das Spiegelrad, lieferten kaum erkennbare Bilder. Die erste wirklich elektronische Variante ist das 1923 von Zworykin entwickelte Ikonoskop. Es ist eine speziell dazu aufbereitete Röhre. Ein guter Überblick zu den Anfängen ist in [VIL] enthalten. Hierzu entstanden vielfältige und deutlich verbesserte Varianten. Diese elektronischen Kameraröhren bestimmten bis mindestens 1985 die Aufnahmetechnik des Fernsehens.

Der erste CCD-Sensor entstand zwar schon um 1960. Doch den wichtigen Ladungstransfer fanden F. L. J. Sangster, W. S. Boyle und G. E. Smith erst 1969. Bereits 1970 wiesen Boyle und Smith auf die optische Anwendung hin. Noch im selben Jahr stellte Bell Labs den ersten Prototyp vor. Die erste kommerziell verfügbare Kamera kam 1975 von der RCA. Sie enthielt bereits 160000 Pixel. Schon 1979 erschien der erste Camcorder. Bei ihm waren aber noch Kamera und Speicher getrennt. Der erste farbtüchtige CCD-Sensor erschien 1982 bei Hitachi mit 180000 Pixel. 1985 erschienen dann echte Camcorder mit nur noch einigen kg Masse. Die weitere Entwicklung der Videotechnik mit CCD-Matrizen verlief überwiegend quantitativ. Es entstanden keine revolutionären Neuerungen mehr. Auch das professionelle Fernsehen wandte immer intensiver diese Technik an.

Die neue Ära der Photographie begann mehr versteckt als öffentlich. Auf der jährlichen und wichtigsten Tagung aller Magnetiker, der Intermag, stellte Sony im Juni 1982 seine Mavica vor. Da ein Vortrag nicht ins offizielle Programm gelangt war, geschah das wenige Male in einem kleinen Kreis in einem Hotelzimmer. Äußerlich war die neue Kamera nicht von einer üblichen Spiegelreflexkamera zu unterscheiden. Auf einer 2-Zoll-Diskette konnten 50 Bilder im High-Band-Video-Format aufgenommen werden. Die damals ausgeprägte Ressourcendiskussion fand auch hier ihren Niederschlag. In den Jahren zuvor waren die Silberpreise erheblichen Schwankungen und Steigerungen unterworfen. Der Slogan „hundert Jahre Silberphotographie ist genug" machte die Runde. Die Elektronik wird alles viel einfacher und universeller bringen. Journalisten können ihre Bilder direkt und extrem schnell als Signale in die Redaktion übertragen. Die Bildverarbeitung ermöglicht zusätzlich völlig neue Wege und, und ... Der Begriff Still-Video entstand. Die Kamera wurde dann auch erfolgreich bei der nächsten Olympiade benutzt. Aber ansonsten war ihr kein Erfolg beschieden. Dennoch versuchte Canon den Weg im Konsumbereich. Eine gewisse Verbreitung erreichte die ab 1986 produzierte RC 260. Über eine spezielle Schnittstellenkarte waren die Bilddaten direkt in den Rechner übernehmbar und so ließ sich auch die Kamera gut fernsteuern. Mit einer CCD-Matrix von 470000 Pixel forderte sie allerdings einen, für damalige Zeiten sehr leistungsfähigen Rechner. Wenig später gab es die noch leistungsfähigere Variante RC 560 mit Zoom, Autofocus usw. Dennoch, war die Revolution nicht in Sicht. So blieb diese Technik bis etwa 1995 nur Spezialisten vorbehalten. Dann setzte der digitale „Boom" ein. Nicht mehr analoge frequenzmodulierte Videoaufzeichnung auf Diskette, sondern die direkte digitale Speicherung zog ein (Details Abschnitt 8.6.5 ab. S. 185). Noch ist aber nicht entschieden, ob dadurch die klassische Photographie verschwindet. Es wird wohl eher ein friedliches Nebeneinander mit einer deutlichen Abgrenzung der Anwendungsbereiche entstehen. Beide haben ihre Vor- und Nachteile.

Neben der Photographie und Videotechnik muß aber auch das Scannen und Zeichnen (Malen) zu den bilderzeugenden Verfahren gezählt werden. Doch hier sind die geschichtlichen Daten weniger spannend. Schon mit den ersten Rechnern gab es – wenn auch ganz simple – Zeichenprogramme. Scanner für elektronische Bilder gab es mit Beginn des elektronischen Publizierens (DTP). Als Beginn der Breitenanwendung wird hier meist 1987 angesehen, als der Pagemaker auf McInstosh zur Verfügung stand. Die ersten Scanner arbeiteten, da es zunächst keine CCD gab, mit SEV. In den privaten Bereich zogen die Scanner um 1990 ein.

8.6.2 Systematik

Der Begriff „Bild" ist äußerst vielfältig und keineswegs so klar definiert, wie es zunächst intuitiv erscheint. Zu den Bildern gibt es eine lange Geschichte, die auch deutliche Tabus, z.B. bezüglich der Darstellung von Menschen enthält. So waren (sind) im Islam Bilder nicht zulässig. Auch soll man sich kein Bild von Gott machen. Doch selbst die „rationale" Wissenschaft ist davon nicht verschont geblieben. Von altersher gab es in der Mathematik zwei getrennte Richtungen: Arithmetik und Geometrie: 1637 schuf Descartes mit dem Buch „Le geometrie" die Verbindung zwischen beiden. Nun konnte alles geometrische berechnet werden. Daraufhin verschwanden schrittweise die Bilder aus der Mathematik. Einige Mathematiker waren darauf stolz, kein Bild in ihren Lehrbüchern zu benutzen. Nur mit der axiomatischen Methode waren, ihrer Meinung nach, korrekte Beweise möglich. Erst seit einigen Jahren kehren die Bilder auf vielfältige Weise wieder, z. B. als Pictogramme und als sprachunabhängige Symbole. Dies ist u.a. deutlich im Sport und bei Orientierungshilfen aller Art, wie Toilette und Geldwechsel. Weiter hat man entdeckt, daß sich mit graphischen Veranschaulichungen (Präsentationen) überzeugen, ja Macht ausüben läßt. Die Fülle der Bilder ist auch so groß, daß eine allgemeingültige Systematik schwer fällt. Hier werden daher nur die für die Rechnereingabe relevanten Varianten betrachtet. Bilder kommen hauptsächlich in folgenden Varianten vor.

- **Pixelbilder**, bei denen ein regelmäßiges quadratisches oder rechteckförmiges Raster die Lage der einzelnen Bildpunkte (Pixel von picture element) festlegt.
- **Vektorbilder**, welche mit Hilfe geometrischer Konstruktionen aus den Koordinaten für Linien, Kreise, Rechtecke, Schraffuren usw. erzeugt werden.

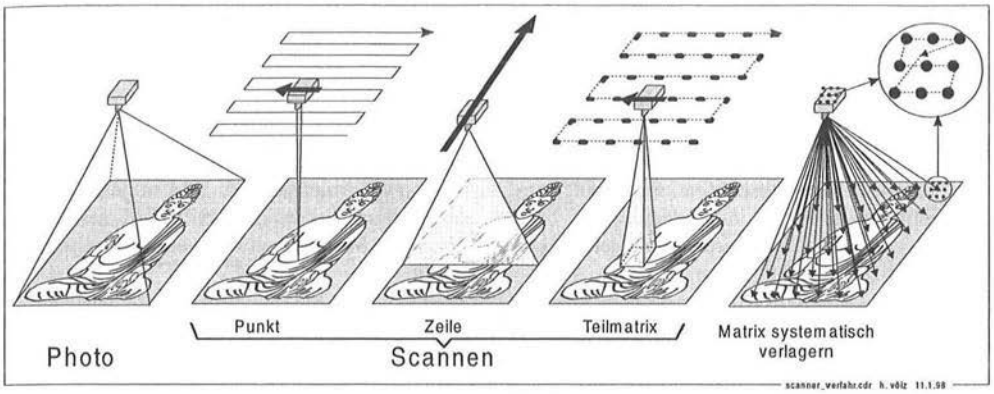


Bild 8.17 Verschiedene Verfahren zur elektronischen Eingabe von Bildern

- **Fraktale Bilder**, die über Iterationen (Rekursionen) vorwiegend aus selbstähnlichen Strukturen entstehen.

Bei dieser Einteilung steht die „Konstruktion" der Bilder im Vordergrund. In gewissem Umfang gilt sie auch für die Dateiformate der Bilder. Aber letztlich werden heute fast alle elektronischen Bilder als Pixelbilder auf Anzeigen (Bildschirmen) oder im Druck dargestellt. Als Ausnahme existiert heute fast nur noch der Plotter, der betont auf die Vektorbilder ausgelegt ist. Daher kann die weitere Einteilung, bezüglich des Inhalts eines Pixels, seiner Bittiefe, und der ihr zugeordneten Eigenschaften vorgenommen werden.

- 1 Bit liefert reine *Schwarz-Weiß-Bilder*, die auch zuweilen als Strichdarstellungen bezeichnet werden.
- 2 bis 10 Bit (typisch 8 = 256 Stufen) dienen der unbunten *Grau*-Darstellung.
- 2 bis 32 Bit ermöglichen *farbige* Darstellungen. Bei wenigen Bits wird oft eine *Palette* genau ausgewählter Farben benutzt. Ab 15 Bit ist dies nicht mehr notwendig (vgl. S. 29ff.).
- Ab 32 Bit werden interne dreidimensionale Darstellungen benutzt. Sie ermöglichen die einfache Berechnung einer $2^1/_2$*-dimensionalen*, also quasi räumlichen Darstellung.

Die meisten elektronischen Bilder werden von Objekten oder bereits vorhandenen flächigen Bildern gewonnen. Die zugehörigen Aufnahmetechniken zeigt **Bild 8.17**. Beim Photo (mit CCD-Matrix) werden alle Bildpunkte als Pixel parallel übernommen. Dieser Prozeß geht sehr schnell. Es treten die aus der klassischen Photographie bekannten sehr kurzen Belichtungszeiten von kleinen Bruchteilen der Sekunde auf. Mit einem einfachen Einzel-Sensor (z. B. SEV) wird das Bild dagegen in Zeilen und Spalten punktweise nacheinander übernommen. Dies ist immer noch bei Hochleistungs-Trommelscannern üblich. Eine CCD-Zeile besitzt eine Vielzahl (bis zu mehreren Tausend) seitlich nebeneinander angeordneter Sensorpunkte. Dadurch kann die volle Bildbreite parallel übernommen werden. Es ist nur einen Scannen in Längsrichtung erforderlich. Hierauf beruhen die meisten Flachbett-, Hand- und Durchzugsscanner. Auch Faxgeräte und einige digitale Photoapparate mit sehr hoher Auflösung arbeiten so. Für einige Anwendungen ist die Auflösung der CCD-Matrix nicht groß genug. Dann kommen die beiden letzten Verfahren zum Einsatz. Einmal wird nur ein kleiner Bereich (Teilmatrix) parallel übernommen und danach die Kamera an genau definierte Positionen gebracht. Die zweite Methode bildet das Bild komplett auf die CCD-Matrix ab. Zwischen den lichtempfindlichen Flächen auf der CCD-Matrix bestehen immer Lücken. Sie werden „aufgefüllt", indem die Matrix in verschiedene Positionen gebracht wird. Die beiden letzten Methoden ermöglichen extrem hohe Auflösungen. Auf die Farbtüchtigkeit der Matrizen wird weiter unten eingegangen.

Zur Systematik sind noch einige Ergänzungen vorteilhaft. Sie betreffen die Art der Bilder, insbesondere ihre Dimension. Es sind folgende Möglichkeiten vorhanden:

- inhaltlich *ein*dimensionalen Bilder, wie beim Barcode;
- die bisher behandelten *zwei*-dimensionalen Bilder;
- die schon kurz erwähnten $2^1/_2$-dimensionalen Bilder. Bei ihnen wird die dritte Dimension nur mittelbar über Perspektive, Rendering usw. durch ein zweidimensionales Bild subjektiv hervorgerufen. Dabei ist nicht wesentlich, ob sie rechnerintern aus einem echt dreidimensionalen Modell gewonnen wird. Dies bietet aber zusätzlich die Möglichkeit, schnell unterschiedliche „Ansichten" zu erzeugen.
- *dreidimensionale* Bilder entstehen meist aus zwei zweidimensionalen Bildern, die getrennt beiden Augen zugeführt werden. Hierzu gibt es viele Ausgabevarianten, die im Abschnitt 9.2.10 ab. S. 226 behandelt werden. Eine weitaus leistungsfähigere Methode ist die Holographie. Für sie besteht jedoch auf längere Sicht keine Möglichkeit zu direkten elektronischen Ausgabe.
- Bilder, die sich in der *Zeit* ändern und alle vorgenannten Varianten entsprechend erweitern. Für die in diesem Buch betrachtete Schnittstelle bedeutet das jedoch „nur" deutlich höhere Datenraten. Es treten keine qualitativ neuen technischen Varianten auf. Deshalb wird hier darauf nicht weiter eingegangen.

Schließlich ist noch die eventuelle Umsetzung der Bilder zu erwähnen. Sie betrifft u. a. den Barcode, Text- und Musikerkennung (OCR, s. S. 194f.).

8.6.3 CCD-Sensoren

Die Abkürzung CCD leitet sich von charge coupled device ab. Sie kann inhaltlich durch „Einrichtung mit Ladungsübertragung" übersetzt werden. CCDs zählen zu den neuartigen Bauelementen der Mikroelektronik. Ihre Wirkungsweise ist nur noch in der integrierten Schaltung zu verstehen. Für sie gibt es also kein Analogon mehr, das sich allein durch diskrete Bauelemente, wie Transistoren, Dioden, Widerstände, Photodioden, usw. ausreichend beschreiben läßt. Ihre Hauptanwendungen betreffen die folgenden drei Gebiete:

- **Lichtempfindliche Sensoren** nutzen den inneren Photoeffekt und werden hier weiter behandelt.
- **Schieberegister** für analoge und digitale Schaltungen erscheinen im folgenden mehr nebenbei. Vor allem werden sie als dynamische Speicher hoher Kapazität angewendet.
- **Transversalfilter** dienen der Signalverarbeitung und werden hier nicht behandelt.

Die zu transportierenden Ladungen werden bei den Lichtempfängern über den inneren Fotoeffekt erzeugt. Andere Anwendungen nutzen dazu einen in Durchlaßrichtung betriebenen pn-Übergang. Die Ausgangssignale werden in allen Fällen durch einen in Sperrichtung betriebenen pn-Übergang übernommen. Einige Grundlagen der CCD-Sensoren sind auf den S. 103 ff. und 138ff behandelt. Zur Erklärung ihrer Wirkungsweise wird von Bild **8.18a** ausgegangen. Über einem kompakten, z. B. *n*-leitenden Silizium, befinden sich eine Isolationsschicht (SiO_2) und eine Gate-Elektrode. Durch eine positive Spannung an der Gate-Elektrode muß sich das Fermi-Niveau in der Umgebung der Oxidschicht verändern. Die Höhe des Leitungsbandes muß sich dem Niveau der Gate-Elektrode anpassen. Hierdurch entsteht eine von Ladungsträgern entblößte Zone. Mit der Gate-Spannung ändert sich sowohl die Breite der entblößten Zone als auch die Krümmung des Fermi-Niveaus. In die entblößte Zone können Minoritätsträger (in diesem Fall Löcher) hineingebracht werden. Die dort speicherbare Ladungsmenge hängt von der Dicke d_i, der Dielektrizitätskonstanten ε_i des Isolators, von der wirksamen Tiefe U_p und der Fülltiefe U_{p1} ab:

$$Q \approx \frac{\varepsilon_i}{d_i} \cdot \left(U_p - U_{p1}\right).$$

Diesen Zusammenhang zeigt schematisch der untere Teil von Bild 8.18a. Für die weitere Betrachtung ist es nützlich, die Anordnung um 90 ° zu drehen und gleichzeitig drei Gate-Elektroden nebeneinan-

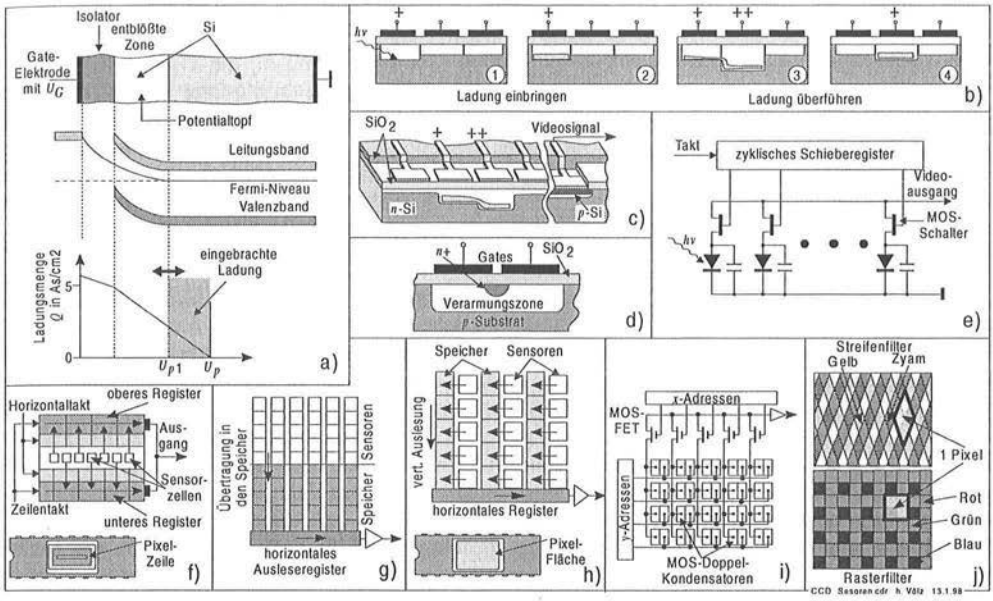


Bild 8.18 Aufbau von CCD-Bauelemtenten und -Sensoren

der anzuordnen. So entsteht der Aufbau von Bild 8.18b. Jetzt ist es günstig, die entblößten Zonen als Potentialtöpfe zu betrachten. Durch Licht ($h \cdot \nu$) können in sie Minoritätsträger eingebracht werden. Sie verhalten sich dann wie eine Flüssigkeit und sammeln sich am tiefsten Ende jedes Topfes. Dabei füllen sie ihn bis zu jener Höhe auf, die ihrer Menge entspricht. Durch unterschiedliche Gatespannungen lassen sich – wie oben gezeigt wurde – Töpfe unterschiedlicher Tiefe erzeugen. Die Minoritätsträger füllen dann zunächst den tiefsten Topf auf. Eine Steuerung der Gatespannung (Topftiefe) erzwingt folglich eine definierte Bewegung der Ladungsträger. Sie ist im Bild 8.18b durch die Stufen ① bis ④ angedeutet. Bei einer großen Anzahl von Gate-Elektroden ist dieser Prozeß durch entsprechende Taktung auch über eine größere Länge möglich. Je nach Technologie kann die Taktung als Zwei-, Drei- oder Vierphasenbetrieb durchgeführt werden. Eine andere Variante benutzt zusätzliche Schieberegisterketten und Gates (Bild 8.18e). Dann sind die lichtempfindlichen Zellen als Photodioden zu betrachten, die bei Lichteinfall einen Kondensator aufladen. Seine Spannung wird über einen FET zum Ausgang geleitet. Der eigentliche Ladungstransport ist jedoch einfacher. Bei ihm treten natürlich Verluste auf. Die beiden wichtigsten Varianten sind:

- Wenn die Ladungen zu lange unter einer Elektrode stehenbleiben, dann erfolgt eine Rekombination mit thermisch generierten Majoritätsträgern. Die Zeit für das sich dabei einstellende *thermische Gleichgewicht* hängt u. a. von der Breite der verbotenen Zone, von der Temperatur und von der Art der Minoritätsträger ab. Die Elektronen der *p*-Substrate sind meist vorteilhafter als Löcher der *n*-Substrate. Die typische Zeit liegt zwischen 100 µs und einigen Minuten.
- Besonders an den Oberflächen eines Halbleitermaterials treten *Haftstellen* auf. Sie halten oft die Minoritätsträger länger fest. Dadurch gelangen einige Ladungen schneller zu einem Ort, als sie sich von dort entfernen können. Die Oberflächenstörstellen können u.a. durch einen vergrabenen Kanal (burried channel, bulk-CCD) reduziert werden. Die Wirkung der Haftstellen kann dadurch deutlich gemindert werden, daß immer eine Grundladung (fat zero) von ca. 10 % des Maximums transportiert wird. Sie kann nämlich ohne störenden Einfluß an den Haftstellen „hängen" bleiben. Allerdings wird dadurch der Dynamikbereich für die zu transportierenden Ladungen eingeschränkt.

Beide Effekte sind gegenläufig. Sie bewirken einen eingeengten Zeitbereich, in dem ein hinreichend verlustarmer Transport der Ladungsträger möglich ist. Typische Werte für die Taktung liegen zwischen einigen kHz und mehreren MHz. Ein wesentliches Kennzeichen für die Güte von CCD-Bauelementen ist der Übergangsverlust ε je Stufe. Er liegt bei 10^{-3} ohne und bei 10^{-4} mit fat zero und mit begrabenem Kanal bei 10^{-5}. Bei einem zulässigen Gesamtverlust V gilt dann für die Anzahl n der möglichen Stufen

$$1-V=(1-\varepsilon)^n \quad \text{bzw.} \quad n=\frac{\ln(1-V)}{\ln(1-\varepsilon)}\approx\frac{V}{\varepsilon}.$$

Heute werden Bauelemente mit vielen tausend Stufen hergestellt. Am Ende der CCD-Kette kann die Ladung durch einen Kollektor (in Sperrichtung betriebener *pn*-Übergang) in Strom umgewandelt werden. So entsteht ein Aufbau, wie ihn Bild 8.18c ausschnittsweise zeigt. Wird dieses Prinzip nun durch lichtempfindliche Abschnitte (Sensoren) ergänzt, so entsteht z. B. eine *CCD-Zeile* gemäß Bild 8.18f. Viele einzelne lichtempfindliche Sensorzellen sind hier in einer Reihe angeordnet. Ihre Größe liegt im µm-Bereich. Werden sie vom Licht getroffen – es kann von der Rück- oder Vorderseite kommen – so sammeln sich in ihnen die erzeugten Ladungsträger. Hierfür muß ein begrenzter Zeitraum gewählt werden. Mittels der o. g. Schiebestrukturen werden dann die Ladungen getaktet abwechselnd ins obere bzw. untere Schieberegister übertragen. Anschließend werden beide Register abwechselnd getaktet ausgelesen. Am Ausgang entsteht so eine Signalfolge, die genau der Lichtmenge in der Reihenfolge der einzelnen Sensorelemente entspricht. Das äußere Aussehen solcher CCD-Zeilen zeigt ebenfalls Bild 8.18f (unten).

Für die direkte Bildabtastung werden statt der CCD-Zeilen zweidimensionale *CCD-Matrizen* benutzt. Etwa 1982 wurde mit rund 300000 Pixel die Größenordnung der Fernsehnorm (500 vertikal mal 600 - 700 horizontal) erreicht. Heute sind deutlich über eine Million Bildelemente erreichbar. Für den Aufbau der Matrizen gibt es vor allem die folgenden Varianten.

Bild 8.18g zeigt eine Matrix mit **frame-transfer** (Ganzbildübertragung). Das Bauelement besteht aus einem Sensor- und einem Speicherteil. Auf den Sensorteil wird das Bild projiziert. In der Belichtungszeit wird es in ein Ladungsbild überführt. Anschließend werden die Ladungen in die CCD-Zellen des lichtgeschützten Speicherteils verschoben. Von dort gelangen sie zeilenweise in das horizontale Ausleseregister. Schließlich werden sie zum Ausgangsverstärker weitergeleitet. Beim üblichen Fernsehbetrieb erfolgt der ursprüngliche Bildtransfer während des Bildrücklaufes. Die Übertragung vom Speicherteil in das horizontale Register geschieht während der Zeilenrückläufe. Auf diese Weise wird die maximal mögliche, integrierende Belichtungszeit für die Sensorzellen erreicht. Dadurch kommen CCD-Matrizen mit sehr wenig Licht aus. Durch die vollständige räumliche Trennung von Sensor- und Speicherteil können die Sensorelemente sehr dicht gepackt werden. Dies spiegelt sich in einer hohen Auflösung dieser Methode wider.

Der **interline-transfer** (Spaltenauswahlprinzip) gemäß Bild 8.18h ordnet jeder Sensorzelle unmittelbar eine lichtabgedeckte Speicherzelle zu. Die Bildpunkt-Ladungen werden daher direkt und einzeln in den Taktteil der Vertikal-Register-Reihen übertragen. Danach erfolgen die Ladungstransporte wie beim frame-transfer. Bei dieser Methode ist daher die Ladungsübertragung schneller und erfolgt zugleich über weniger Transportzellen. Der Chip ist folglich kleiner und die Ladungsübertragung etwas verlustarmer. Infolge unterschiedlicher Zeiten für die einzelnen Sensorzellen ergeben sich aber leicht Helligkeitsunterschiede zwischen den Zeilen.

Das dritte Verfahren heißt CID von **Charge Injection Device**. Jeder Bildpunkt dieser Matrix besteht aus einer zweiteiligen Ladungs-Zelle gemäß Bild 8.18d. In ihrer Verarmungszone sammeln sich durch Belichtung wie o. g. die erzeugten Ladungsträger. Liegt an beiden Gates normales Potential, so sind die beiden Verarmungszonen gleich tief. Wird jedoch nur eine Zelle angesprochen, so sammeln sich die Ladungen immer unter dem anderen Gate. Werden dagegen beide Gates angesteuert, so verschwinden beide Verarmungszonen. Die bis dahin gespeicherten Ladungen fließen über das Substrat ab. Dieser Strom wird über die MOS-FET zum Ausgangsverstärker weitergeleitet. Damit ist nur noch eine zeilen- und spaltenweise Adressierung der einzelnen Zellen erforderlich (Bild 8.18i). Hier erfolgt also die Ladungsübertragung auf einem extrem kurzen Weg. Dafür sind aber die Bildzellen deutlich

größer. Dennoch ist der Aufbau des gesamten Sensors besonders einfach und flächensparend. Weiter ist vorteilhaft, daß für jede Zelle die volle Zeit zwischen den Bildwechseln zur Ladungsspeicherung nutzbar ist. Daher ist dieses Prinzip besonders lichtempfindlich.

CCD-Zeilen und -Matrizen sind in einem weiten Spektralbereich empfindlich. Sie können von Infrarot bis zum nahen Ultraviolett benutzt werden. Durch vorgesetzte Filter sind sie für Farbauszüge nutzbar zu machen. Für farbtüchtige Signale ist eine Trennung von Rot, Grün und Blau erforderlich. Hierzu bestehen zwei Möglichkeiten:

- Es werden drei Sensoren benutzt. Jeder Sensor ist mit einem Filter für eine Farbe versehen. Für die Anwendung ist eine optische Strahlteilung erforderlich. Statt der o. g. Filter können auch dichroitische Spiegel oder Prismen zur Farbtrennung angewendet werden. In jedem Fall müssen sich die Teilbilder exakt decken. Außerdem müssen die Sensoren gut in der Pixelgeometrie und der Pixelempfindlichkeit übereinstimmen.
- Auf dem Sensor werden abwechselnd je Pixel kleine Filter für die verschiedenen Farben angebracht. Hierdurch wird der Sensor komplizierter und damit teurer. Außerdem sinkt die Auflösung. Dafür ist aber seine Handhabung wesentlich einfacher. Hierbei entfallen die aufwendigen Justagen des ersten Falls.

Für die Verteilung der Farbfilter auf einer CCD-Matrix gibt es mehrere Methoden. Für viele Anwendungen ergibt sich dadurch eine Vereinfachung, daß die geringe Farbauflösung des Auges im Vergleich zur Helligkeitsauflösung ausnutzt wird (vgl. S. 38ff.). Meist werden dann doppelt so viele grüne wie blaue und rote Filter benutzt. Eine typische Struktur zeigt das Rasterfilter von Bild 8.18j (unten). Ein zweites Beispiel ist darüber gezeigt. Hier werden Farbstreifen von Gelb und Cyam gekreuzt übereinander gelegt. Die Mischfarben erzeugen dann Grün und eine zweite Fläche ist frei.

8.6.4 Video-Aufnahme-Röhren

Schon im Abschnitt 8.6.1 wurde auf die Kameraröhren hingewiesen. Dort wurde auch ausgesagt, daß sie heute weitgehend durch die CCD-Kameras abgelöst sind. Dennoch bieten sie für einige spezielle Anwendungen immer noch Vorteile. Deshalb soll hier ein kurzer Überblick gegeben werden. Das *Grundprinzip* aller elektronischen Kameraröhren zeigt **Bild 8.19**a (umseitig). Mittels einer Optik wird das Objekt (Bild) auf eine lichtempfindliche Schicht projiziert. Von hier erfolgt – mit Ausnahme des Vidicons – eine elektronenoptische Übertragung auf eine Speicherschicht. Sie wird vom einem Elektronenstrahl wie bei der Fernsehbildwiedergabe zeilenweise abgetatstet. Zwischen den Abtastungen werden in der Speicherschicht die vom Licht freigesetzten Ladungsträger gesammelt. Die zugehörigen pixelartigen Strukturen sind aber im Gegensatz zur CCD nicht regelmäßig, sondern zufällig angeordnet. Durch den abtastenden Elektronenstrahl werden die einzelnen Bildpunkte der Speicherschicht entladen. Dabei entsteht der zeitliche Singnalverlauf für das Bild.

Beim *Ikonoskop* (Bild 8.19b) von 1923 werden die in der Photokathode freigesetzten Elektronen mittels der Fokussierspule elektronenoptisch auf die Signalplatte abgebildet. Sie besteht aus einer Vielzahl isolierter Leiter-Punkte (z. B. Hg, MgO auf Glimmer). Bezüglich der Gegenelektrode stellen sie Einzelkapazitäten dar, auf welchen sich die Ladungsträger sammeln. Der von „unten" kommende Elektronenstrahl wird mittels der Ablenkspulen zeilenweise über die Signalplatte geführt. Dabei entlädt er die Pixel-Kondensatoren. Der zugehörige Strom bewirkt an der Gegenelektrode das zeitliche Ausgangssignal. Beim *Super-Ikonoskop* erfolgt zusätzlich eine Verstärkung mittels SEV.

Beim *Orthikon* (Bild 8.19d) von 1939 sind Photokathode und Speicherplatte so dicht beieinander, daß die elektronenoptische Abbildung entfallen kann. Für die Entladung der Speicherschicht werden nicht alle Elektronen des Abtaststrahles benötigt. Die überschüssigen werden zurück zum SEV gesaugt. In ihm entsteht das verstärkte Videosignal.

Das *Vidicon* (Bild 8.19e) von 1948 nutzt den inneren Photoeffekt, also die Widerstandsänderung eines Halbleitermaterials. Sein Prinzip läßt sich besonders gut für einen Bildpunkt der Hableiter-Schicht (Bild 8.19e) erklären. Jeder Bildpunkt kann, wie schon auf S. 103f. erklärt, als eine Parallelschaltung aus einem durch Licht veränderbarem Widerstand R und einem Kondensator C aufgefaßt

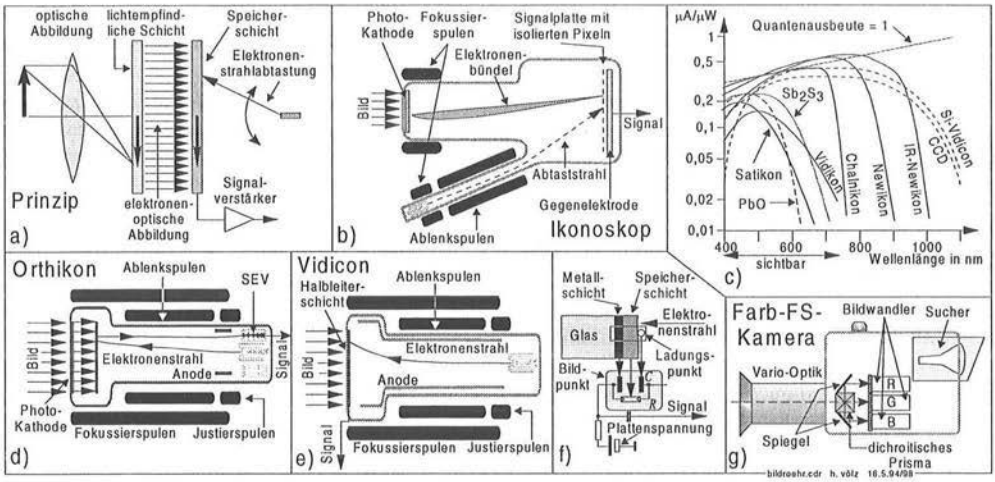


Bild 8.19 Zusammenfassung der wichtigsten Kameraröhren des Fernsehens

werden. Sie besitzt die Zeitkonstante $T=R \cdot C$. Je mehr Licht auf den Halbleiter fällt, desto kleiner wird sein Widerstand und damit auch die Zeitkonstante. Der Abtaststrahl lädt nun die Kondensatoren der Bildpunkte auf ein einheitliches Potential auf. Je nach der Lichtintensität entlädt sich das *RC*-Glied mehr oder weniger tief. Beim nächsten Abtastvorgang ist folglich mehr oder weniger Ladung zuzuführen. Diese Differenz bestimmt den Signalstrom. Bei sehr geringem Licht ist also die Zeitkonstante relativ groß. Daher folgt dann das Vidicon nur verzögert den Helligkeitsänderungen. Eine deutliche Verbesserung ist dadurch möglich, daß statt der Widerstände pn-Übergänge benutzt werden. Vom Vidicon sind im Laufe der Jahre eine große Anzahl von Varianten entstanden. Einen Überblick hierzu zeigt die folgende Tabelle nach [BER2], [BER3] und [DRE]. Einen Überblick zur frequenzselektiven Empfindlichkeit zeigt ergänzend Bild 8.19c.

Röhrentyp	Photohalbleiter	Anwendung
Vidicon (1948)	Sb_2S_3	industrielles Fernsehen, kleine Kameras
Plumbicon (1964)	PbO	Studio
Leddicon	PbO	Studio und Röntgentechnik
Saticon (1976)	Se, Ar, Te	Studio
Newcovision	ZnSe, CdTe, ZnTe, In_2Te_3	Bildberichterstattung
Chalnicon (1973)	CdSe	Studio, industrielles Fernsehen, Röntgentechnik
Super-Chalnicon	$CdTe_{1-x}Se_x$-As_2Se_3-Sb_2S_3	medizinisches Fernsehen, Patientenüberwachung
Newvicon (1974)	ZnSe, ZnCdTe	Verkehrs-, Patientenüberwachung, Industriefernsehen
Ultricon	Si-Fotodioden	Verkehrsüberwachung, industrielles Fernsehen
pyroelektrisches Vidicon	pyroelektrischer Kristall	Thermographie

Den prinzipiellen Aufbau einer *Farb-FS-Kamera* zeigt Bild 8.19g. Mit einem dichroitischen Prisma wird das von der Vario-Optik (Zoom) erzeugte Bild in seine Farbkomponenten zerlegt und getrennt drei Bildwandlerröhren zugeführt. Über einen Monitor sieht der Kameramann sofort, was er aufnimmt. Heute werden statt der Bildwandler bevorzugt CCD-Matrizen benutzt. Es war aber eine lange Entwicklung notwendig, bis sie in den wichtigsten Daten die Kamera-Röhren erreichten. Dies betrifft u. a. Auflösung, Lichthof, Überstrahlen (blooming), Trägheit, Einbrennen und Empfindlichkeit (Studios $\approx$ 1000, Tageslicht >50, Theater um 10 und Mondlicht um 1 lx). Gerade das hochauflösende Fernsehen (HDTV) hat bis vor kurzem deutlich bevorzugt Kameraröhren angewendet.

8.6.5 Digitale Kameras und Videotechnik

Die elektronische Bildaufnahme hat, wie bereits auf S. 177ff, gezeigt ihren Ursprung in der Videotechnik und nicht beim Einzelbild. Sie begann beim Fernsehen. Zunächst ohne Kenntnis der Leitung begann hier Ginsburg bei der Ampex Cooporation ab 1951 seine Versuche zur Magnetbandaufzeichnung. Der erste nutzbare Videorecorder stand dann 1955 zur Verfügung. Jedoch erst 1965 lieferte Sony mit dem Protapack den ersten tragbaren Recorder aus. Der Übergang in den Individualbereich ließ jedoch noch bis etwa 1968 auf sich warten. Der Boom begann dann 1970. Hier entstanden u. a. VCR von Philips und U-Matic von Sony, JVC und Matsushita. Einen großen technischen Fortschritt brachte 1975 die Betamax von Sony. Das erste transportable Aufnahmegerät mit Videokamera, also ein Camcorder, erschien um 1985. Es hatte noch mehrere kg Masse. Aus heutiger Sicht war damit zwar die prinzipielle Grundlage für eine digitale Photographie gelegt. Weil aber wichtige Komponenten fehlten, konnte sie noch nicht entstehen. Zumindest waren Farbdrucker und leistungsfähigere Rechner für die Bildverarbeitung erforderlich. Es gab nicht einmal den Begriff *Photoqualität*. So erklärt sich auch die geringe Akzeptanz der Mavica von Sony und der ION-Cameras von Canon. Als Beginn der digitalen Photographie wird allgemein die CeBIT 1991 angesehen. Hier stellte Dycam die erste digitale Kamera *DigiCam* vor. Sie arbeitet *nur* im Graumodus mit 376×240 Pixel. Auf der Photokina von 1992 lag dann bereits ein breites Angebot vor. 1994 gab es die ersten digitalen Farbkameras auch für Amateure (mit *kleinem* Budget). Nun zeichnete sich ein Massenmarkt ab. Eine Vielzahl von Firmen trat mit neuen immer leistungsfähigeren Produkten auf. Auf dieser Basis konnte sogar, wenn auch langsam, das Bildtelefon starten.

Die digitale Photographie hatte natürlich gegen die klassische Photographie anzukämpfen. Deshalb ist es nützlich, mit deren Klassifikation zu beginnen. Es werden allgemein folgende Klassen unterschieden:

- *Kleinbildtechnik* mit 24×36 mm^2. Sie wird vor allem von Amateuren benutzt. Deshalb ist hier auch das neue APS einzuordnen.
- *Mittelformat* der „ernsthaften" Amateure und vieler Berufsphotographen mit den Rollfilm-Formaten 4,5×6, 6×6, 6×7 und 6×9 cm^2.
- *Großformat* mit 9×12 cm^2-Planfilm für höchste Ansprüche. Sie wird meist als 4×5-Zoll-Technik bezeichnet.

Im Gegensatz zu den anderen Formaten besitzen die Kameras der Kleinbildtechnik für den Benutzer viele Vereinfachungen bei der Bedienung. Besonders hervorzuheben sind hier Zoomoptik, Belichtungsautomatik, automatische Scharfeinstellung, Selbstauslöser, Aufnahme von Bildfolgen (Serienbilder), Makroeinstellung, Doppelbelichtung und Belichtungsverschiebung. Bei der Scharfeinstellung besteht sogar die Möglichkeit des augengesteuerten Focus. Es wird jenes Objekt scharf eingestellt, auf das der Bediener im Sucher blickt. Selbst die richtige Tiefenschärfe (Schärfentiefe) kann durch Betrachten des nächsten und des fernsten Objektes automatisch richtig eingestellt werden. Zusätze (Optionen) gibt es für alle drei Varianten: Wechseloptiken, Zwischenringe, Motoraufzug, Blenden, Filter, Fernauslöser usw. Nur im Mittel- und Großformat sind weitere Möglichkeiten gegeben. Es sei hier nur die neigbare Filmebene zur perspektivischen Entzerrung genannt. Gegen all diese, über hundert Jahre evolutionär gewachsenen Möglichkeiten hatte die digitale Photographie anzutreten. Dagegen erschienen die ersten Modelle wie „Spielzeug". Um so erstaunlicher ist es, daß die digitale Photographie zunächst nur an der hohen Auflösung der Mittel- und Großformate gemessen wurde. Noch mehr muß man sich darüber wundern, wenn man bedenkt, daß sich kaum jemand über die geringe Auflösung des Fernsehens beklagt hat. Deshalb soll dieser Punkt etwas genauer untersucht werden.

Am besten ist die Auflösung durch die Anzahl wahrnehmbarer Linien zu beschreiben. Das aufzunehmende Original besitzt hierzu rechteckige Streifen (Linien) mit möglichst hohem Kontrast. In Stufen oder gleitend existieren sie mit unterschiedlichem Abstand. Bei der Photographie dieses Musters entsteht ein Bild, bei dem der Kontrast mit der dichter werdenden Folge abnimmt. Schließlich ist das Raster im Bild nicht mehr vorhanden, sondern durch einen mittleren Grauton ersetzt. Als Auflösung

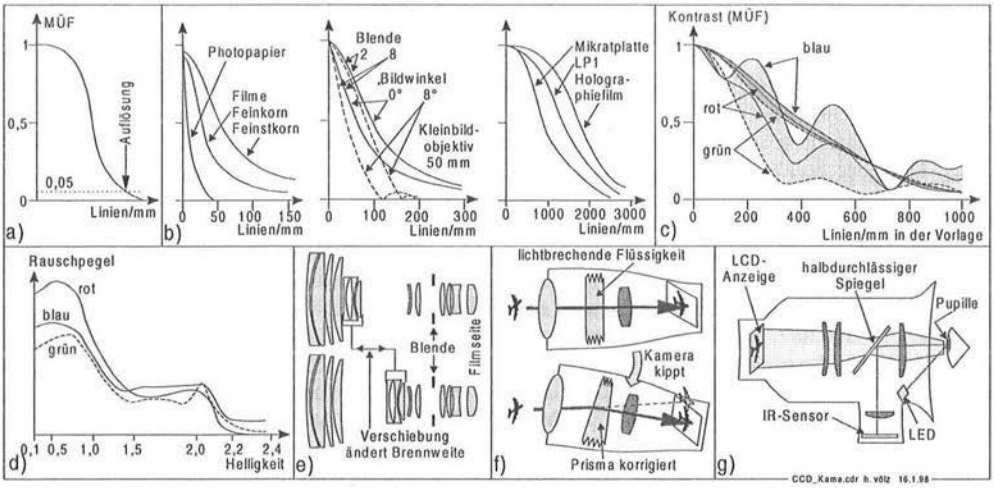


Bild 8.20 Eigenschaften und Besonderheiten bei digitalen Kameras

des Filmmaterials, der Optik und/oder des Bildes wird nun jene Linienzahl gewählt, bei welcher der Kontrast auf 5 % abgesunken ist. Einen typischen Verlauf zeigt **Bild 8.20**a. Kurven für wichtige Photomaterialien und ein Kleinbildobjektiv zeigt Bild 8.20b. Als Richtwerte können angenommen werden: Papierbilder 10 Linien/mm, Kleinbildfilm mit nicht zu hoher Auflösung 100 Linien/mm, gute Optiken im Zentrum 300 Linien/mm und die höchstauflösenden Materialien für Holographie, Photolithographie usw. 2000 bis 20000 Linien/mm. Eine Umrechnung auf digitale Kameras ist direkt kaum möglich. Durch den veränderbaren Abbildungsmaßstab variieren die Werte zu stark. Deshalb wird bei ihnen die *Pixelzahl* der Sensoren angegeben. Eine Umrechnung für ausgewählte Formate enthält die folgende Tabelle.

Format / Linien/mm	10	100	300	2000
24×36 mm²	86 400	8 640 000	77 760 000	3 456 000 000
6×6 cm²	360 000	36 000 000	324 000 000	14 400 000 000
9×12 cm²	1 080 000	108 000 000	972 000 000	43 200 000 000
A4-Seite	5 800 000	580 000 000	5 220 000 000	232 000 000 000

Meist treten also extrem große Werte auf. Zum Vergleich sei die für Fernsehen übliche Auflösung der Camcorder mit rund 300000 Pixel genannt. Sinnvolle Vergleichszahlen ergeben sich weiter aus den Zeilen×Spalten-Werten für einen Kleinbildfilm mit rund 2400×3600 und für ein Papierbild von 13×18 cm² mit etwa 1300×1800 Pixel. Auf diese Werten können nun die digitalen Kameras bezogen werden. Doch zuvor seien noch die Werte der analogen Kameras, nämlich der ION 260 mit 100096 Pixel und der ION 560 mit rund 400000 Pixel genannt. Die letzte besaß bereits einen 3-fach-Motorzoom mit auf Kleinbild umgerechneter Brennweite von 43 bis 130 mm, Autofocus und Blitz. Die erste Kamera DigiCam verfügte 376×240 = 90240 Pixel. Heute sind praktisch alle digitalen Kameras farbtüchtig mit meist 24 Bit Farbtiefe. Die Auflösungen liegen zwischen 320×200 = 64000 und 6000×8000 = 48000000 Pixel.

Im Vergleich zur klassischen Photographie kann bei der digitalen eine Besonderheit bezüglich der Auflösung auftreten. Die streng periodische Anordnung der Pixel kann nämlich leicht eine periodisch schwankende MÜF (Modulations-Übertragungs-Funktion = Kontrastverlauf) erzeugen. Im Beispiel von Bild 8.20c ist das besonders ausgeprägt für blau, etwas weniger für rot. Bei grün oder grau verschwindet dieser Effekt etwas. Hier wirken meist zwei Sensoren zusammen. Die drei „gleichmäßigen" Kurvenverläufe im Bild 8.20c ergeben sich bevorzugt durch zusätzliche Interpolation. Im Wie-

dergabesignal der CCD-Chips ist immer ein gewisses Rauschen vorhanden. Bild 8.20d zeigt dazu ein Beispiel. Es ähnelt etwas dem Korn beim klassischen Film. Im Gegensatz dazu wird das Bild bei wenig Licht aber nicht unschärfer. Es besitzt „nur" mehr Rauschen. Bei großen Lichtstärken zeigt ein Film leicht Solarisation (Umkehrung der Helligkeitswerte). Beim CCD-Sensor wandern dagegen unerwünscht Ladungsträger zu den Nachbarzellen. So entsteht das Blooming. Beim Fernsehen ist das besonders deutlich in bewegten Bildteilen durch Lichtschweife hinter hellen Bildpartien zu beobachten. Es gibt weiter einen Unterschied bezüglich der Helligkeit. Die CCD reagiert darauf linear, das Auge logarithmisch. Was wir als mittleren Grauwert empfinden, ist daher bereits 80 % schwarz. Dieser Effekt ist in der digitalen Technik relativ leicht bei der AD-Wandlung durch eine nicht lineare Kennlinie oder durch Übersampling zu korrigieren. Die typischen Belichtungszeiten liegen bei $^1/_2$ bis $^1/_{2000}$ Sekunden. Die typische Empfindlichkeit liegt bei 800 ISO.

Für den Aufbau digitaler Kameras ist zwischen mehreren Varianten nach zwei unabhängigen Gesichtspunkten zu unterscheiden. Sie betreffen die benutzen *Sensoren* und die Aufnahmetechnik:

1. ein Chip mit aufgebrachten Farbfiltern,
2. ein Chip mit drei aufeinanderfolgenden Belichtungen durch eingeschaltete Farbfilter,
3. drei Chips für die drei Farben,
4. drei CCD-Zeilen mit vorgeschalteten Filtern (single pass, one shot) oder
5. eine CCD-Zeile mit dreimaligem Scannen für die drei Farben (three shot).

Ähnlich wie bei der klassischen Photographie sind schon jetzt mehrere digitale Kameratypen entstanden. Einen Überblick für 1994 enthält [KNA] und für 1997 [NN14].

Die obige erste Variante, *ein Chip mit Filtern*, beherrscht das Feld der einfachen, preiswerten Anwendungen mit Auflösungen von 320×240 über 640×480 bis maximal 1024×768 Pixel (Anfang 1998 etwa 300 bis 2000 DM). Das Spektrum reicht dabei von der einfachen Optik mit Fixfokus bis zu Kameras mit den unterschiedlichsten Zusatzleistungen wie Belichtungsautomatik, Autofocus, Zoom (Prinzipaufbau nach Bild 8.20e), automatischer Weißabgleich, Makroeinstellung, Blitz usw. Als Sucher stehen sich heute zwei Varianten gegenüber: der Durchlichtsucher und ein kleiner LCD-Monitor. Der Durchlichtsucher hat vielfach eine nachteilige Parallaxe. Sie ist besonders störend beim Zoom und im Makrobereich. Er ermöglicht aber die gewohnte stabile Haltung der Kamera. Der Monitor kann dagegen in beliebige Richtungen bewegt werden und ist dem endgültigen Bild viel ähnlicher. Jedoch ist eine ruhige Haltung der Kamera weitaus schwieriger. So gibt es auch schon digitale Kameras, die gleichzeitig beide Varianten besitzen. Für hohe Ansprüche existieren auch Bildteiler, die ähnliches Arbeiten wie mit einer Spiegelreflexkamera ermöglichen. Die Speicherung der Bilder erfolgt vorwiegend auf einem Halbleiterspeicher, der meist durch Flash-Cards erweitert werden kann. Auch kleine Festplatten kommen schon zum Einsatz. Die schnelle Entwicklung wird außerdem durch die schon massenhaften Camcorder vorangetrieben. Viele ihrer fortschrittlichsten Techniken und Bauteile können nämlich fast unverändert übernommen werden. Für die *automatische Scharfeinstellung* gibt es mehrere Verfahren. Mittels zwei seitlich versetzter Infrarotlicht- oder Ultraschallquellen kann die Entfernung des nächstliegenden Gegenstandes bestimmt und danach die Optik justiert werden. Auch eine Einstellung auf möglichst viele feine Strukturen (hohe Ortsfrequenzen) wird angewendet. Damit genau das gewünschte Objekt scharf abgebildet wird, entstand der besonders leistungsfähige Augenfocus gemäß Bild 8.20g. Mittels der Infrarot-LED wird die Pupille beleuchtet. Der Sensor leitet aus der Reflexion die Blickrichtung ab und fokussiert dann auf das beobachte Objekt. Eine weitere nützliche Möglichkeit ist die *Antiwackeleinrichtung*. Sie ist bei klassischen Kameras nicht möglich, stellt also eine neue Qualität der digitalen Kamera dar. Andere Namen sind digitaler Bildstabilisierer (DIS = digital image stabilizer) oder EIS (electronic image stabilizer). Sie lesen das digitalisierte Bild zunächst in einen Speicher und vergleichen es mit dem vorangegangenen letzten Halbbild. Bei Unterschieden in wesentlichen Konturen wird es entsprechend seitlich verschoben übernommen. Dazu muß der CCD-Chip mehr Pixel enthalten, als ins Bild übernommen werden. Von z. B. 600000 Pixel sind das etwa 150000. Es gibt auch rein optische Bildstabilisatoren (OIS = optical image stabilizer oder steady shot). Sie nutzen ein verformbares Prisma (Bild 8.20f). Zwei Glasscheiben sind mit einem Balg verbunden. Zwischen ihnen befindet sich ein gut lichtdurchlässiges Silikonöl mit hohem Bre-

chungsindex. Bewegungssensoren steuern die Verlagerung der Glasscheiben und gleichen so die Bewegung aus. Wenn der geplante große Umsatz eintritt, dann sind gewiß noch weitere innovative Lösungen zu erwarten. Sehr wahrscheinlich wird es nicht mehr lange dauern, bis zu jedem PC standardmäßig eine Digitalkamera gehört.

Im *professionellen Bereich* sind Einchiplösungen mit 1280×1012, 1600×600, 2036×3060 (z. B. Canon und Kodak EOS DCS-1) oder gar wie bei der Eyike Scan mit 6144×6144 Pixel verfügbar. Als *Drei-Chip-Kamera* gibt es u. a. die Sony DKC-ST5 mit je 2560×2048 Pixel. Die Scan-Ausführung wird fast immer als Rückwand für klassische Kameras benutzt. Beispiele für single pass besitzen 4500×3648 Pixel (Agfa Studio Cam), 6000×7520 (Dicomed Scan), 6250×8450 (Arca Swiss SC1) und 8000×11350. Zum Scannen eines Bildes benötigen diese Typen einige Sekunden bis Minuten. Es fallen dann Dateien im 100-MByte-Bereich an. Die deutlich kleineren Chips von grob 2×2 mm^2 führen bei diesen Varianten zu einem wesentlich verkleinerten Öffnungswinkel, also zu verlängerter Brennweite. Der Grund für die Rückwandvariante liegt bei den ökonomischen Vorteilen. Die schon vorhandenen Optiken der klassischen Photographie können nämlich weiter benutzt werden. Ihr Wert liegt oft beim mehrfachen der sonstigen Kameraausrüstung.

Weiter sei noch ein Verfahren erwähnt, daß sich Kontron als *PAD* (Piezo Aperture Displacement) hat patentieren lassen. In seiner Wirkungsweise entspricht es dem Bild 8.17 (ganz rechts) auf S. 179. Bei einem typischen Verhältnis von Pixelgröße zu Pixelabstand mit 1:20 sind theoretisch bis zu 65 Positionen möglich. Ihre Nutzung erbringt eine beträchtliche Steigerung der Auflösung.

In der Euphorie für digitale Kameras wurden alle nur erdenklichen Vorteile zusammengetragen [KNA]. Hier erfolgt eine Auswahl. Die digitale Technik bringt erhebliche Zeitersparnis bis zum Druck. Bei der klassischen Photographie sind mindestens 2 Stunden plus die Zeit für das Scannen notwendig. Hier liegen aber die Bilder – zumindest auf dem Monitor – sofort vor. Daher sind nicht mehr Probeaufnahmen erforderlich. Für den Fall eines Mißlingens ist es auch nicht mehr nötig, die Aufbauten stehen zu lassen. Die Kosten für das Filmmaterial, für die Entwicklung, für den Raum und die Laborausrüstung sowie für das Scannen entfallen. Die gespeicherten, digitalen Bilder altern nicht wie Negative oder DIAs. Die digitale Technik ist umweltfreundlicher. Es sind keine giftigen Entwickler- und Fixierlösungen notwendig. Die Verfügbarkeit der DFÜ und die künstlerische Bearbeitung bieten weitere Vorteile. Dem stehen die Kosten für sehr leistungsfähige Rechner und für die Programme gegenüber. Zusätzlich ist die Einarbeitung in eine völlig andersartige Technik notwendig.

Vorteilhaft ist weiter, daß heute alle vorhandenen Fernsehtechniken relativ einfach zu digitalen Bildern führen. Es genügt eine spezielle Einrichtung – die bereits auf mehreren Videokarten vorhanden ist – um Bilder in das Fernsehsignal in die digitalen Bilder umzuwandeln. Damit stehen auch alle Aufnahmen von Camcordern zur Verfügung. Die jetzt begonnene Entwicklung der breit verfügbaren digitalen Videorecoder und der DVD (Weiterentwicklung der CD) wird noch zusätzliche Möglichkeiten bringen.

Bei der Photographie ist immer die *Beleuchtungstechnik* wichtig. Deshalb sollen hier kurz die wichtigsten Verfahren genannt werden:

- Durch *gebündeltes Licht* können gut Schatten und Reflexionen erzeugt werden.
- Ein *diffuses Licht* vermeidet Schatten und Reflexionen.
- Mit einer *Hintergrundbeleuchtung* können Silhouetten hervorgehoben werden (wird auch bei Lichtkästen für DIAs und Röntgenbilder genutzt). Sie erzeugt sehr hohe Kontraste, ist aber schwer einsetzbar, wenn Objektmanipulationen nötig sind, die dann sichtbar werden.
- *Stroboskope* ermöglichen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Sie verlangen aber genaues Timing zur Kamera und vermeiden den „Schmiereffekt". Das Blitzen kann eventuell anderweitig stören.
- *Flüssigkristalle* ermöglichen direkte Wärmebilder.

8.6.6 Scanner

Das langsame und späte Entstehen der digitalen Photographie hat sehr früh Scanner notwendig gemacht. Sie tasten Bilder mit *mechanischen* Bewegungen ab. Zwei Grundprinzipien sind bereits im Zusammenhang mit Bild 8.17 eingeführt worden. Die technische Entwicklung ist relativ wenig dokumentiert. Schon 1954 führte die Firma Hell den Klischograph ein, der als erster Vorläufer aller Scanner gilt. Aus ihm gingen zumindest die noch heute verwendeten Trommelscanner hervor. Der Ursprung des Flachbettscanners ist dagegen nicht eindeutig in der Literatur belegt. Hier dürfte aber die Bildtelegraphie (heutiges Fax) entscheidend gewesen sein. Die ersten nachweisbaren Versuche machte Caselli 1856. 1904 überträgt dann Arthur Korn eine Photographie von München nach Nürnberg und zurück. 1943 wird privates Telekopieren zugelassen. 1964 stellt Xerox den ersten kommerziellen Telekopierer vor. Das erste digitale Faxgerät kommt 1970 von Ricoh auf den Markt. 1973 beginnt eine breitere Produktion, denn von da ab stehen die ersten CCD-Zeilen zur Verfügung. Doch erst im Januar 1979 führt die Bundespost offiziell das Telefax-System ein. Vom ersten farbtüchtigen Telefaxgerät wird um 1990 berichtet. Die ersten Flachbettscanner für Rechneranschluß dürften daher Mitte bis Ende der 70er verfügbar gewesen sein. Ihr Preis war zunächst noch sehr hoch. So entstanden um 1985 die ersten Handy-Scanner. Die große Verbreitung der Flachbettscanner folgte wenig später. Z. Z. verschwinden dadurch immer mehr die Handy-Scanner. Ihr Vorteil des geringen Platzbedarfs hat um 1993 die Durchzugs-Scanner aufkommen lassen. Dies ist vor allem deshalb erstaunlich, weil sie beim Fax von Beginn an die Standardvariante waren. Für die Systematik der heutigen Scanner sind zwei Kriterien wichtig. Sie betreffen die Gerätetechnik und die Art der Vorlagen. Für das Scannen *zweidimensionaler Vorlagen* sind heute hauptsächlich die folgenden **technischen Varianten** unterscheidbar:

- *Trommel*-Scanner für höchste Ansprüche,
- *Flachbett*-Scanner in mehreren Qualitätsstufen, meist für A4, jedoch bis zu A0-Formaten,
- *Handy*-Scanner, welche manuell über die Vorlage oder längs einer Textzeile bewegt werden,
- *Motor*-Scanner, die weitgehend den Handy-Scannern gleichen, sich jedoch motorgetrieben über die Vorlage bewegen,
- *Einzugs-* bzw. *Durchzugs*-Scanner, die eine blattförmige Vorlage einziehen und an den CCD-Matrizen vorbeibewegen,
- *Dia-Photo*-Scanner, die u. a. auf Kleinbild (kleines Format, hohe Auflösung) ausgelegt sind.

Bezüglich der **Vorlagen** sind zu unterscheiden:

- *Auflicht*material, also Papier, Photo usw. sowie
- *Durchlicht*material, also Filme, Dias, Folien usw.

Schließlich ist Scannen nicht auf zweidimensionale Vorlagen begrenzt. Es haben weiter Bedeutung:

- *ein*-dimensionale Vorlagen. (Hier ist der Barcode (S. 194) besonders wichtig) sowie
- *drei*-dimensionale Vorlagen. Auf wenige Beispiele wird weiter unten eingegangen.

Die Fülle der Varianten macht eine allgemeine Behandlung nicht einfach. Alle Scanner besitzen jedoch die folgenden Komponenten. Sie bestimmen wesentlich die Qualität des Ergebnisses und werden daher unten noch weiter detailliert:

- Der *optische* Teil besteht aus Lichtquellen, Linsen, Spiegel, Prismen und Glasplatten.
- Die *Elektronik* benutzt u. a. CCDs bis 10000 Pixel, SEV, DSP und AD-Wandler.
- Die *Mechanik* bewirkt die vielfältigen, notwendigen exakten Bewegungen.
- Die *Software* dient u. a. zur Wahl von Parametern und zur zuverlässig schnellen Übertragung der Daten in den Rechner. Hierzu werden im folgenden kaum Hinweise gegeben. Eine Beschreibung von Programmen erfolgt nicht.
- Auch die *Erfahrung* des Bedieners ist oft von großem Einfluß auf das Ergebnis.

Der letzte Punkt erscheint zunächst trivial. Meist gibt es aber für das Scannen so viele Einstellmöglichkeiten, daß die optimale Entscheidung für das jeweilige Dokument durchaus Probleme bereiten kann. Ein Beispiel dafür ist die Wahl von Bittiefe und Auflösung. Wählt man beide Parameter sehr groß, so entstehen schnell riesige Dateien. Für sie wird viel Zeit zum Übertragen und viel Speicherkapazität erforderlich. Außerdem sind sie schwer zu bearbeiten und verlangen extrem leistungsfähige Rechner. Wählt man beide zu klein, so entsteht nur ein Bild mäßiger, oft unzureichender Qualität. Der richtige Kompromiß hängt also sowohl von der Vorlage selbst als auch von der weiteren Nutzung des Ergebnisses ab. Bezüglich der Bit-Tiefe gelten die folgenden Aussagen.

- 1 Bit/Pixel führt zu *Schwarz-Weiß*-Bildern. Dabei ist je nach der Vorlage der richtige Schwellwert des Überganges von schwarz nach weiß einzustellen. Üblich sind 50 %. Bei dunklen Vorlagen kann jedoch 10 % und bei sehr hellen 90 % besser sein. Wenn man unsicher ist, sollte man mit Grauwert einscannen und nachträglich im Bildverarbeitungsprogramm die optimale Schwelle ausprobieren. Das geht schneller als mehrmaliges Scannen. Es ist zu beachten, daß viele OCR-Programme (s. S. 194) Schwarz-Weiß-Scans erfordern. Auch wenn man das Bild noch vektorisieren will, ist oft schwarz-weiß vorteilhaft.
- Mit meist 8 Bit/Pixel – bis zu 12 sind manchmal möglich – werden *Grauwerte* erzeugt. Prinzipiell ist zwar vielfach der Schwärzungsverlauf, also Helligkeit und Gradation, einstellbar. Doch meist ist es besser, diese Korrekturen mittels Software hinterher vorzunehmen. Schwierigkeiten können sich bei sehr dunklen, sehr hellen oder äußerst kontrastreichen Vorlagen, insbesondere bei Durchlichtvorlagen mit hohem Kontrast ergeben. Eventuell hilft bereits ein Vor-Scan (= Pre-Scan siehe Farbe) für die richtige Einstellung.
- *Farbbilder* werden heute mit Tiefen von 24 oder mehr Bit/Pixel eingescannt. Hier erfolgen alle Änderungen am besten per Software. Um aber nicht zu große Dateien zu erzeugen, empfiehlt sich hier meist ein Pre-Scan. Durch ihn kann dann ein geeigneter Ausschnitt festgelegt werden. Das benötigt zwar zusätzliche Zeit. Sie wird jedoch reichlich bei der folgenden Übertragung, Speicherung und beim endgültigen Beschnitt des Bildes wieder eingespart.

Für die günstige Farbtiefe kann die nebenstehende Tabelle einige Hinweise geben. Die in ihr genannte Dynamik entspricht dem Briggschen Logarithmus der Dichteunterschiede. Ein „gewöhnlicher" Flachbett-Scanner kann also Helligkeitswerte von $1{:}10^{2,5} \approx 1{:}316$ erfassen. Ein Trommelscanner erreicht die besten Werte mit $1{:}10^4 = 1{:}10000$. Bei den Vorlagen ist dagegen das Verhältnis aus hellster zu dunkelster Stelle eingetragen. Beim Zeitungsdruck sind auf Grund des „grauen" Papiers und der Verschmutzung nur $1{:}10^{0,9} \approx 1{:}8$ erreichbar. Aus der Tabelle wird besonders deutlich, daß die Durchlichtscanner höhere Dynamikwerte als die Auflichtscanner erfassen müssen.

Medium	Dynamik
Handy-Scanner	≤ 2,2
Flachbett-Scanner	≤ 2,5
Flachbett (High-End)	≤ 3,9
Trommel-Scanner	≤ 4,0
Zeitungsdruck	0,9
Druck, gutes Papier	1,5-1,9
Photographien	2,3
Negative	2,8
Farb-DIAs	≤ 3,0
Diafilme, gute Folien	3,0 - 4,0

Noch komplizierter ist die Einstellung der optimalen Auflösung. Hierzu sind zunächst die folgenden Auflösungsvarianten zu unterscheiden:

- Die *physikalische* Auflösung ergibt sich in einer Richtung – unter Berücksichtigung der optischen Abbildung – aus dem Abstand der Pixel der CCD. In der anderen Richtung ist die Schrittweite der Mechanik (siehe unten) entscheidend.
- Die *interpolierte* Auflösung entsteht dadurch, daß die Elektronik (s. d.) zusätzliche Zwischenwerte berechnet. Hierdurch können „unwahrscheinliche" Übergänge gemildert | verbessert werden. Eigentlich ist es aber kaum sinnvoll, hiervon Gebrauch zu machen. Es wird keine zusätzliche Auflösung gewonnen. Für den sehr geringen Gewinn wird nur die Datenmenge unnötig vergrößert.
- Bei der *herabskalierten* Auflösung werden Pixel zusammengefaßt. Die Datenmenge und die Auflösung schrumpfen dabei gleichermaßen. Das Scannen erfolgt jedoch meist deutlich schneller. Ein wichtiges Beispiel ist die OCR-Technik. Mit wachsender Auflösung wächst die

Datenmenge, und es treten zusätzliche Störungen auf. Dadurch wird das OCR-Programm langsamer *und* die Erkennungsrate sinkt. Bei den üblichen Schriftgrößen, bis etwa 7 Punkt herab, wird meist 300 dpi in beide Richtungen empfohlen. Die meisten Flachbettscanner leisten heute aber mindestens 600 dpi. Folglich ist ein Herabskalieren sehr sinnvoll. Auch für Fax-Übertragungen – wo ohnehin nur 200 dpi gesendet werden – kann es nützlich sein. Doch das Herabskalieren sollte nicht um jeden Preis geschehen. Optimale Ergebnisse werden nur dann erreicht, wenn die *physikalische* Auflösung *ganzzahlig* verkleinert wird. Andernfalls treten leicht störende Moirés und Farbverfälschungen auf. Dann sind Softwarelösungen meist effektiver und besser steuerbar sowie sofort zurücknehmbar. Schließlich hat das Herabskalieren Bedeutung, wenn das Bild mit einer, durch den Drucker bestimmten dpi-Zahl ausgedruckt wird (s. S. 266f.).

Doch mit diesen Beispielen sind noch längst nicht alle Möglichkeiten des Bedienens genannt. Es sei jedoch noch darauf hingewiesen, daß Scanner auch guter Pflege bedürfen. Das betrifft nicht nur das Sauberhalten des Auflageglases. Auch Stöße und anhaltende Erschütterungen können schnell die empfindliche Mechanik (s. u.) nachteilig beeinflussen.

Der *optische* Aufbau eines Scanners beginnt mit der Lichtquelle. Unter Berücksichtigung der Betrachtungen von S. 32ff. wird deutlich, wie wichtig ihre Eigenschaften zumindest beim Scannen farbiger Vorlagen sind. Waren vor einiger Zeit noch halogengefüllte Glühfadenlampen üblich, so existieren heute fast nur noch Gasentladungsröhren mit Leuchtphosphor (s. S. 120ff. und 128ff.). Ferner haben die Farbfilter, die Linsen (z. T. auch Zylinderlinsen), Spiegel und Prismen Einfluß auf die Qualität.

Die *Elektronik* beginnt natürlich mit der Qualität der CCD-Zeilen einschließlich ihrer Pixelanzahl. Sie beeinflussen auch erheblich das Rauschen des Signals. Dann folgen die AD-Wandler. Die von ihnen geforderte hohe Geschwindigkeit geschieht nicht selten auf Kosten der Bit-Tiefe. Infolge des Unterschiedes zwischen der linearen Gradation der CCD und der logarithmischen, subjektiven Empfindlichkeit ist sogar ein Übersampling mit zunächst höherer Stufenzahl günstig. Dann hat nämlich der DSP (digitaler Signalprozessor) mehr Möglichkeiten, die optimale Gradation zu erzeugen. Auch kann so teilweise das Rauschen besser reduziert werden. Das Programm für den DSP ist zusätzlich für die Umsetzung der o. g. Einstellungen nach Bit-Tiefe und Auflösung zuständig. Er bereitet weitgehend auch die Signale zur Übertragung zum Rechner auf. In all diesen Punkten gibt es Minimalfestlegungen durch den Standard TWAIN (technology without an importend name) von 1991. Durch ihn können der | die Scanner gleichzeitig in mehrere Grafik- und OCR-Programme einheitlich eingebunden werden.

Die *mechanischen* Eigenschaften der Scanner wirken sich ganz erheblich auf die richtige Erfassung der Bildpunkte aus. Hierfür sind die folgenden Prinzipien zu unterscheiden:

- Beim *Punktscannen* wird eine punktförmige Lichtquelle zeilen- und spaltenweise über die Vorlage geführt. Typisch hierfür sind die Trommel- und die alten Flachbettscanner mit Spiegelrad oder Schwingspiegel. Hier sind zwei mechanische Bewegungen präzise auszuführen und zusätzlich zu koordinieren. Ein Vorteil dieses Prinzips ist es, daß rotierende Bewegungen genutzt werden können. Mittels Schwungmassen lassen sie sich nämlich sehr gleichförmig gestalten. Hier liegt ein wesentlicher Vorteil aller Trommelscanner. Sie erreichen so eine typische Auflösung von 5000 dpi und mehr.
- Beim *Zeilenscannen* wird meist eine CCD-Zeile benutzt. Die Präzision in der einen Richtung ist dann durch ihren technologischen Prozeß garantiert. Eventuell kann sie durch Abbildungsfehler des optischen Systems etwas verschlechtert werden. Mechanisch ist jedoch nur noch eine Bewegung in der dazu senkrechten Richtung auszuführen. Im Idealfall sollte sie schrittweise erfolgen. Da nach diesem Prinzip die meisten heutigen Scanner arbeiten, wird unten noch genauer darauf eingegangen.
- Ganz ohne mechanische Bewegung kommen *Flächen*scanner aus, die ähnlich wie die digitale Photographie arbeiten. Hier begrenzt fast ausschließlich die Technologie der Matrix die Genauigkeit der Ortskoordinaten. Die Mikroelektronik garantiert eine hohe Präzision.

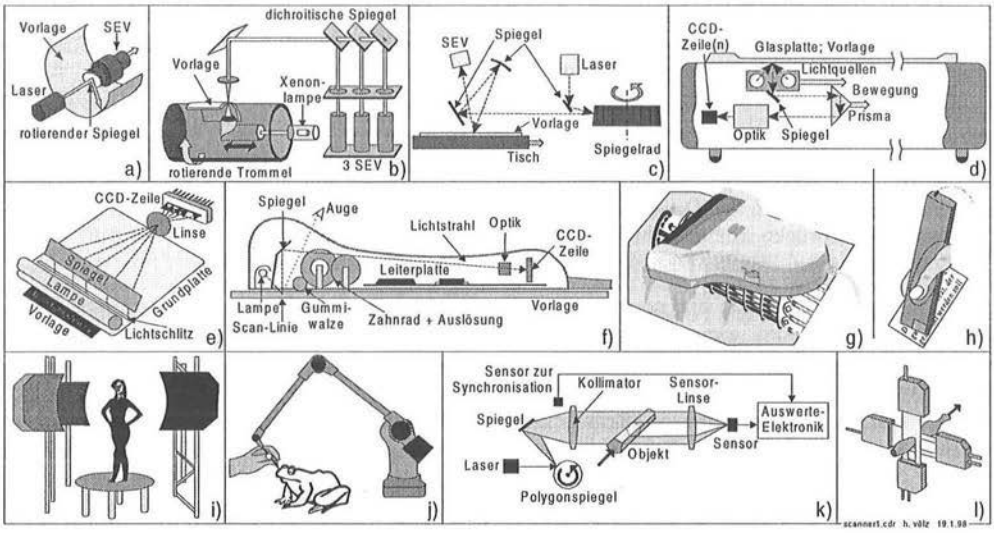


Bild 8.21 Überblick zu wichtigen Scannertypen und ihrer Wirkungsweise

Die erforderliche Präzision bei einem *Flachbettscanner* wird durch die folgende Abschätzung deutlich. Bereits bei 300 dpi Auflösung sind je mm schon 12 einzelne, möglichst gleich große Schritte notwendig. Die hohe Präzision muß sogar bei unterschiedlich langen Pausen eingehalten werden. Sie ergeben sich daraus, daß der Datenstrom nicht immer fließend bewältigt werden kann. Deshalb sind sehr hochwertige Schrittmotoren notwendig. Es sind auch entsprechend präzise Führungen für die Bewegung zu realisieren. Weiter dürfen keine Spielraumtoleranzen (Lose) dieser Größenordnung auftreten. Viele dieser Forderungen setzen einen sehr stabilen und im Gehäuse geschützten Aufbau voraus. Deshalb sind Flachbettscanner immer empfindliche mechanische Einrichtungen, die vor Stoß und Erschütterungen zu bewahren sind (beim Transport verriegeln!). Heute gibt es Flachbettscanner bis zu ca. 2000 dpi, während die typischen Werte um 600 dpi liegen. Beim *Durchzugsscanner* verringern Toleranzen der Haftreibung und des ungleichmäßigen, nicht immer rein linearen, sondern verkanntenden Einzugs zusätzlich die Genauigkeit. Daher sind für sie heute 600 dpi die erreichbare obere Grenze. Bei den *motorgetriebenen* Handyscannern sind diese Unzulänglichkeiten noch größer. Bei den *Handyscannern* erfolgt die Positionierung ausschließlich über eine Mitnahmerolle ähnlich wie bei der Maus. Beachtliche Verkantungen und erhebliche Toleranzen treten daher fast immer auf. Bei den *DIA-Film-Scannern* liegen weitgehend andere Verhältnisse vor. Infolge der kleinen Vorlagen ist eine zusätzliche optische Abbildung möglich. So kann indirekt die Auflösung von ca. 5000 dpi erreicht werden.

Bild 8.21 zeigt eine Zusammenstellung wichtiger Scanner und ihrer Funktionsweisen. Beim *Trommel-Scanner* nach dem Prinzip von Bild 8.21a rotiert ein Spiegel. Er bildet dabei den Laserstrahl auf die Vorlage ab. Sie ist im Innern der ruhenden Trommel befestigt. Das reflektierte Licht wird über einen zweiten mitrotierenden Spiegel auf den SEV gelenkt. So entsteht gemäß der Punktablenkung ein Signal, das einer Zeile entspricht. Mit jeder Umdrehung werden beide Spiegel um eine „Zeile" weiterbewegt. Dies erfolgt kontinuierlich. Der Lichtstrahl beschreibt daher in der Trommel eine Spiralbahn. Die beiden kontinuierlichen, also nicht steppenden Bewegungen der kleinen Spiegeleinheit ermöglichen eine sehr hohe Präzision. Das Prinzip ist auch ähnlich wie beim folgenden Scanner für Durchlicht geeignet. Bei der zweiten Variante des Trommelscanners rotiert die Trommel (Bild 8.21b). Durch die Zentrifugalkraft wird dann die Vorlage zusätzlich an die Trommelinnenwand gepreßt und nimmt dort eine exakte Lage an. Da die Vorlage die Trommel meist nur teilweise aus-

füllt, entsteht aber eine Unwucht, die Ungenauigkeiten hervorruft. Durch die Vorlage gelangt der gebündelte Lichtstrahl nach außen. Ein Spiegel lenkt ihn zu dem dichroitischen Spiegelsystem um. Dort wird er in die drei Farbkomponenten aufgeteilt und den drei SEV zugeführt. Auch dieses Prinzip kann mit einem inneren Umlenkspiegel für Auflichtvorlagen genutzt werden.

Bild 8.21c zeigt die klassische Variante eines *Flachbett-Scanners*. Die zeilenweise Bewegung des Lichtstrahls realisiert ein Spiegelrad. Über mehrere Spiegel wird der Lichtstrahl zur Vorlage umgelenkt. Sie befindet sich auf einem Tisch, der linear fortbewegt wird. Auf diese Weise sind selbst sehr große Vorlagen zu scannen. Das Spiegelrad muß relativ weit von der Vorlage entfernt sein. Dies kann durch mehrfaches Umlenken des Strahls erfolgen. Andernfalls wird nämlich der Unterschied von der Kreisbahn zur ebenen Fläche des Tisches zu groß. Dies bewirkt dann eine Verzerrung der Bildgeometrie und der Lichtpunktgröße infolge sich ändernder Fokussierung. Mit erhöhtem Aufwand ist allerdings ein Ausgleich über gekrümmte Spiegel möglich (s. S. 269ff). Eine wesentliche Vereinfachung der Flachbettscanner brachte die CCD-Zeile. Durch sie entfällt das teure, weil hochpräzise Spiegelrad mit den zugehörigen optischen Bauelementen. Dafür werden allerdings eine gute Flächenlichtquelle und der Schrittmotor notwendig. So entsteht der Prinzipaufbau von Bild 8.21d. Die Vorlage wird oben auf eine feststehende Glasplatte gelegt. Drunter befindet sich die vom Schrittmotor angetriebene Einheit. Sie enthält die Lichtquelle und einen Umlenkspiegel. Ein Prisma reflektiert das Licht über die Optik zur CCD-Zeile. Damit die Vorlage immer scharf abgebildet ist, wird das Prisma nur halb soviel wie die Lichtquelle bewegt. Zeitweilig gab es ähnlich wie bei den Photokopiergeräten auch Flachbettscanner mit bewegter Glasplatte und ruhender und somit einfacherer Optik.

Einzugs-Scanner sind eine Vereinfachung der Flachbettsanner. Es wird nicht die Lichtquelle vom Motor bewegt, sondern ein Blatt an der Lichtquelle vorbeibewegt. Das bringt eine deutliche Vereinfachung im Aufbau, aber auch geringere Präzision. Außerdem können nur Blätter mit bestimmten Abmessungen verarbeitet werden.

Beim *Handy-Scanner* (Bild 8.21e bis g) beleuchtet die Lampe – früher wurden auch Zeilen mit LED benutzt – über einen Schlitz die Vorlage. Das reflektierte Licht wird über den Spiegel und die Optik zur CCD-Zeile geleitet. Beim Bewegen des Scanners laufen Gummiwalzen mit. Sie sollen eine möglichst geradlinige Bewegung erzwingen und bewegen gleichzeitig Zahnräder. Diese wirken als Lichtschranken und erzeugen Impulse, die zur Berechnung der Position dienen. Dennoch muß eine möglichst gleichförmige Bewegung erreicht werden. Daher gehört zum Umgang mit einem Handyscanner immer beachtliche Erfahrung und viel Fingespitzengefühl. Scannerhilfen, wie Lineale usw. sind daher recht nützlich. Die maximale Abtastbreite liegt um 10 cm. Breitere Vorlagen müssen nacheinander eingescannt und dann im Rechner zusammengesetzt werden. Das gelingt nur selten mit ausreichender Genauigkeit. Vorübergehend wurde versucht, mit *motorgetriebenen* Handyscannern bessere Ergebnisse zu erreichen. Auch eine Kombination von Handy-, motorgetriebenem und Durchzugsscanner fand keine größere Akzeptanz. Interessant ist dagegen der recht spezielle Handyscanner von Bild 8.21h. Er verwendet eine sehr kleine CCD-Zeile und tastet den Text längs einer Zeile ab (s. umseitig OCR).

Eine Besonderheit stellt die *Filmabtastung* des Fernsehens dar. Der Film wird zeilenweise durch den Leuchtpunkt eines Spezial-Monitors abgetastet. Hinter dem Film entsteht dann ein zeitlicher Lichtverlauf, der direkt in das Videosignal umgewandelt werden kann.

Bei einigen Anwendungen werden von *3-dimensionalen Objekten* auch die Raumkoordinaten benötigt. Die Vielfalt reicht von ganzen Gebäuden, über große Objekte (Menschen, Tiere, Maschinen usw.) bis zu kleinsten Gebilden (z. B. Samen und Mikroorganismen). Die Anwendungen betreffen u. a. Architektur, museale Dokumentation, Medizin, Holographie und virtuelle Welten. Hier genügt kein flächiges Scannen. Weiter wird es für alle diese Zwecke kaum jemals *ein* Verfahren und noch weniger *ein* Gerät geben. Obwohl bereits 1983 erste 3D-Scanner für kleine Objekte entstanden, steht diese Disziplin noch ganz in den Anfängen. Hier sind daher nur wenige Beispiele ausgewählt. Ein Verfahren arbeitet mit der Beleuchtung durch Lichtstreifen. Aus den Aufnahmen mit mindestens zwei Kameras werden, aus den für sie erkennbaren „Verformungen" der Streifen, die 3D-Koordinaten berechnet. Andere Verfahren arbeiten mit Drehteller (Bild 8.21i) und scannen den Abstand, die Oberfläche und/oder die Kontur aus mehreren Richtungen. Eine rein mechanische Abtastung ist mit einem

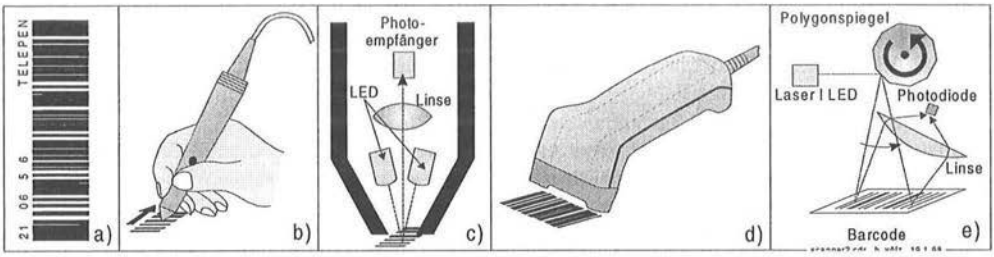


Bild 8.22 Barcode und Beispiele für Lesegeräte

speziell geführten Stift gemäß Bild 8.21h möglich. In den Gelenken sind Potentiometer angeordnet. Aus ihren Werten werden die Koordinaten berechnet. Eine abgewandelte Variante mit dem Drehteller wird großtechnisch eingesetzt (Bild 8.21k). Über ein Spiegelrad, einen Umlenkspiegel und eine Kollimatorlinse wird ein paralleler Abtaststrahlbereich erzeugt. Ein darin befindliches Objekt unterbricht diesen Strahl teilweise. Über eine weitere Linse wird das Licht einem Sensor zugeführt und dort ausgewertet. Durch Verschieben des Objektes kann die Kontur ermittelt werden. Zwei derartige Einrichtungen ermöglichen, schon teilweise, dreidimensionale Koordinaten zu gewinnen (Bild 8.21l).

8.6.7 Barcode und OCR

Mit dem Scannen ist oft eine Zeichenerkennung, häufig OCR (optical character recognition) genannt, gekoppelt. Häufig wird darunter nur das Scannen von Text und die anschließende Umwandlung in ASCII-Code verstanden. Dazu gehört aber auch das Erkennen von Noten, Sonderzeichen, Bildstrukturen usw. Beim Erkennen komplexer Bilder wird dagegen von Bilderkennung oder „Computer Vision" gesprochen. Eine Sonderform ist der Bar-Code, auch Strich-Code genannt. Bei ihm wird durch Striche mit unterschiedlichem Abstand und variabler Breite ein kurzer Text oder eine Zahlenfolge codiert (**Bild 8.22**a). Hier genügt eindimensionales Scannen. Das Prinzip wurde bereits 1952 von Norman Joseph Woodland und Bernard Silver patentiert, konnte sich aber erst in den letzten Jahren erfolgreich durchsetzen. Die erste breite, aber noch recht erfolglose Anwendung erfolgte 1961 zur Identifizierung von Zugwaggons. 1969 begann die Anwendung zur Materialortung und -überwachung. 1973 entsteht der UPC (universal product code). Er ist in der Lebensmittelindustrie weit verbreitet. 1977 wird der EAN (einheitliche Artikel Nummer) in Deutschland eingeführt. Die wesentlichen Vorteile des Strichcodes betreffen: leichtes Drucken, wenig Fläche, einfaches Befestigen und schnelles, einfaches und zuverlässiges (Spiegelsymmetrie und/oder Prüfziffern) Lesen. Heute ist er an den Kassen in Supermärkten unverzichtbar. Durch ihn wird nicht nur der Preis des Produktes automatisch erfaßt. Gleichzeitig werden Lagerhaltung, Nachbestellung, Verkaufsstatistik usw. automatisiert. Es gibt jedoch eine Vielzahl unterschiedlicher Strich-Codes. Sie unterscheiden sich durch die Anordnung der Striche und den verfügbaren Zeichenvorrat. Hierzu muß auf die Spezialliteratur verwiesen werden, z. B. [NN04]. Vor einiger Zeit wurde auch versucht, den Bar-Code im privaten Bereich, z. B. für die Programmierung von Videorecordern aus Programmzeitungen einzusetzen. Das hat sich jedoch nicht durchsetzen können. Einige Jahre hat die Zeitschrift „mc" eine zweidimensionale Variante für den Abdruck und das automatische Einscannen von Computer-Programmen erfolgreich genutzt. Heute ist die Beilage von Disketten oder CDs preiswerter und zudem einfacher und zuverlässiger.

Die Vielfalt der Scanner für Barcodes ist beachtlich. Hier werden nur drei Prinzipien beschrieben. Bild 8.22b zeigt einen einfachen Stift, der über den Code bewegt werden muß. Den inneren Aufbau zeigt Bild 8.22c. Eine oder zwei LED beleuchten die Fläche. Durch die Linse wird ein kleiner Bereich auf den Photodetektor abgebildet. Aus seinem zeitlichen Signal ermittelt der Rechner die Strichbreiten und Zwischenräume. Dabei muß eine beachtliche Geschwindigkeitstoleranz garantiert werden. Hierzu dient eine leistungsfähige Software. Die zweite Variante des Barcodelesers arbeitet mit einer CCD-Zeile, die fortwährend abgefragt wird. Hier ist der Aufbau besonders einfach. Das Lesegerät

(Bild 8.22d) muß jedoch immer gut ausgerichtet über dem Code gehalten werden. Besonders bequem zu handhaben sind fest eingebaute Scanner nach dem Prinzip von Bild 8.22e. Mittels eines Spiegelrads wird ständig eine Glasscheibe abgescannt. Wenn auf ihrer Oberfläche irgendwie ein Barcode erscheint, wird er auch erkannt. Die Produkte brauchen also nur, mit dem Barcode nach unten, über die Scheibe geschoben zu werden.

Die automatische Zeichenerkennung wird heute durch mehrere Programme mit guter Erkennungsrate und Geschwindigkeit realisiert. Sie ist also seit einigen Jahren Stand der Technik. Welche Bedeutung sie inzwischen erreicht hat, zeigt besonders eindrucksvoll eine für Deutschland typische Festlegung im Zusammenhang mit dem Urhebergesetz. Die Verwertungsgesellschaft Wort (VG-Wort) wacht darüber, daß Schriftwerke nicht kostenfrei vervielfältigt werden. Deshalb gibt es feste Abgaben beim Erwerb von Kopierern. Seit einigen Jahren werden sie auch (mindestens 75 DM) für Scanner ab einer bestimmten Leistung verlangt. Die Grenze liegt bei zwei Seiten pro Minute für eine mit 200 dpi eingelesene Textseite. Dadurch entstehen zuweilen „seltsame" Treiberprogramme. Sie legen künstliche Pausen ein, um kurz darunter zu bleiben. Mit internationalen Treibern arbeiten die Scanner dann wieder schneller. Schließlich sei noch auf drei kleine Sonderscanner für die Texterkennung verwiesen. Eine Variante ist bereits im Zusammenhang mit Bild 8.21h auf S. 192 genannt. Sehr wahrscheinlich geht hierauf ein Gerät zurück, daß eine völlig andere Funktion hat. Es liest den Text in einer Sprache, übersetzt das Wort in eine andere Sprache und zeigt es dann an. Um 1990 gab es einen speziellen Handy-Scanner von Caere, den Typist. Er besaß teilweise Hardware-Erkennung und arbeitete bereits damals sehr zuverlässig und schnell. Leider hat es zu dem sehr brauchbaren Gerät weder einen Nachfolger noch neuere Treiber gegeben.

Beim Stand der Zeichenerkennung ist es erstaunlich, daß erst in den letzten Jahren eine Notenerkennung entstand. Sie liest die Seite ein und erzeugt daraus den MIDI-Code. So kann man die Noten automatisch abspielen lassen, korrigieren und auch drucken. Es ist wohl nur eine Frage der Zeit, wann hier die GEMA (Gesellschaft für musikalische Aufführungs- und mechanische Vervielfältigungsrechte) ähnlich wie die VG-Wort einschreitet. Zumal sie ja ohnehin schon bei Noten das Kopierrecht speziell eingeschränkt hat.

8.7 Bewegungserfassung

Bewegungen des Menschen, von ihm bewegte oder sich selbst bewegende Objekte können | sollen für Computer | technische Geräte Eingangssignale sein. Sie können zur Steuerung | Nutzung (z. B. in virtuellen Räumen) genutzt werden. Diese abstrakt anmutende Beschreibung soll auf die Vielfalt der Möglichkeiten hindeuten. Sie ist zugleich etwas umfassender als die Bezeichnung *Tracking*-Systeme, wie sie u. a. bei Arbeiten im virtuellen Raum benutzt wird. Gewünscht ist dabei wieder die Erfassung der 6 Freiheitsgrade gemäß Bild 8.4g von S. 156. Hinzu kommt jetzt aber noch, daß beim Menschen durchaus auch die einzelnen Gliedmaßen, der Kopf usw. getrennt erfaßt werden müssen. Ebenso kann dies bei Objekten (z. B. bei Robotern) erforderlich sein. Eine Klassifizierung solcher Systeme soll unter drei Gesichtspunkten – Entfernungsbereiche, genutzte Übertragungsverfahren und typische Eigenschaften – vorgenommen werden. Für die *Entfernungen* gilt:

- Der *Nahbereich* ist dadurch gekennzeichnet, daß hier auch eine Übertragung der Bewegungen über Hebel, Kabel usw. möglich ist. Er schließt sich also in gewisser Weise an die Tastaturen, Mäuse usw. an (s. Abschnitte 8.2 bis 8.4). Jedoch sind jetzt zusätzliche und spezielle Möglichkeiten zu erfassen.
- Der *mittlere Bereich* gilt für Entfernungen in der Größenordnung von wenigen Metern. Hier müssen Verfahren wie Schall, Licht und Felder in Anspruch genommen werden. In Ausnahmefällen sind noch Kabel möglich. Ein unmittelbarer Kontakt zur Technik ist jedoch nicht mehr gegeben.
- Der *Fernbereich* erfaßt auch Distanzen (deutlich) über einen Meter. Er wird heute erst in speziellen Fällen benutzt, dürfte aber in der Zukunft größere Bedeutung erlangen. Im folgenden wird hauptsächlich auf das GPS (Global Positioning System) kurz eingegangen.

Für die *Signalerzeugung und|oder Übertragung* kommen die folgenden Möglichkeiten in Betracht:

- *Kabelgebundene* Verfahren sind zwar sehr zuverlässig, gelten aber als umständlich. Heute haben sie daher fast nur noch historische Bedeutung. Meist handelt es sich dann um eine Fernbedienung, wie sie jetzt überwiegend mit moduliertem Infrarotlicht (s. u.) betrieben wird.
- Beim *Schall*, vor allem Ultraschall, erweist sich die Nutzung der Laufzeit als geeignet. Vorteilhaft werden der|die Sender den sich bewegenden Objekten zugeordnet. Am technischen Gerät befinden sich meist drei oder mehr Empfänger. Sie erfassen die Laufzeitänderungen und werten sie aus. Auch Schall eignet sich zur modulierten Signalübertragung wie Licht (s. u.).
- Die *optischen* Methoden existieren zumindest in einigen Varianten. Einmal können mehrere Lichtwege durch die Bewegung unterbrochen bzw. durch Reflexionen verändert werden. Dann liegt eine Verallgemeinerung des Lichtschrankenprinzips (s. S. 103ff. u. 161ff.) vor. Zusätzliche Möglichkeiten ergeben sich aus Beobachtungen mit Kameras. Sie können u. a. die Pupille, die Kopfhaltung, den Gesichtsausdruck und|oder die Handbewegungen betreffen. Einige Hinweise sind bereits auf den Seiten 79ff. u. 89ff. behandelt. Weitere Details folgen im Abschnitt 8.8. Größere Bedeutung hat auch *moduliertes* Licht (meist Infrarot) zur Übertragung der am Objekt erfaßten Bewegungen. Es gibt u. a. Mäuse und Tastaturen, die so „drahtlos" betrieben werden können. Das Prinzip ähnelt dem der Fernbedienungen der Rundfunk- und Fernsehtechnik. Dort existieren sie seit 1950 mit Kabel, seit 1960 mit Ultraschall und seit 1975 mit Infrarotlicht.
- *Elektrische und|oder magnetische Felder* breiten sich im Raum aus. Sie können in unmittelbarer Nähe der Objekte gemessen werden. Die Meßwerte sind dann mit einem der zuvor genannten Verfahren an die Technik zu übermitteln. Erzeugt man solche Felder am Ort des Objekts, so ergibt sich eine zum Schall analoge Variante. Auch ein der Fernbedienung ähnliches Prinzip mit elektromagnetischen Wellen (MHz bis GHz) gewinnt z. Z. immer mehr an Bedeutung. Die extremste Variante hierzu stellt das bereits zuvor genannte GPS dar. Über die Signale von 24 *Satelliten* können damit sogar absolute Positionen auf der Erde mit Toleranzen bis unterhalb eines Meters bestimmt werden.

Bei den letzten drei drahtlosen Verfahren ist es praktisch immer möglich, die Orte für Sender und Empfänger zu vertauschen. Meist benötigt der Sender mehr Energie. Dann ist es günstiger, den Empfänger am beweglichen Objekt zu befestigen und den|die Empfänger stationär zu betreiben. Sofern eine Vielzahl von Signalen genutzt werden soll|muß, ist es vorteilhaft, den Sender am sich bewegenden Objekt anzubringen.

Systeme zur Lagebestimmung und Bewegung können durch mehrere Parameter gekennzeichnet werden. Hierzu werden in der Literatur z. T. unterschiedliche Parameter hervorgehoben. Deshalb kann die folgende Aufzählung nur als Hinweis dienen:

- Der nutzbare *Arbeitsbereich* kann prinzipiell einem der oben genannten Grobbereiche zugeordnet werden. Der Anwender verlangt dazu jedoch zahlenmäßige Angaben. Sie sind dann aber mit dem folgenden Punkt im Sinne der Toleranz gekoppelt.
- Für jede Bestimmung der *Koordinaten und Drehwinkel* existiert eine erreichte|erreichbare Genauigkeit. Im Nahbereich werden zuweilen Lagetoleranzen unter einem mm und Winkelunsicherheiten deutlich unter $^1/_{10}°$ gefordert. Die meisten Systeme sind aber wesentlich ungenauer. In größeren Entfernungen, insbesondere im Fernbereich, genügen zuweilen auch mehrere cm bis zu einem m. Die Winkelwerte ändern sich jedoch mit der Entfernung kaum.
- Ergänzt wird die Genauigkeit durch die *Reproduzierbarkeit*. Sie gibt einmal an, mit welcher Toleranz nach einem längeren Betrieb die Rückkehr zum Ausgangspunkt behaftet ist. Zum anderen gehen hier auch Einflüsse von Drift, Temperatur, Feuchte usw. ein.
- Die Meßwerte können nur in diskreten Zeitabständen gewonnen werden. Hiervon hängt dann die *Update-Rate* bzw. die *Verzögerung* bei Veränderungen ab. Gewünscht werden zuweilen 60 Hz oder 5 ms. Es gibt aber auch Systeme, die nur wenige Werte je Sekunde ermitteln.
- Weiter ist die *Zuverlässigkeit|Betriebssicherheit* eine wichtige Größe. Sonst in der Industrie gebräuchliche Werte wie MTBF (mean time between failures ≈ mittlere fehlerfreie Betriebszeit

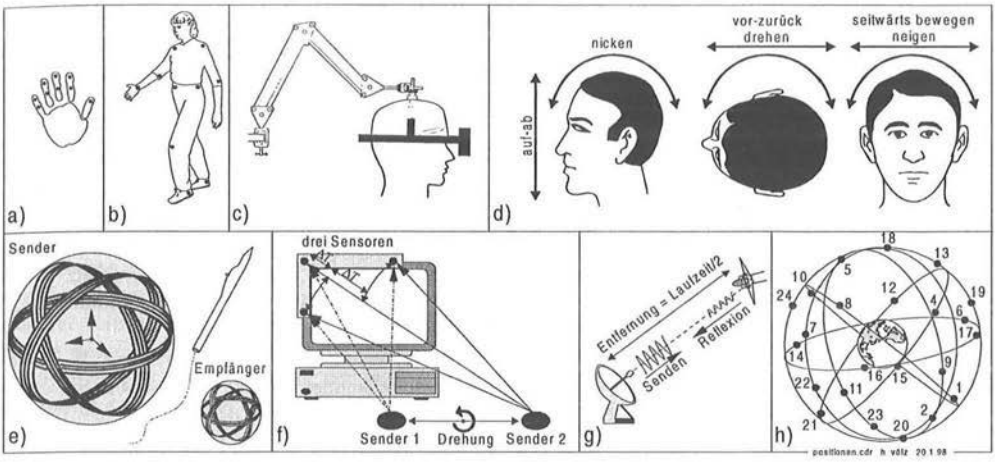


Bild 8.23 Möglichkeiten für Tracker-Systeme zur Positionsbestimmung.

in Stunden) sind hier noch nicht üblich. Ebenso gibt es kaum Angaben zur Anfälligkeit gegenüber Fremdstörungen und Störungen auf fremde oder weitere gleichartige Systeme, also auch EMV (elektro-magnetische Verträglichkeit).

In der Virtuellen Technik ist es notwendig, die Bewegung des Menschen möglichst vollständig zu erfassen. Denn hiernach muß der Rechner ständig die Ansicht der Umgebung aktualisieren. Eine sehr einfache Methode verwendet Leuchtdioden (aktive Methode) oder Reflexmarken (passive), die an verschiedenen Körperregionen angebracht werden. Beispiele für die Hand und für den Körper zeigen **Bild 8.23**a und b. Es gibt auch Anzüge, die mit unterschiedlichen Mustern, wie Streifen und Punkte, versehen sind. Die Marken | LED werden von einer oder zwei Videokameras erfaßt und im Rechner ausgewertet. Auch die Umkehrung ist möglich. Z. B. befinden sich an der Decke des Raumes blinkende Leuchtdioden. Sie werden von einer Videokamera aufgenommen, die am Kopf des Menschen befestigt ist. Andere Varianten nutzen nur die Schattenbildung, z. B. vor Video-Bildschirmen. Selbst Künstler machen inzwischen von diesem Grundprinzip Gebrauch. So gibt es eine tönende Wand, die an verschiedenen Stellen Sensoren enthält. Über sie werden Generatoren für Lautsprecher gesteuert. Wenn sich eine Person vor der Wand bewegt, entstehen je nach der Bewegung und dem Aufenthaltsort ganz individuelle „Kompositionen". Auch druckempfindliche Fußmatten wurden teilweise eingesetzt. In den letzten Jahren wurden diese Prinzipien durch direkte Objekterkennung wesentlich erweitert. Dann sind weder leuchtende Dioden noch Marken oder mehrere Sensoren erforderlich. Bei einer Anwendung des Datenhelmes müssen die sechs Freiheitsgrade des Kopfes (Bild 8.23d) erfaßt werden. Bereits in den 60er Jahren probierte Ivan Sutherland die ersten mechanischen Trackingssysteme aus. Der Helm war dazu mit einem komplizierten „Gestänge" verbunden. Ein Beispiel zeigt Bild 8.23c. Die einzelnen Gelenke sind mit Lichtsensoren oder Potentiometern versehen, welche ihre Lage möglichst genau erfassen.

Ein besonders leistungsfähiges System stammt von der Fa. Polhemus Navigational Systems. Es wurde primär für die Flugsimulatoren der Luftwaffe entwickelt. Daher gibt es mehrere unterschiedlich genaue Varianten. Das System verwendet als Sender und als Empfänger drei jeweils senkrecht zueinander angeordnete Spulen (Bild 8.23e). Jede Spule hat folglich eine Achter-Charakteristik, die in eine der drei Richtungen strahlt bzw. aus ihr empfängt. Die Sendespulen werden nacheinander aktiviert. Dadurch entstehen in den Spulen des Empfangssystems Signale, die je nach seinem Ort und seiner Lage unterschiedlich sind. Jeder Meßzyklus besteht aus neun Messungen, aus denen sich die Orts- und Winkelkoordinaten des Sensors berechnen lassen. Das Sendesystem ist ein Würfel von einigen cm Kantenlänge. Das Empfangssystem ist wesentlich kleiner und kann daher leicht an irgend-

welchen Körperteilen oder Gegenständen befestigt werden. Es gibt auch eine kleine Kugel mit Tasten, die bequem in der Hand gehalten und dabei bedient werden kann. Auch ein Stift mit „Zeigefunktion" (Bild 8.23e) existiert. Die besten Systeme arbeiten mit einer 60 Hz update-Rate und können große Genauigkeit erreichen. Nachteilig ist es jedoch, daß Metalle in der näheren Umgebung das System durch Feldveränderungen ungünstig beeinflussen (Genauigkeit). Zwei gleichzeitig zu nahe betriebene Systeme stören sich auch gegenseitig. Prinzipiell können die drei Spulen auch kontinuierlich mit drei verschiedenen Frequenzen betrieben werden. Dann ist eine sehr hohe update-Rate möglich. Ergänzend sei erwähnt, daß dieses Prinzip schon um 1950 von Pierre Schaeffler in der elektronischen Musik verwendet wurde [WIN]. Dabei waren drei große, im Raum verteilte Spulen als Empfänger vorhanden. Sie führten über Verstärker zu den ebenfalls im Raum verteilten Lautsprechern. In der Hand hielt er den Sender mit den drei kleinen Spulen. Durch Bewegen dieses Senders konnte er so das Klangbild im Raum individuell und interaktiv steuern.

Ein typisches *akustisches System* zeigt Bild 8.23f. Es verwendet drei Empfänger, die z. B. an der Oberkante des Monitors befestigt sein können. Ein Ultraschallsender schickt Signale aus. Sie erreichen mit Laufzeitunterschieden ΔT die drei Empfänger. Hieraus können die drei Koordinaten für den Ort des Senders berechnet werden. Sollen auch noch Verdrehungen bestimmt werden, so sind weitere Sender erforderlich. Mit zwei Sendern können aber noch nicht Drehungen um die Verbindungslinie erfaßt werden. Dazu wird ein dritter Sender benötigt. Das System mit einem Sender gibt es z. B. als sehr preiswerten Fingerring (3D-Cyberbat). Er wird auch als 3D-Maus genutzt. Die akustischen Systeme können durch hochfrequenten Schall (z. B. Schlüsselklirren, Hundepfeife) und durch Schallreflexionen im Raum gestört werden. Ihre Genauigkeit hängt von der Schallgeschwingkeit ab, die sich mit der Luftfeuchte und der Temperatur etwas ändert.

Wenig benutzt wurden bisher Echosysteme nach dem *Radar-Prinzip* (Bild 8.23g). Sie registrieren neben dem Ort auch effektiv die Geschwindigkeit.

Ein System, daß durch den Fortschritt der Technik immer bedeutsamer wird, ist das **GPS** (Global Positioning System, korrekter NAVSTAR-GPS also navigation satellite timing and ranging for GPS). Es wurde ursprünglich von den USA für die Ziel-Steuerung der Cruise Missiles entwickelt. Seit mehreren Jahren ist es mit (z. Z. noch) eingeschränkter Genauigkeit frei und kostenlos nutzbar. Es besteht aus 24 Satelliten, wovon drei als Reserve dienen. Sie umkreisen auf unterschiedlichen Bahnen die Erde in 20200 km Höhe (Bild 8.23h). Gegenüber dem Äquator sind sie um 55° geneigt. Die Umlaufzeit beträgt 12 Stunden. An Bord jedes Satelliten befindet sich eine sehr genaue Atomuhr. Alle Satelliten benutzen die gleichen Frequenzen um 20 cm Wellenlänge. Sie strahlen jeweils zwei Frequenzen ab, eine für die individuelle Kennung und eine für die genaue Uhrzeit. Zum Empfang genügt eine pilzförmige Antenne mit nur etwa 20 cm Durchmesser. An jedem Erdpunkt und zu jeder Zeit sind mindestens vier Satelliten zu empfangen. Die Laufzeitunterschiede ermöglichen im militärischen Bereich Auflösungen bis unter 1 m. Hierfür sind die Daten jedoch mittels eines Scramblers geschützt. Deshalb wird dann vom geheimem P-Mode (precise protected) gesprochen. Dabei ist auch Sicherheit gegenüber „böswilligen" Störern gewährleistet. Die zivil nutzbare Genauigkeit (C/A-Mode clear acquisition) liegt um 100 m. Bei neueren Anwendungen wird sie aber durch zusätzliche Maßnahmen deutlich unterschritten. Zusätzlich können über den Dopplereffekt Bewegungen von 10 cm/s erkannt werden. Außerdem planen die USA, auch den P-Mode allgemein verfügbar zu machen. In jedem Fall steht das System aber für die Lebensdauer der Satelliten bis etwa zum Jahr 2030 zur Verfügung. Es wird inzwischen für Transportunternehmen, bei der Navigation, zur Diebstahlsicherung von Fahrzeugen usw. umfangreich genutzt. Daher stehen auch preiswerte Schaltkreise zur Verfügung. Schließlich besitzt auch die russische Seite ein ähnliches System, das „Glonass". Hier ist aber nicht gewiß, wie lange es noch gepflegt wird. Außerdem besteht im Frequenzbereich ein Konflikt mit dem im Aufbau befindlichen Kommunikations-Satellitensystem „Iridium".

Es sei noch erwähnt, daß allgemein *statische* Verfahren für Lage|Ort und *dynamische* für Bewegung|Drall zu unterscheiden sind. Letztere nutzen in einigen Fällen auch die Massenträgheit aus oder arbeiten mit einem kleinen Kreisel. Vgl. z. B. auch die Maus von Bild 8.4j auf S. 156. Ein Kreisel kann aber bestenfalls zwei Achsen erfassen. Für alle Achsen sind zwei Kreisel erforderlich.

8.8 Ergonomie und Behinderte

Die Kombination in der Überschrift mag Verwunderung auslösen. Aber dort, wo der „Gesunde" eine Erleichterung erhält, dort fängt oft für den Behinderten überhaupt erst die Möglichkeit des Umgangs mit der Technik an. Weltweit leben 750 Millionen Menschen mit Behinderungen. In Deutschland gibt es etwa 600000 Sehgeschädigte und 150000 Blinde. 1995 gab es in Deutschland fast 200 000 arbeitslose Schwerbehinderte. Davon konnten die Arbeitsämter knapp 35000 vermitteln. Behinderte sind meist besser qualifiziert als andere Arbeitslose[1]. Ein Beispiel ist der Oldenburger Dirk Ziese. Obwohl er querschnittsgelähmt und auf Pflege angewiesen ist, arbeitet er erfolgreich in der Druckvorstufe. Von ihm stammt die Aussage: „Vor dem Rechner sind alle gleich. Die Fähigkeit, gehen zu können, bedeutet keinen Vorteil, da ich damit einen PC auch nicht besser bedienen kann". Es gibt aber nur wenige Beispiele, welche die Öffentlichkeit erreichen. Hierzu zählt vor allem Stephen Hawking. Er ist seit etwa 1985 vollständig an den Rollstuhl gefesselt und kann sogar nicht mehr sprechen. Alles muß er mit dem Daumen dirigieren. Mittels Sonderlösungen von der Universität von Cambridge wurde ihm am 20. März 1997 sogar der Zugang zum Internet möglich.

Die andere Seite betrifft, daß auch die Arbeit am Rechner krank machen kann. So können nicht optimal betriebene Bildschirme zu Sehstörungen und Augenkrankheiten führen. Darauf wird noch besonders umseitig eingegangen. Noch belastender ist jedoch meist der Umgang mit der Tastatur. Hier ist allerdings die Gefahr nicht neu. Schon lange werden bei Stenotypistinnen einige Folgeerscheinungen als Berufskrankheiten anerkannt. Doch durch die Ausbreitung der Computer ist der Umgang mit der Tastatur fast allgemein üblich. Aber auch die ganze Gestaltung eines Arbeitsplatzes und die sich dadurch ergebende Körperhaltung ist wichtig. Zu einigen ungünstigen Auswirkungen gibt **Bild 8.24**f (umseitig) einen kleinen Überblick. Bezüglich eines optimalen Arbeitsplatzes weichen die Angaben in der Literatur z. T. erheblich ab. Deshalb enthält Bild 8.24g nur wenige Maße. Einheitlicher sind dagegen Listen wichtiger Forderungen. Sie betreffen meist Bildschirm, Tastatur, Arbeitsstuhl, Fußstützen, Tisch, Beleghalter und Bewegungsräume.

Die Sehentfernung zum *Bildschirm* ist zwischen 45 bis 60 cm (vorzugsweise 50 cm) günstig. Der Monitor sollte so höhenverstellbar sein, daß er auf Augenhöhe gebracht werden kann. Weiter ist es vorteilhaft, wenn er nach links und rechts drehbar sowie nach oben und unten neigbar ist. Dadurch lassen sich dann u. a. auch Reflexionen mindern. Die *Tastatur* sollte getrennt aufgestellt werden (ungünstig sind Kompaktgeräte, Laptops usw.). Die optimale Höhe liegt bei 2, maximal bei 3 cm. Handballenauflagen sind nur bei höheren Tastaturen vorteilhaft. Die Neigung des Tastenfeldes sollte 15° nicht überschreiten. Auf weitere Details wird unten eingegangen. Beim rollfähigen und drehbaren *Arbeitsstuhl* sollten der Sitz und die bis zu den Schulterblättern reichende Lehne höhenverstellbar sein. Der Sitz sollte außerdem nach vorne und hinten neigbar sein. Armstützen sind ungünstig. Für den *Tisch* wird eine Mindestbreite von 120 cm und eine Tiefe von 80 bis 90 cm empfohlen. Günstig ist es, wenn er zwischen 68 und 76 cm höhenverstellbar oder aber mindestens 72 cm hoch ist. Für den Beinraum sind mindestens 80 cm Breite, 70 cm Tiefe und 68 cm Höhe (an der vorderen Tischkante gemessen) erforderlich. Die Oberschenkel dürfen nicht an der Tischplatte anstoßen. Der ideale Winkel zwischen Ober- und Unterschenkel beträgt 90°. Dies kann oft erst durch *Fußstützen* erreicht werden, die in der Höhe und Neigung verstellbar sein sollen. Über die Beleghalter gehen die Meinungen stark auseinander. Gewünscht werden Höhenverstellbarkeit, Drehbarkeit und gleicher Sehabstand wie zum Monitor. Die Bewegungsräume sollten so großzügig angelegt sein, daß die Person weder an eigene noch an fremde Arbeitsgeräte anstößt, wenn sie ihren Stuhl zurückrollt oder sich einmal um die eigene Achse dreht bzw. wenn sie aufsteht, um andere Geräte zu bedienen.

Bei den Tastaturen sind in den letzten Jahren viele Versuche zur Verbesserung unternommen worden. Sie betreffen aber *nur* die ungewöhnlichen Belastungen bei der „geraden" Tastatur. Sie sind im Bild 8.24c durch Kreise gekennzeichnet. Um sie zu vermeiden, entstanden Tastaturen wie sie Bild 8.24a und b zeigen. Bezüglich dieser Versuche ist es erstaunlich, daß die schon im vorigen Jahrhun-

1 Computer Zeitung 15, 11.4.1996, S. 24

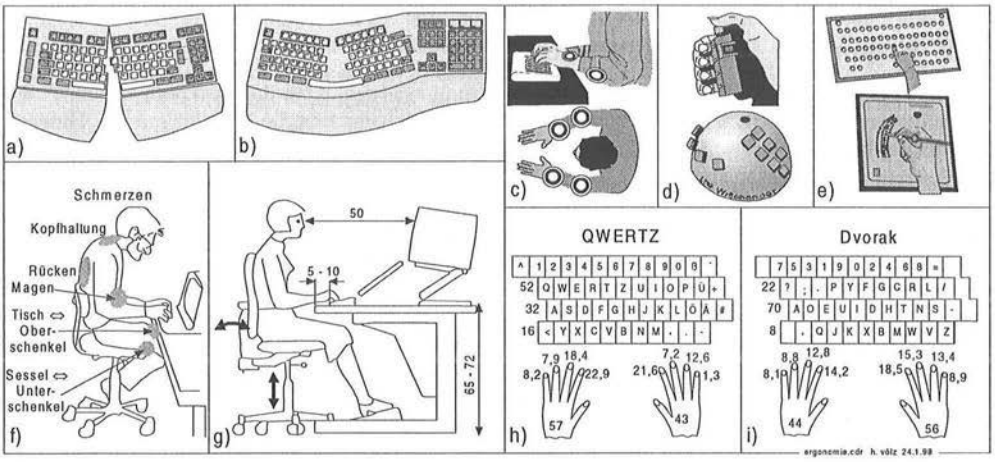


Bild 8.24 Ergonomie des Arbeitsplatzes und Beispiele für Sondertastaturen

dert von Dvorak unternommen Untersuchungen keine Berücksichtigung finden. Sie betreffen die Häufigkeit der Buchstaben. Er schuf deshalb eine Tastaturbelegung, die viel gleichmäßiger die Finger belastet. Der so mögliche Gewinn wird aus dem Vergleich der Bilder 8.24h und i ersichtlich. Selbst für das heute oft übliche „Zwei-Finger-Suchsystem" brächte es erhebliche Vorteile. Auch eine mehrfach versuchte, andere Tastatur konnte sich nicht durchsetzen. Sie ist besonders klein und ermöglicht sogar ein besonders schnelles Eingeben. Die wohl älteste Variante ist der schon 1981 beschriebene *Writehander* gemäß Bild 8.24d (unten) [KLE]. Er ermöglicht es, mit einer Hand den kompletten ASCII-Zeichensatz einzugeben. Die vier Finger werden dazu auf die vier etwas voneinander entfernten Tasten gelegt und der Daumen kann eine der 8 dicht beieinander liegenden Tasten betätigen. Durch Drücken von 0 bis 4 Tasten werden mit den vier Fingern $2^4 = 16$ Möglichkeiten ausgewählt. Mit dem Daumendruck auf eine der weiteren 8 Tasten erfolgt dann eine Eingabe der $8 \times 16 = 128$ möglichen Zeichen. 1990 wurde dann in der Zeitschrift „Elektroniker" eine andere Variante mit 8 Tasten beschrieben [NN15]. Eine RSI-Variante mit 5 Tasten wird noch in [BOR] genannt (Bild 8.24d, oben). Für Behinderte, insbesondere Spastiker, Contergan-Geschädigte und andere Menschen mit eingeschränkter Motorik, ist die Dateneingabe besonders schwierig. Daher wurden weitere Spezialtastaturen entwickelt. Sie können z. B. mit den Füßen bedient werden. Auch Umwege über Mund- und Kopfschreiber sowie Systeme zum Blasen und Saugen existieren. Besonders wichtig sind dabei u. a. mechanische Klemmvorrichtungen für die Doppeltasten, wie Alt, Ctrl und Shift. Weiter gibt es übergroße Keyboards, empfindliche Membran- und kompakte Mikrotastaturen. Zwei Sondertastaturen zeigt Bild 8.24e. 1994 wurde vom Schweizer Paraplegtiker-Zentrum eine Zungenmaus vorgestellt. Sie ähnelt einem Kinderschnuller und läßt sich ähnlich einer Zahnspange unter den Oberkiefer schieben. Sie enthält drei Schalter. Das Ziehen erfolgt durch Bewegen der Zunge, der Klick durch Zusammenbeißen. Die Software unterscheidet bewußte und ungewollte Berührungen[2].

Doch zuweilen ist überhaupt keine manuelle Eingabe erwünscht oder möglich. Hier kann dann die schon auf S. 173ff. behandelte Spracheingabe sehr nützlich sein. Doch darüber hinaus sind auch andere Varianten zumindest in Erprobung.

Ein Beispiel sind verschiedene Eye-Trackingsysteme, die u. a. fest am Kopf oder in der Nähe des Monitors befestigt sind (**Bild 8.25**a und d). Es wird hier manchmal auch von einer Blickmaus gesprochen. Ein ähnliches System „Blick" wurde auch im Heinrich-Hertz-Institut u. a. im Zusammenhang mit der Raumbildwiedergabe entwickelt (vgl. S. 226ff). Im linken Teil befindet sich eine Gruppe von

[2] Berliner Zeitung vom 29/30.10.94.

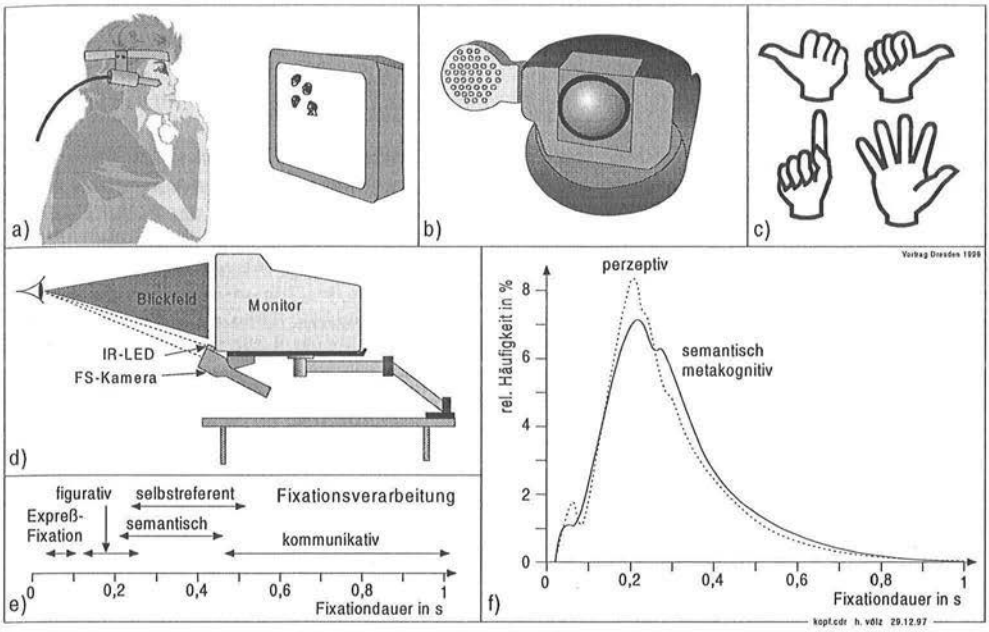


Bild 8.25 Beispiele für die Steuerung durch Blicke und Gesten

LED zur Beleuchtung und rechts die Kamera zur Beobachtung (Bild 8.25b). Bei all diesen Systemen können für das Fixieren einer Position, z. B. eines Icon, mehrere Zeitbereiche unterschieden werden (Bild 8.25e). Einmal gibt es Expreß-Sakkaden von etwa 0,1 s Dauer. Sie treten beim Orientieren | Fokussieren auf und sind die kürzeste menschliche Latenzzeit überhaupt. Im Gegensatz zu den folgenden längeren Zeiten sind sie nicht bewußt zu beeinflussen. Dann gibt es Suchsakkaden, die bei 120 bis 250 ms liegen. Auf noch höherer Ebene lassen sich u. a. Interessen-Punkte sowie intellektuelle und emotionale Zustände (noncommand, interest and emotion sensitive media) unterscheiden (Bild 8.25f). Schließlich kann festgestellt werden, daß eine sprachliche Beschreibung immer der visuellen Aufmerksamkeit um 400 bis 500 ms vorauseilt. Mit einem Zeitfilter um 0,5 s für die Fixierung ist es daher möglich, Kommandos auslösen zu lassen. Bei Übung kann dieser Schwellenwert auf 250 ms gesenkt werden.

Ein andere Variante ist das Virtuelle Display VTS (virtueller Touchscreen [ENG]). Mit seiner Entwicklung begann Christoph Maggioni um 1991 bei Siemens. Hier erfolgt die Steuerung durch Gesten. Das wiederzugebende Bild wird mit einem LCD-Projektor auf eine waagrechte Fläche projiziert. Darüber wird die Hand bewegt. Sie wird mit Infrarotlicht beleuchtet und durch eine Kamera beobachtet. Die Software erkennt dann ausgewählte Handzeichen, wie sie z. B. Bild 8.25c zeigt. Der Daumen nach rechts oder links bewirkt ein Umblättern. Der Zeigefinger entspricht einem Richtungshinweis. Die offene Hand heißt Halt usw. Auch Kopfbewegungen lassen sich in ähnlicher Weise interpretieren.

Behinderte haben oft viele Probleme mit graphischen Oberflächen. Besonders nachteilig macht es sich dann noch bemerkbar, wenn sie bei der nächsten Version geändert ist. Bei eingeschränkter Sehfähigkeit kann eine vergrößerte Darstellung der Zeichen, z. T. auf einem Zusatzschirm, oft weiter helfen. Auch spezielle Farbkontraste und ein vergrößerter Cursor können vorteilhaft sein. Zusätzlich können akustische Signale auf seine Position verweisen. Aus den vielen speziellen Möglichkeiten sollen nur die Systeme erwähnt werden, welche den Text vorlesen. Dabei gibt es aber Probleme mit Tabellen. In ihnen fehlt es nämlich an Stichwörtern, die eine automatische Konvertierung ermöglichen.

9 Ausgabetechniken

9.1 Überblick

Um technische Systeme bedienen bzw. mit ihnen interagieren zu können, müssen sie Signale ausgeben, die ein Mensch direkt oder mittelbar wahrnehmen kann. Prinzipiell sind dafür zwar alle Sinnesmodalitäten geeignet. In der Praxis hat jedoch die visuelle Ausgabe den Vorrang. Ihr folgt die akustische Wahrnehmung. Weitaus weniger kommen weiterer Möglichkeiten zur Anwendung. Für ein „tiefes, großes Erleben" z. B. im virtuellen Raum ist sogar eine möglichst vielfältige, vollständige Einwirkung aller Sinnesmodalitäten erwünscht. Die zuvor genannte Relation ändert sich jedoch teilweise bei Behinderten. Für Sehschwache z. B. sind Hören und Fühlen (u. a. Blindenschrift) die wichtigen Wahrnehmungsmodalitäten. Das sich hieraus ergebende Spektrum der Aktoren ist sehr groß. Im folgenden wird versucht, eine gewisse Systematik zu schaffen. Einen groben Überblick dazu gibt die nebenstehende Tabelle. Sie listet in der linken Spalte die Sinnesmodalitäten auf. Bild und Film werden darin deshalb unterschieden, weil Bilder statisch sind und der Film aus sich in der Zeit verändernden Bildern besteht. Diese Unterscheidung ist wegen der letzten Spalte wichtig. Sie betrifft die Ausgabe von unveränderlichen, fixierten Bildern, also den Druck. Bei den anderen Modalitäten ist eine solche Variante nicht möglich. Zur Erhaltung ihres aktuellen Zustandes muß ständig Energie | Stoff zugeführt werden. Die Gliederung der Spalten betrifft weiter die Entfernung bzw. den Raum, in dem die entsprechende Wahrnehmung möglich ist. Der Nahbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß hier die Technik in unmittelbarem Kontakt zu dem einzelnen Menschen steht. Dazu gehören natürlich auch alle direkten Stimulationen unserer Nervenzellen. Dies wurde aber nicht gesondert in die Tabelle aufgenommen. Diese Methode gilt nämlich für alle Sinnesmodalitäten. Außerdem wird diesem Kapitel nicht darauf eingegangen (u. a. S. 10ff u. 92ff). Schmecken ist nur im Nahraum möglich. Dazu müssen die entsprechenden (festen | flüssigen) Stoffe direkt auf die Geschmackszellen gelangen. Da Riechen gasförmige oder an Gas gebundene Stoffe betrifft, ist es fast gleichgültig, wo sich die Stoffe im Raum befinden. Durch Luftbewegungen und Diffusion können sie fast immer auf die Nasenschleimhaut gelangen.

	nah, Einzelperson	Wohnraum, mehr individuell	Großraum, öffentlich	auch räumlich (stereo)	beständig
Bild	Headset, Kleinstmonitor	Monitore, Anzeigen	Projektoren, Großbild		Druck
Film					
Schall	Kopf-, Ohrhörer	Lautsprecher	PA-Anlagen	ja	
Fühlen	Vibration, Bewegung, Blindenschrift	Wind, Transport			nein
Riechen	Stoffe				
Feuchte, Wärme	Heiz-, Kühlelement	Raumtemperatur und -feuchte		kaum	
Schmecken	Stoffe	nein			

Durch die schnelle Entwicklung der Sprachverarbeitung wird es immer wichtiger abzuschätzen, wann | wofür eine *bildliche* oder eine *akustische* Ausgabe sinnvoll ist. Meist ist Sehen bewußter als Hören. Es ist kälter, sachlicher. Wir *müssen* immer hören, können nicht das Ohr „zumachen". Bestenfalls können wir „Weghören". Das bedeutet aber nur, daß wir nicht auf den Inhalt des Gehörten achten wollen. Ob das wirklich gelingt, ist recht ungewiß. Im Gegensatz dazu gibt es beim Sehen mehrere *Aktivitätszustände*. Wir können optisch hellwach, wach, halbwach, tagträumend, träumend oder schlafend sein. Das „Wegsehen" ist bereits wesentlich stärker durch unser Wollen beeinflußbar. Wir schauen dann eben in eine andere Richtung und sehen das „Andere" wirklich nicht mehr. Diese Unterschiede haben offensichtlich eine tiefe Bedeutung. Sie sind u. a. durch Behinderte erkennbar. So ist z. B. bekannt, daß von Geburt an taube Menschen sehr große Probleme mit abstrakten Begriffen haben. Dies bereitet u. a. der katholischen Kirche für die Kommunion erhebliche Schwierigkeiten. Dazu muß ja der *Gott* nachweisbar erfaßt | verstanden sein. Derartige Probleme sind bei Blinden unbekannt. Andererseits müßten bei ihnen aber Defizite bezüglich der wichtigen *non-verbalen Kommunikation* – die ja in erster Linie optisch erfolgt – auftreten. Doch dazu sind kaum Aussagen vorhanden. Weiter ist zu beachten, daß Sehen bevorzugt parallel und Hören sequentiell erfolgt.

Gehörtes können wir durch Sprechen, Singen und Geräuschemachen wieder unmittelbar akustisch ausgeben. Dagegen können wir zwar mit den Augen viel bildliche Information aufnehmen, doch ein direktes Ausgeben innerer Bilder ist unmöglich. So wird verschiedentlich die Hoffnung ausgesprochen, daß uns dies einmal mittels des Rechners gelingen könnte. Daher ist es verwunderlich, daß wir offensichtlich ein weitaus besseres *Bild- als Musik-Gedächtnis* besitzen. Wer sieht sich schon einen Film mehr als dreimal an? Ein Musikstück hören sich dagegen fast alle viel häufiger, durchaus hundertmal an. Noch krasser sind die Unterschiede von Hören und Sehen in der Technik. So kennen wir für Sprache die phonetische Schrift und daraus abgeleitet den ASCII-Code bzw. den Unicode mit 16 Bit/Zeichen. In der Musik existieren analog die Notenschrift und der MIDI-Code. Auf diese Weise lassen sich sprachliche Texte und musikalische Abläufe *hochverdichtet* (bis zu 10000:1) – wenn auch verlustbehaftet – speichern. Für Bilder sind ähnliche Methoden nicht bekannt. Bereits Verdichtungen um 100:1 weisen oft schon deutlich Störungen auf. Dies erzwingt den hohen Speicheraufwand für Bild und Film. Doch mehr noch macht sich eine andere Möglichkeit der Codes bemerkbar. Mittels ihrer Hilfe können wir bestens Texte *manipulieren*. Nur so erzeugt ein Schriftsteller durch ständiges (schriftliches) Abändern großartige Texte. Auch ein Redner bereitet sich meist über schriftliche Aufzeichnungen vor. In der Musik existiert die Aussage, daß nur auf Basis der Notenschrift die europäische polyphone Musik entstehen konnte.

Das Verhältnis von Bild und Text hat auch in der Wissenschaft einige Konsequenzen (vgl. S. 178). In der Mathematik gab es ursprünglich *Arithmetik und Geometrie* als zwei völlig getrennte Richtungen. 1637 schrieb Descartes sein Buch „Le geometrie" und macht so die Geometrie berechenbar. Von da an werden Bilder in der Mathematik unerwünscht. Noch heute gibt es Mathematiker, die stolz darauf sind, daß in ihrem Buch kein Bild vorkommt. Denn bildliche Beweise gäbe es „eigentlich" nicht. Nur das Rechnen verfügt über die axiomatische Methode: So forderte Hilbert in seinen Thesen zum Mathematikkongreß 1900 und 1920/21 mit seinem Buch „Neubegründung der Mathematik" eine vollständige Axiomatisierung. 1918 legte Wittgenstein seinen ähnlich gelagerten „Tractatus logico-philosophicus" vor, den er allerdings später widerrief. Doch 1931 zeigte Gödel mit seinem „Unentscheidbarkeitsbeweis", daß oft eine vollständige Axiomatisierung unmöglich ist. 1935 wies dann Popper nach, daß Verifizierbarkeit als Kriterium für wissenschaftliche Aussagen nicht einlösbar ist. 1937 entdeckte schließlich Turing das Halteproblem. So gelangen auch langsam wieder Bilder zu ihrem „Recht". Einen Beitrag dazu lieferte die fraktale Geometrie. *Zemanek* schreibt eine Arbeit mit dem provokanten Untertitel: „Warum der Computer nicht ausschaut" [ZEM2]. Es ist häufig viel effektiver zu sagen, *schau her so funktioniert das*. Eine kleine Skizze oder ein Vormachen leisten oft mehr als jede noch so komplizierte Formel. Aber gerade dies kann der Computer nicht. Er ist immer an die sequentielle zeitliche Abfolge gebunden. So stellt denn auch die Künstliche Intelligenz die Frage, wie es kommt, daß eine Fliege kollisionsfrei fliegt. Sie berechnet doch bestimmt keine Trajektorien. Weiter wird dadurch auch die sprichwörtliche chinesische Aussage „ein Bild sagt mehr als tausend Worte" einsichtig. Dennoch wissen wir u. a. auch durch das Fernsehen: „Nichts kann besser lügen als ein Bild".

Diese Aussagen zum Verhältnis von Bild und Schall lassen sich noch erheblich erweitern. Doch insgesamt dürfte deutlich geworden sein, daß es z. Z. relativ ungeklärt ist. Deshalb überwiegt auch der jeweils technisch mögliche und intuitive Einsatz. Völlig anders wird es aber, wenn beide und noch weitere Sinnesmodalitäten erwünscht sind, insbesondere also dann, wenn der Mensch in eine künstliche oder virtuelle Welt versetzt werden soll. Bereits in den 70er Jahren schuf hierfür Myron Kreuger mit seinem Buch *„Artificial Reality"* den Begriff, der wohl heute am besten mit *Künstlicher Realität* umschrieben wird. Ursprünglich sollte der Terminus jedoch nur alle Aspekte der zwei- und dreidimensionalen Fernsehtechnik abdecken. Jetzt wird darunter eine *Computer-Umwelt* verstanden, die auf menschliche Eingriffe reagiert. Sie entspricht mehr der *Virtuellen Realität*, so wie diesen Begriff 1989 Jaron Lanier prägte. Sie wird als eine vom Computer geschaffene, interaktive, dreidimensionale Umwelt gesehen, in die eine Person völlig – mit allen Sinnen und Aktivitäten – eintaucht. Ähnliche Begriffe sind noch Virtual Environment, Virtual World, Artificial World. Wenn diese Umwelt zugleich mehrere Benutzer, mehrere Rechner und viele Datenmengen umfaßt, wird meist vom *Cyberspace* gesprochen. Da alle diese Inhalte auch zum erheblichen Teil auf Software beruhen, wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Mittels **Bild 9.1** (umseitig) sei jedoch versucht, einige Begriffe

zu präzisieren. Mit *Realität* sei all das bezeichnet, was uns im Bewußtsein als „Bild" einer beliebigen Art von Welt erscheint. Es handelt sich dabei sowohl um alle möglichen (Denk-) Modelle von Welt als auch unsere inneren Vorstellungen und Erlebnisse, wie Träume, Phantasiegebilde, Antizipationen usw. Da wir diese uns nur „geistig" vorstellen bzw. erzeugen, brauchen sie kein Äquivalent in der Welt zu haben. Dennoch steht nicht nur bei der Antizipation der Wunsch dahinter, sie in die Welt umzusetzen. Mit *Wirklichkeit* sei dagegen jener Teil von Welt bezeichnet, auf den wir einwirken (können), von dem wir Wahrnehmungen und Erlebnisse empfangen. Im Gegensatz zu den *Realitäten* befindet sie sich außerhalb von uns.

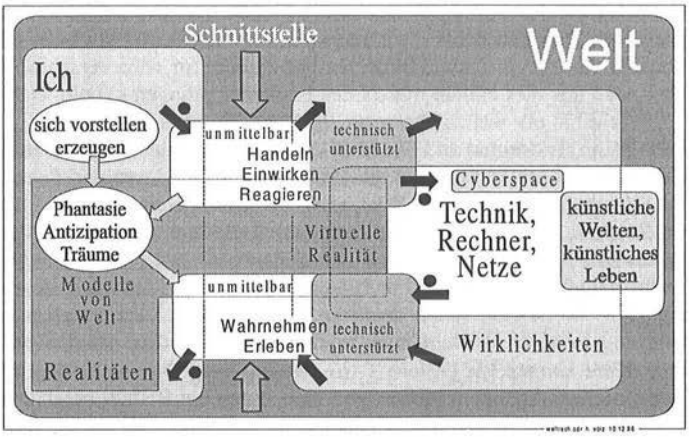


Bild 9.1 Zusammenhang von Ich und Welt. Nur die mit Punkten versehenen schwarzen Pfeile betreffen den Inhalt dieses Buches

Technik, Rechner und Netze sind gewiß ein Teil der Welt. Da wir sie oft aber nicht „durchschauen" oder gar völlig beherrschen, liegen sie auch teilweise außerhalb der Wirklichkeit. Wie bei der Welt können wir zwar vielfältig auf sie einwirken und erhalten auch wahrnehmbare Antworten. Doch vom sich dabei vollziehenden „automatischen" Ablauf ist uns nur weniges (bewußt) zugänglich. Z. B. kann mit Datenhelm (s. S. 225), -handschuh oder -suite eine *virtuelle Realität* entstehen. Im obigen Sinne ist das dann eine Realität (als Wirklichkeit) in uns, die nur mit dieser Technik erscheint. Denn sobald der Rechner abgeschaltet ist, besteht sie nicht mehr. Aber in unserem Bewußtsein verbleibt einiges vom Erlebten, ähnlich wie nach einem Traum. Daher wurde im Bild das Gebiet der Realitäten zur Welt hin etwas erweitert. Beim Cyberspace schaffen wir hingegen Veränderungen in der Wirklichkeit. Mit den technischen Hilfsmitteln „bewegen" wir uns in diesen Medien. Dabei können wir auf andere Personen „treffen", dort handeln, Daten ablegen, Botschaften hinterlassen usw. Wichtig sind dazu u. a. die Speicherfähigkeit und die Hyperlinks. Dadurch verbleiben die von uns verursachten Änderungen (zumindest teilweise) auch dann noch bestehen, wenn wir wieder aus dem Raum herausgetreten sind. Beim Wiedereintritt können wir sie noch vorfinden. So ist unser Handeln, Wahrnehmen, Reagieren und Erleben dem in der klassischen Wirklichkeit recht ähnlich.

Weiter entfernt für uns liegen die künstlichen Welten und das künstliche Leben. Beide existieren nur in Rechnerstrukturen, vor allen in deren Speichern und Programmen. Das künstliche Leben ist dabei sogar sich selbst genug. Es besitzt die virtuellen Fähigkeiten, sich zu vermehren, zu sterben, zu evolutionieren usw. Von den künstlichen Welten und dem künstlichen Leben können wir lediglich die Veränderungen, ihr Geschehen über spezielle Rechnerperipherie erkennen. Allerdings können wir teilweise auf das Geschehen Einfluß ausüben.

9.2 Bildausgaben

Eine Systematik von Bildern kann unter mehreren Gesichtspunkten erfolgen. Wie bereits auf S. 178ff behandelt, betrifft das u. a.

- die Art der Erzeugung | Speicherung (Pixel-, Vektor-Bilder),
- die Farbe, gekennzeichnet durch die Bit-Tiefe und
- die Dimension als 2-, $2^1/_2$- oder 3-dimensional (auch SIRDS, s. S. 231).

Jetzt kommen noch hinzu

- die Methode der Ausgabe,
- die Bildauflösung, gekennzeichnet durch die Pixelanzahl (z. B. 600×800),
- die Auflösung in der Fläche als Punkte/mm bzw. in dpi (dot per inch) und
- die Bildgröße als ausgefüllte Fläche (z. B. als A4 oder Diagonale eines Monitors in Zoll).

Der erste Punkt muß noch weiter untersetzt werden. Die anderen drei Punkte treten dabei als kennzeichnende Parameter auf. Vor allem sind zu unterscheiden

- Bildröhren (u. a. Delta- Inline-Röhre oder Trinitron),
- Flachdisplays (u. a. LCD, Plasma-Panals,)
- Großbildtechnik (u. a. LCD, Eidophor, Beamer, DMM, Laserprojektor und Lichtventil),
- Stereo-Verfahren mit oder ohne Brille sowie Datenhelm,
- Holographie,
- Druck und Film.

Hieraus ergibt sich zugleich die weitere Untergliederung dieses Hauptabschnittes. Im folgenden wird dabei nicht behandelt, wie die Bilder entstehen (z. B. durch Photographie, Scannen und Zeichnen), wie ihre Bearbeitung mittels Programmen erfolgt und wie die Bilder genutzt werden (u. a. Präsentation, Dokumentation und Morphing). Es wird angenommen, daß die Bilder als Dateien oder Datenstrom vorliegen und daß darüber die Ausgabe erfolgt.

9.2.1 Bildröhren

Die Grundlage der heute üblichen Monitore und Fernsehbildschirme ist die Bildröhre. Sie geht auf die 1897 von Karl Ferdinand Braun erfundene Kathodenstrahlröhre, daher auch Braunsche Röhre genannt, zurück (englisch CRT = cathode ray tube). In ihrer historischen Form zeigt sie **Bild 9.2**a (nächste Seite). In einem luftleer gepumpten Glasgefäß (Röhre) befinden sich zwei Elektroden, links die Kathode und rechts die Anode. Zwischen ihnen liegt eine Spannung von etwa 50 kV. Die Anode hat in der Mitte ein kreuzförmiges Loch. Braun entdeckte, daß von der Kathode aus Kathodenstrahlen geradlinig zur Anode gehen. Sie durchdringen die Anode im Kreuzbereich und erzeugen dann auf dem dahinter liegenden Glas eine Fluoreszenz. Erst nachher stellte sich heraus, daß die Kathodenstrahlen aus Elektronen bestehen (Elektronenstrahlen). Die Erzeugung der Elektronen wurde später durch die Thermoemission (s. S. 117ff) wesentlich vereinfacht. Dann wurden die Möglichkeiten zu ihrer Bündelung (bzw. Fokussierung, s. S. 123ff) und Ablenkung (s. S. 113ff) erkannt. Die Ablenkung in einer Bildröhre kann also magnetisch (Bild 9.2b) und elektrisch (Bild 9.2c) erfolgen. Die elektrische Ablenkung erfolgt zwar nahezu leistungsfrei, ermöglicht aber nur kleine Ablenkwinkel α. Wenn nämlich eine Bildschirmfläche gemäß Bild 9.2d überstrichen werden soll, muß das zweite Elektrodenpaar für die Ablenkung einen hinreichend großen Abstand besitzen. Das verlangt aber hohe Spannungen. Eine solche Röhre wird sehr lang. Sie kommt daher nur bei Oszillographen und z. T. bei Bildaufnahmeröhren (S. S. 183ff) vor. Eine magnetische Ablenkung ermöglicht große Winkel, hat aber mehrere andere Nachteile. Für eine gute Fokussierung müßte der Bildschirm eine Kugeloberfläche mit großer Krümmung sein (Bild 9.2e). Andernfalls ist ein komplizierter „Brennweiten-" Ausgleich für die Randstrahlen erforderlich. Weiter muß das Magnetfeld möglichst dicht an den Elektronenstrahl herangeführt werden. Da die Spulen eine beachtliche Induktivität besitzen, ändert sich der sie durchfließender Strom stark mit der Frequenz. Dies bringt insbesondere dann Probleme, wenn mehrere Frequenzen, wie bei einem Multifrequenzmonitor, notwendig sind. Insgesamt entsteht so ein Röhrenaufbau wie ihn Bild 9.2f zeigt. Daraus ergibt sich der komplizierte Aufbau der beiden pulen für die Ablenkung (Bild 9.2g). Letztlich muß das Frontglas der Bildröhre aber aus einem rein mechanischen Grund gekrümmt bleiben. Da im Innern der Röhre hohes Vakuum herrscht, hat es einer hohen Kraft (Atmosphärendruck mal Oberfläche) standzuhalten. Andernfalls besteht die Gefahr der Implosion. Hierbei würden alle Teile zum Zentrum der Röhre fliegen. Dabei nehmen sie aber soviel Energie auf, daß sie weit darüber hinaus fliegen. Die hinten liegenden Teile kämen also auf den

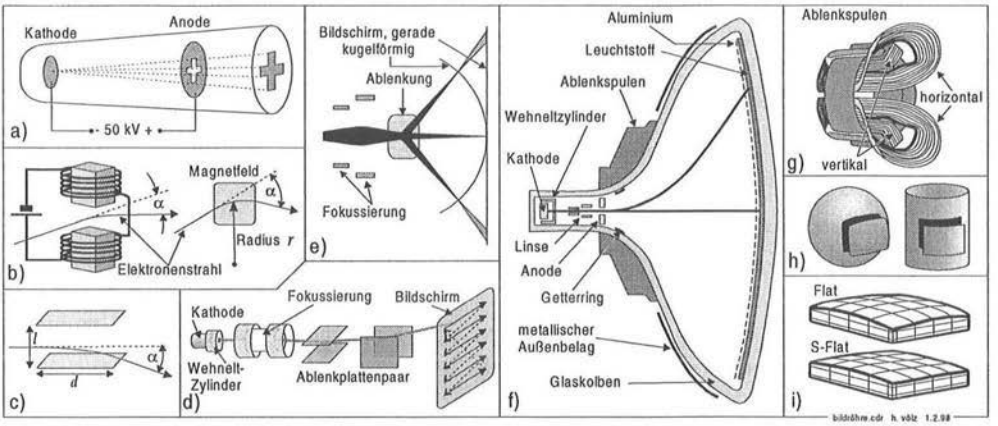


Bild 9.2 Aufbau und Besonderheiten einer Bildröhre

Betrachter zu und würden ihn schwer verletzen. Dieser Effekt trat in der Anfangszeit der Fernsehtechnik tatsächlich auf. Deshalb wurde noch eine Schutzscheibe vor der Bildröhre angeordnet. Heute tritt dies infolge der entsprechenden Glasdicke und der Behandlung des Spezialglases praktisch nicht mehr auf. Es sind aber zwei Krümmungsvarianten in Gebrauch, der Ausschnitt aus einer Kugeloberfläche (Bild 9.2h links) und der Zylinderausschnitt (rechts). Die Zylinderform wird fast ausschließlich bei der Trinitron-Röhre (s. u.) von Sony benutzt. Im Laufe der Entwicklung wurde einmal der maximale Ablenkungswinkel von 70 bis etwa 130°erhöht. Zum anderen wurde der Krümmungsradius des Frontglases vergrößert. So unterscheidet man heute die Typen Flat (flach; eigentlich Flatline- bzw. Planar-Bildröhre) und S-Flat (S = super; Bild 9.2i). Für eine 29-Zoll-Röhre wurde bei der letzen gegenüber der Flat-Röhre der Krümmungsradius von 169 auf 240 cm gesteigert. Ziel ist es, möglichst kurze, leichte und große Bildröhren zu erhalten. Dem sind aber physikalischen Grenzen gesetzt. Die größten Typen heißen *Jumbo*-Bildröhren und besitzen eine Bilddiagonale von 80 bis 92 cm. Die Auswege sind der Flachbildschirm (s. S. 216ff) und die Bildprojektion (s. S. 219ff). Um bei der Bildröhre ausreichende Helligkeit zu erreichen, sind für die gebräuchlichen Monitoren Beschleunigungsspannungen um 20 kV notwendig. Beim Auftreffen der Elektronen auf den Leuchtschirm wird nur ein Teil ihrer Energie in Licht verwandelt. Der andere Teil wird nur abgebremst und erzeugt daher eine Röntgenstrahlung. Sie ist jedoch noch so weich, daß keine Schädigungen für den Menschen zu erwarten sind. Weiter wirkt sich die hohe Spannung auch als elektrisches Feld in der Umgebung der Röhre aus. Sie führte früher dazu, daß sich auf dem Gehäuse der Monitore Staub und Schmutz sammelte. Durch das gewachsene Umweltinteresse ist heute dieses Feld und auch das magnetische Ablenkungsfeld weitgehend nach außen abgeschirmt (s. S. 210f).

9.2.2 Farbbildröhren

Um farbige Bilder mit Braunschen Röhren zu erzeugen, bestehen mehrere Möglichkeiten:

1. Es werden drei Röhren, je eine mit dem Leuchtphosphor Rot, Grün und Blau verwendet. Über Spiegel entsteht das zusammengesetzte Bild.
2. Es wird eine Röhre mit weißem Licht benutzt. Ein rotierendes Farbfilter erzeugt nacheinander die drei Grundfarben.
3. Es wird ein Leuchtphosphor benutzt, der je nach Beschleunigungsspannung die drei Grundfarben nacheinander entstehen läßt.
4. Es wird eine Röhre mit drei Elektronenstrahlen benutzt. Sie treffen getrennt auf roten, grünen beziehungsweise blauen Leuchtphosphor.

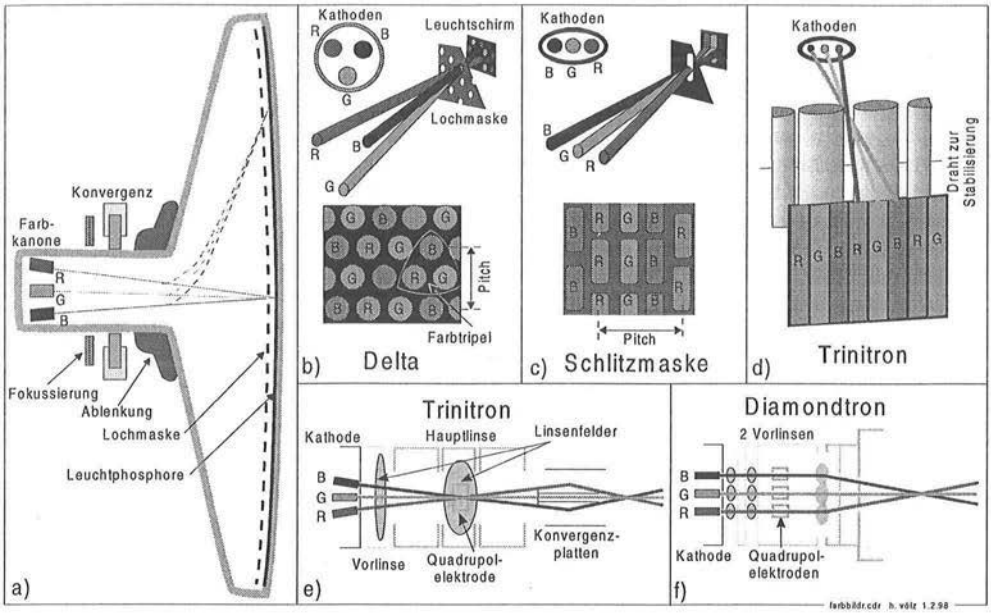


Bild 9.3 Aufbau einer Farbbildröhre und ihre verschiedenen Typen

Alle Verfahren haben bei unterschiedlichen Anwendungen, die nicht nur Bildröhren betreffen, ihre Anwendung gefunden. Bei Bildröhren wurden vorübergehend nur die Verfahren 2. und 3. ernsthaft versucht. Für das dritte Prinzip entstand zeitweilig eine spezielle Penetrationsröhre [VÖL3]. Durchgesetzt hat sich jedoch nur das vierte Prinzip. Den vereinfachten Aufbau einer solchen Röhre zeigt **Bild 9.3**a. Mit drei Systemen werden drei getrennte Elektronenstrahlen erzeugt. Jeder Strahl steht für eine Grundfarbe und ist getrennt in der Intensität steuerbar. Alle drei Strahlen werden zum Bildschirm hin auf einen Punkt justiert. Ihre Ablenkung erfolgt gemeinsam durch eine magnetische Ablenkeinheit. Das entscheidende an der Technik ist die Lochmaske (auch Schattenmaske genannt) mit dem dazu passend aufgebauten Leuchtschirm. Die Standardmaske einer Farbfernsehröhre enthält mindestens 300000 feine Löcher. Bei guten Monitoren werden über eine Million verwendet. Hinter der Lochmaske befinden sich genauso viele Leuchtstoffpunkte für jede der drei Grundfarben. Es sind also insgesamt dreimal so viele. Für dieses Grundprinzip sind im Laufe der Jahre mehrere Varianten mit verschiedenen Vor- und Nachteilen entstanden.

Zunächst sei das älteste, das **Delta-Prinzip,** beschrieben (Bild 9.3b). Die drei Kathoden sind hierbei an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks (griechisches Delta „Δ") angeordnet. Die Elektronenstrahlen werden auf die Oberfläche der Lochmaske fokussiert. Daher divergieren sie hinter der Lochmaske. Sie erreichen so auf dem Leuchtschirm drei getrennte Punkte, die wieder auf den Kanten eines gleichseitigen Dreiecks liegen. Dort befinden sich getrennt voneinander die drei Leuchtstoffe für rot, grün und blau. Diese drei Leuchtstoffpunkte bilden zusammen ein Farbtripel. Der Abstand der Farbtripel wird als Pitch-Abstand bezeichnet. Er bestimmt das kleinstmögliche Pixel und betrug anfangs 0,4 bis 0,3 mm. Heute werden bereits Werte bis nahe 0,2 mm erreicht.

Ein zentrales Problem aller Lochmaskenröhren ist die notwendige, sehr hohe *Präzision.* Die drei Elektronenstrahlsysteme, die Löcher der Maske und die zugehörigen Leuchtpunkttripel müssen nämlich exakt aufeinander ausgerichtet sein. Nur dann ist gute Farbreinheit garantiert. Sie bedeutet, daß die drei Elektronenstrahlen überall auf dem Bildschirm genau auf die zugehörigen Leuchtstoffpunkte treffen. Abweichungen führen zu Farbverfälschungen. Sie treten meist zuerst an den Rändern des Bildschirms auf. Um so eine hohe Genauigkeit bei der Herstellung zu erreichen, sind besondere Tech-

nologien entstanden. Zunächst wird dabei meist der Glaskolben des Bildschirms weitgehend vorbereitet, u. a. *gleichmäßig* mit verschiedenen Substanzen beschichtet. Nachdem auch die Lochmaske richtig eingebaut ist, erfolgen spezifische Belichtungen, Aufdampfungen und ähnliche Prozesse. Sie erfolgen genau von jenen Stellen aus, wo sich später die drei Kathoden befinden. So entstehen die einzelnen Farbflächen genau an den „richtigen" Orten. Für den korrekten Einbau der Elektronenstrahlsysteme werden anschließend speziell angepaßte Vorrichtungen benutzt.

Die hochgenaue Herstellung der Röhre garantiert aber nur die *Möglichkeit* der Farbreinheit. Ob sie erreicht wird und auch unter den Betriebsbedingungen auf lange Sicht erhalten bleibt, hängt von vielen weiteren Einflüssen ab. Nach der Fertigstellung der Röhre und dem Anbringen der Ablenkung, Fokussierung usw. muß jede Röhre zunächst einmal individuell durch kleine Hilfsmagnete fein justiert werden. Sie werden auf die Röhre in unterschiedlicher Lage an verschiedenen Stellen aufgeklebt. Dieser Prozeß ist sehr arbeitsintensiv. Er erfordert sehr spezielle Hilfsmittel und viel Erfahrung. Daher ist er sehr teuer. Nur Systeme, die gut abgeglichen sind, werden als Markenprodukte vertrieben. Geräte, bei denen das nicht geschah oder nicht möglich war, werden häufig mit minderer Qualität als Noname-Produkte vertrieben. Aus dem geschilderten Abgleichprozeß geht auch hervor, warum ein hochwertiges System möglichst geringen mechanischen Belastungen ausgesetzt werden sollte.

Ein weiterer Störfaktor sind thermische Prozesse. Auf die Maske treffen nämlich viele Elektronen auf. Das sind jene, die nicht die Löcher passieren. Je nach der Größe des Bildschirms und eingestellter Helligkeit sind das Leistungen bis zu mehreren zehn Watt. Damit die so hervorgerufene Erwärmung sich möglichst gering auswirkt, sind heute Masken aus Invar-Metall üblich (NiFe-Legierung mit extrem geringer Wärmeausdehnung). Außerdem wird die Maske mit speziell abgeglichenen Thermostreifen aufgehängt. Weiter kann sich die Maske durch äußere Einflüsse – unter anderem auch durch das Erdfeld – aufmagnetisieren und dann die Elektronenstrahlen unerwünscht ablenken. Deshalb erfolgt beim Einschalten des Farbfernsehers bzw. des Monitors eine automatische Entmagnetisierung. Über einen Kaltleiter (Thermistor) fließt durch eine speziell dafür vorgesehene Spule kurzfristig ein großer Netzwechselstrom. Mit der Stromerhitzung des Heißleiters klingt er langsam ab und bewirkt dabei die Wechselstromentmagnetisierung. Dieser Prozeß kann ähnlich mit einer speziellen Taste, meist als „Degauss" bezeichnet, auch zusätzlich manuell erfolgen.

Alle modernen Röhren besitzen eine Glaseinfärbung mit einer Transmission um 50 %. Dadurch verringert sich zwar etwas die Helligkeit. Aber gleichzeitig wird reflektiertes Fremdlicht wesentlich stärker absorbiert. So wird der Kontrast deutlich erhöht. Ferner werden zwischen die einzelnen Leuchtphosphore schwarzmattierte Kohleflächen eingefügt. Dadurch steigt sowohl die Farbreinheit als auch der Kontrast. Röhren dieser Art tragen oft die zusätzliche Bezeichnung „Black" (schwarz), „Black Line" oder „Black Matrix".

Der zweite Farbröhrentyp heißt **Inline-Röhre**. Sie wird auch Schlitz- oder Streifenmaskenröhre genannt. Gemäß dem Namen befinden sich alle drei Elektronenstrahl-Kanonen in einer Linie (Bild 9.3c). Statt der runden Löcher verwendet sie Langlöcher in der Maske. Auch die Leuchtphosphore sind so angeordnet. So bleiben im Gegensatz zur Delta-Röhre fast nur eindimensionale Farbfehler übrig. Auch das Justieren auf Farbreinheit ist deutlich einfacher. Schließlich wird hierdurch wesentlich besser die Bildschirmfläche ausgenutzt. Deshalb zeigen Inline-Röhren meist höhere Brillanz.

Der dritte Monitortyp ist die **Trinitron-Röhre** von Sony. Sie wird auch Gitter-, Streifen- oder Drahtmasken-Röhre genannt. Sie verwendet nämlich nicht mehr geätzte Masken, sondern feine, senkrechte Drähte, die ähnlich wie bei einer Harfe aufgespannt sind (Bild 9.3d). Die farbigen Leuchtphosphorschichten sind von oben bis unten durchgehend und auch nur in dieser Richtung durch die Black-Matrix getrennt. Aus diesem Aufbau folgt auch zwangsläufig die zylinderförmige Oberfläche (vgl. Bild 9.2h rechts). Da so die Bildschirmfläche fast vollständig genutzt wird, hat die Trinitron-Röhre eine hohe Brillanz. Damit das Drahtsystem jedoch hinreichende Stabilität erlangt, sind zwei feine waagrechte Drähte notwendig. Sie verbinden die senkrechten Drähte und befinden sich im oberen und unteren Drittel des Bildschirms. Folglich sind sie immer als feine Schatten auf dem Bildschirm zu erkennen. Diese Erscheinung ist also kein Bildschirmfehler.

Um 1996 brachte Mitsubishi eine geringe Abwandlung der Sony-Trinitron-Röhre heraus und nennt sie Diamondtron. Auch sie besitzt eine Drahtmaske mit vertikal angeordneten Elektronenstrahl-

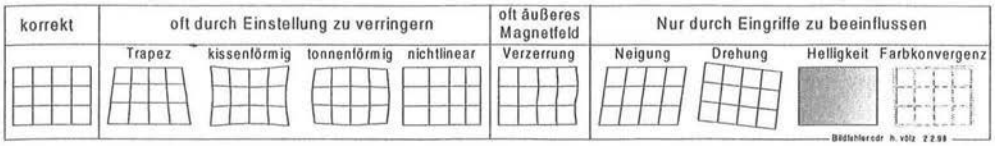


Bild 9.4 Zusammenstellung einiger wichtiger Bildfehler

systemen. Mitsubishi baut jedoch die Elektronenstrahlquellen (3-gun-3-beam statt 1-gun-3-beam) anders auf (Bild 9.3f). Jeder Elektronenstrahl erhält also bei Mitsubishi u. a. seine eigenen Fokussierlinsen. So sind neben anderen Vorteilen kürzere Bildröhren möglich.

Die subjektiv empfundenen Eigenschaften der Röhrentypen weichen z. T. deutlich von den objektiv festzustellenden ab. So beeinflussen Nebeneffekte die subjektiv empfundene Bildschärfe. Die Delta-Röhre zeichnet etwas weicher als die anderen Typen. Das hat für photographische Bilder gewisse Vorteile. Am härtesten zeichnet die Trinitron-Röhre. Sie wird daher bei CAD bevorzugt. Nicht immer ist der hohe Kontrast einer Trinitron-Röhre erwünscht. Bei schrägen Linien neigt die Delta-Röhre zum Moiré. Bei der Trinitron-Röhre treten dagegen eher treppenförmige Stufen auf. Die Delta-Röhre nähert sich besser einem gedruckten Bild an. Mit zunehmendem Alter neigt die Trinitronröhre stärker als die anderen Röhren zur Dejustierung. Allerdings ist bei ihr eine Nachjustage recht leicht und z. T. sogar von Laien durchführbar. Die Inline-Röhre liegt in den meisten Eigenschaften zwischen den beiden Extremen. So hat jeder Typ gewisse Vor- und Nachteile. Dennoch steigen im Mittel die Qualität und der Preis in der hier gewählten Reihenfolge.

9.2.3 Fehler bei Bildröhren

Für die Qualität eines Bildes sind zumindest drei Fehlerklassen zu unterscheiden:

- Reine *Geometriefehler* treten bereits bei Schwarz-Weiß-Röhren auf.
- *Farbfehler* sind auch Geometriefehler, wenn sie unterschiedlich für die Farben Rot, Grün und Blau auftreten. Hinzu kommen Fehler in der Farbreinheit.
- *Indirekte Fehler* sind z. B. Unschärfe, Treppenbildung, Moiré, Rauschen usw.

Einige dieser Fehler gehen auf Produktionsmängel, schlechte Werksjustage, Alterung oder sorglosen Umgang, z. B. mechanische Belastungen des Monitors zurück. Sie sind daher – wenn überhaupt – nur mit Eingriffen in den Monitor zu verringern. Für andere Mängel besitzen Monitore oft Einstellmöglichkeiten. Um diese Alternativen besser unterscheiden zu können, ist eine weitere Klassifikation der Fehler hilfreich. Zunächst sind die einfachen und leicht einstellbaren Abweichungen von der *Bildgröße und Bildlage* zu nennen. An zweiter Stelle folgen geometrische Verzerrungen. Dazu gehören die *trapez-, kissen-* und *tonnenförmigen* Abweichungen (**Bild 9.4**). Sie rühren vor allem von Wechselwirkungen zwischen den Signalen für die Zeilen- und Bildablenkung her. Deshalb sind sie relativ gut durch Regler, die diese Signale beeinflussen, zu korrigieren. Die *Nichtlinearität* beruht auf Mängeln im Ablenkungssignal. Sie kann daher in x- und/oder y-Richtung vorkommen. Prinzipiell ist sie auch durch Regler zu verringern. Doch nur bei wenigen Monitore ist das möglich. Einseitige oder unregelmäßige *Bildverzerrungen* treten hauptsächlich durch störende äußere Magnetfelder, z. B. von Lautsprechern oder Transformatoren, auf. Hier müssen dann die störenden Geräte oder der Monitor anders aufgestellt werden. In extremen Fällen können sie auch von der Maske (s. o.) herrühren. Dann hilft meist die Taste „Degauss". Die weiteren Fehler in Bild 9.4 sind ernsthafter, weil kaum behebbar. Wenn z. B. die beiden Ablenkspulen nicht genau senkrecht zueinander stehen, entsteht eine *Neigung* des Bildfeldes. Durch Erschütterungen kann sich die Justage oder die Lage der Ablenkspulen verändern. Dann entsteht u. a. die Drehung des Bildes. Ungleichmäßige *Helligkeit* des Bildes beruht meist auf Produktionsfehlern bei der Bildröhre. Auf mangelnde *Farbkonvergenz* (farbige Ränder) und *Bildreinheit* wurde bereits oben eingegangen.

Die **indirekten Bildfehler** sind so vielfältig, daß im folgenden nur die wichtigsten beschrieben werden. Ein *Moiré* geht auf eine Wechselwirkung zwischen dem periodischen Raster der Farbpunkte und

dem dargestellten Bild zurück. Es handelt sich dabei um eine optische Wahrnehmung (Täuschung), die generell bei der Überlagerung von zwei oder mehr regelmäßigen Strukturen auftreten kann. Trotz gewisser Ähnlichkeit ist das Moiré vom Alaising, z. B. der Treppenbildung, zu unterscheiden. In beiden Fällen gibt es Maßnahmen zum Verringern, z. T. sogar mit manueller Einstellbarkeit. Durch ein zu hell eingestelltes Bild oder Mängel bei der Fokussierung (elektronische Linse) kann eine *Unschärfe* des Bildes entstehen. Der Elektronenstrahl wird dann so dick, daß er gleichzeitig auf mehrere Farbtripel trifft. Bei einer schnellen Änderung der Bildhelligkeit | Farbe kommt es zuweilen zu einer kurzzeitigen Änderung der Bildgröße (*Pumpen*). Die Ursache dafür ist eine unzureichende Stabilisierung der Hochspannung für die Bildröhre. Ein weiterer Effekt ist das *Grieseln:* Selbst bei einem Standbild flimmern dann einzelne Pixel. Besonders deutlich tritt dies meist an Hell-Dunkel-Übergängen auf. Die Ursachen können u. a. Mängel in der Grafikkarte oder unzureichende Anpassung des Monitors sein.

9.2.4 Strahlungen bei Monitoren

Zumindest zwei Strahlungen sind bei Monitoren deutlich zu unterscheidenden, nämlich

1. die *kompromittierende* und 2. die *gesundheitsschädliche* Strahlung.

Die *kompromittierende* Strahlung breitet sich vom Monitor durch die Luft, über Heizungs- und Wasserleitungsrohre sowie über die Netzleitung aus. Sie heißt auch Tempest-PC (temporary emanation and spurious transmission = zeitweilige Ausstrahlung und falsche Fortpflanzung). Bekannt ist sie seit etwa 1965. Öffentlich bekannt gemacht wurde sie durch Wim van Eck 1985. Über sie können Rechner über beachtliche Entfernungen belauscht werden. Mit hohem Aufwand sind dabei Entfernungen bis zu einigen km zu überbrücken. Alles, was zum Monitor an Signalen gelangt, ist so zu erfassen. Rechner, die dies vermeiden, sind sehr teuer und stehen nur z. T. privaten Einrichtungen zur Verfügung. 1997 stellte die Schweizer Firma *Human Interfaces* ein Störgerät bereit, das die Monitorstrahlung mit Rauschen im Bereich von 5 MHz bis einige GHz überdeckt (Funkschau 54, 21/97).

Jeder Monitor erzeugt drei Strahlungsarten, die bei hoher Intensität für den Menschen schädlich sind. Die *weiche Röntgenstrahlung* entsteht durch die auf den Bildschirm treffenden und dort abgebremsten Elektronen. Die dabei entstehende Röntgendosis ist jedoch so gering, daß sie selbst gegenüber der natürlichen Radioaktivität zu vernachlässigen ist. Die Hochspannung und die Ablenkungsfelder bewirken ein *magnetisches* und *ein elektrisches* Feld in der Umgebung des Monitors (vgl. S. 91). Über ihre Schädlichkeit gehen die Meinungen der Fachleute deutlich auseinander. Die entsprechenden statistischen Ergebnisse sind noch weniger korreliert, als z. B. beim Wohnen in der Nähe von Hochspannungsleitungen oder Hochfrequenzsendern. Dennoch ist es natürlich besser, die sehr strengen Forderungen verschiedener Normen zu beachten. Besonders einflußreich waren die schwedische staatliche Prüfstelle für Meßgeräte, MPR (Statens **M**ätoch **Pr**ovad) und die Schwedische Zentralorganisation der Angestellten und Beamten in Stockholm TCO. Sie haben z. B. im MPR II Empfehlungen für Störfelder von Monitoren festgelegt. In einem Abstand von 50 cm sollen nicht überschritten werden: 500 V/m für statische Felder; 25 V/m und 250 nT bei 5 Hz bis 2 kHz sowie 2,5 V/m und 25 nT bei 2 bis 400 kHz. Noch strengere Wert legt TCO '92 fest. Dazu kommen dann noch die Stromsparvorschriften von Nutek. TCO '95 hält an diesen Empfehlungen fest und ergänzt sie u. a. bezüglich der Verwendung von schadstoffarmen Materialien. In die Empfehlung wurden weiter ergonomische Eigenschaften für den gesamten Rechner einbezogen, z. B. bezüglich Lärm. Weitere Normungen und Empfehlungen werden z. B. von den folgenden Organisationen gegeben. Die ISO (International Organization for Standardisation) hat in den Normen ISO 9241-x Forderungen an die Bildqualität und das Design von Monitoren festgelegt. Dabei sind Bedingungen für Entspiegelung, Flimmerfreiheit, Kontrast, Sichtabstand, Zeichenbreite, -höhe und -gleichmäßigkeit zu erfüllen. Vom TÜV, dem VDE und Berufsgenossenschaften wird das Siegel für

Bild 9.5 Einige Plaketten und Prüfsiegel

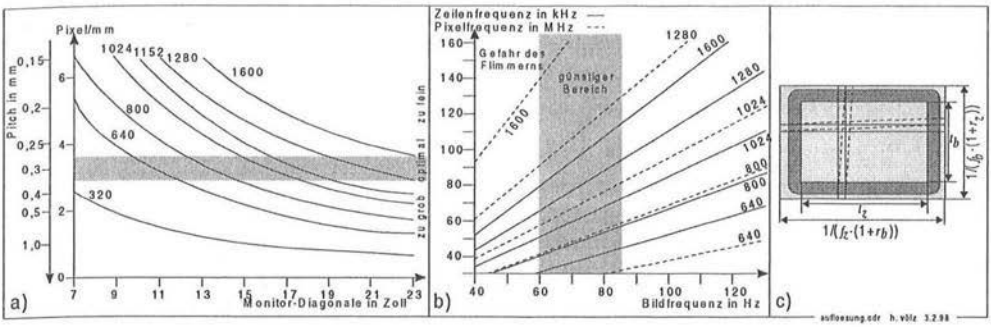


Bild 9.6 Grenzen der Monitorauflösung und Abhängigkeit der wichtigsten Frequenzen

geprüfte Sicherheit (GS) vergeben. Sie betreffen die Sicherheit der Informationstechnik gemäß EN 60950, ZH 1/618 und ISO 9241-3. Der *Blauer Engel* lehnt sich an die Ergonomie-Empfehlungen von MPR II und ISO9241-3 an. Ähnliches gilt für das TÜV-Ergonomie-Siegel bezüglich ISO 9241-3 und 9241-8. Zusätzlich sind Kriterien für die Bildqualität zu erfüllen. Der TÜV Rheinland legt auch noch Wert auf Einhaltung der EMV-Richtlinien (elektromagnetische Verträglichkeit) sowie recyclingsgerechte Konstruktion und Altgeräte-Recycling (ECO-Kreis 1995). Das Aussehen einiger dieser Siegel und Plaketten zeigt **Bild 9.5**.

9.2.5 Betriebswerte

Jede Farbildröhre besitzt nur eine bestimmte Auflösung. Das kleinste erzeugbare Pixel entspricht dem Pitchabstand. Jedoch wird das Auge vielfach früher eine Grenze setzen. Außerdem ist es nicht vorteilhaft, wenn Pitch- und Pixelgröße annähernd übereinstimmen. Dann ist nämlich die Gefahr für ein Moiré besonders groß. In der Praxis wird man von einem Monitor mit einer Diagonale einer Nenngröße von z Zoll ausgehen. Hiervon ist etwa ein Zoll abzuziehen, der durch den Rahmen verdeckt wird. Bei dem üblichen Verhältnis der Kantenlängen von 4:3 gilt dann für die lange Seite

$$L\ [\text{mm}] = \frac{4}{5} \cdot 25{,}4 \cdot \left(z\ [\text{Zoll}] - 1\right).$$

(Die 5 gehört dabei zur Diagonalen). Mit der Pixelanzahl p in dieser Richtung folgt dann für die Pixeldichte

$$x\ [\text{Pixel/mm}] \approx \frac{0{,}05 \cdot p}{z\ [\text{Zoll}] - 1}.$$

Diese Formel ist in **Bild 9.6**a ausgewertet. Der optimale Sehbereich liegt um etwa 3 Pixel/mm. Links ist der Pixelabstand noch in den exakt gleich großen Pixelabstand $1/x$ umgerechnet. Sie stellt also das obligate Minimum für den Monitor dar.

Im folgenden wird die einfache zeilenweise Bilderzeugung (ohne Zeilensprung, non interlaced) angenommen. Im Gegensatz zum Fernsehen wird sie heute bei Monitoren fast ausschließlich genutzt. Frei einstellbar ist dann meist die Bildfrequenz f_b. Für geringes Flimmern wird sie heute gewöhnlich ein Wert zwischen 60 und 85 Hz gewählt. Aus der vertikalen Pixelanzahl n_z kann dann die notwendige Zeilenfrequenz f_z bestimmt werden. Dabei ist aber zu beachten, daß auch der Bildrücklauf Zeit benötigt. Er erfolgt etwa 10mal so schnellund kann daher durch eine additive Größe r_b (etwa 10 %) berücksichtigt werden kann (vgl. Bild 9.6c). Folglich gilt

$$f_z = f_b \cdot n_z \cdot \left(1 + r_b\right).$$

Dieser Zusammenhang ist in **Bild 9.7**b durch die ausgezogenen Kurven ausgewertet. Um die einzelnen Pixel auch wirklich ansteuern zu können, muß schließlich der Videoverstärker eine entsprechende Bandbreite, die Pixelfrequenz f_p, erreichen. Hierbei gehen zusätzlich die horizontale Pixelanzahl n_z und der Anteil des Zeilenrücklaufs r_z (wieder etwa 10 %) ein. So folgt dann

$$f_p = f_b \cdot n_z \cdot n_b \cdot (1 + r_b) \cdot (1 + r_z) = f_z \cdot n_b \cdot (1 + r_z).$$

Dieser Zusammenhang ist in Bild 9.7b durch die gestrichelten Kurven ausgewertet. Einen schnelleren Überblick zu einigen typischen und abgerundeten Daten gibt zusätzlich die folgende Tabelle.

Auflösung	Bildröhre I Maske	Bildfrequenz (Zeilen- I Pixelfrequenz)		
		75 Hz	80 Hz	85 Hz
800×600	15"	50 kHz I 50 MHz	50 kHz I 55 MHz	50 kHz I 60 MHz
1240×768	17" I 0,28 mm	60 kHz I 80 MHz	60 kHz I 80 MHz	70 kHz I 90 MHz
1152×864	17" I 0,26 mm	70 kHz I 100 MHz	70 kHz I 100 MHz	80 kHz I 120 MHz
1280×1024	19" besser 21"	80kHz I 140 MHz	80 kHz I 150 MHz	90 kHz I 170 MHz
1600×1200	23" besser 25"	90kHz I 200 MHz	100 kHz I 200 MHz	110 kHz I 220 MHz

Die entsprechenden Bild- und Zeilenfrequenzen werden auf der Grafikkarte erzeugt. Der Monitor muß sich auf sie synchronisieren. Außerdem muß er mit seinen Videoverstärkern die Pixelfrequenz verlustfrei verarbeiten können. Folglich gibt es sowohl durch die Grafikkarte als auch durch den Monitor Begrenzungen. Erst beide zusammen bestimmen, welche Pixelzahl mit welcher Bildfrequenz möglich ist. Die Entwicklung bei den Monitoren begann mit der Fernsehnorm durch die Nutzung üblicher Fernseher. Dann entstanden Festfrequenz-Monitore, die bereits besser auf die speziellen Forderungen der Rechner abgestimmt waren. Sie waren jedoch nicht zueinander kompatibel, z. B. CGA- und Hercules-Monitor. Einen Fortschritt brachten Mehrfrequenz-Monitore, welche sich auf einige wenige Bild- und Zeilenfrequenzen einstellen konnten. Für jedes Format ist dabei eine andere Einstellung aller Ablenkparameter, wie Bildgröße, Bildlage, Linearität, Trapez- und Kissenverzerrung, erforderlich. Bei den Multifrequenz-Monitoren ist die Anzahl der Frequenzen noch erweitert. Heute sind Multiscan-Monitore üblich. Innerhalb eines großen Bild- und Zeilenfrequenzbereichs stellen sich die richtigen Parameter weitgehend automatisch ein. Einige Standardbildformate sind dabei meist fest vorprogrammiert. Weitere Formate können selbst definiert werden. Für jedes Format sind die zugehörigen Ablenkparameter nachstell- und speicherbar. Parallel dazu lief die Entwicklung der Grafikkarten. Anfangs wurde beim PC das Video-RAM mit 16 kByte vom Arbeitsspeicher abgezweigt. Da dieser Wert sehr bald nicht mehr ausreichte, wurde das notwendige Video-RAM auf die Videokarte verlegt und über das 16-kByte-Fenster angesteuert. Heute befinden sich auf den Videokarten mindestens 2 MByte, oft auch bereits 8 MByte. Da diese Datenmengen bei jedem Bildwechsel von der CPU über die Grafikkarte zum Monitor übertragen werden müssen, entstehen hohe Forderungen an die Datenrate. Sie werden noch dadurch verschärft, daß der Monitor einen kontinuierlichen analogen Datenstrom fordert. Dieser Vorgang wird durch Bild 9.7d deutlich.

Die Daten für die Bilder werden von der CPU über den PC-Bus für die Grafikkarte bereitgestellt. Sie übernimmt sie zunächst in den Input-Buffer. Der Video-Controller bereitet sie so auf, daß sie pixelgetreu dem Monitorbild entsprechen. Über den Output-Buffer gelangen sie dann richtig angeordnet in den Video-RAM (im Bild DRAM). Je nach der Farbtiefe existieren mehrere Speicherebenen (planes). Die aufbereiteten Daten müssen vom Video-RAM periodisch und zeitgerecht (timing) dem Digital-Analog-Wandler (RAMDAC, random access memory digital to analog converter) zugeführt werden. Er wandelt sie in die analogen RGB-Signale für den Monitor. Wegen dieses genau einzuhaltenden Zeitablaufs können dem DRAM neue Bilddaten nur während des Bild- und Zeilenrücklaufes übergeben werden. Das begrenzt erheblich den Datendurchsatz auf der Videokarte. Zur Verbesserung wurden mehrere Lösungen entwickelt. Eine teilt den DRAM in zwei Bänke auf. Während die eine Bank Daten an den RAMDAC übergibt, kann auf die andere geschrieben werden. Ein spezielles VRAM (Bild 9.7e) enthält dagegen einen zusätzlichen serial buffer. Er übernimmt vom eigentlichen Speicher einige Daten parallel und übergibt sie nacheinander und im richtigen Timing an den RAMDAC. Bei der Ausgabe entfällt also der Umweg über den Output-Buffer. Daher können dem VRAM fast pausenlos Daten übergeben werden.

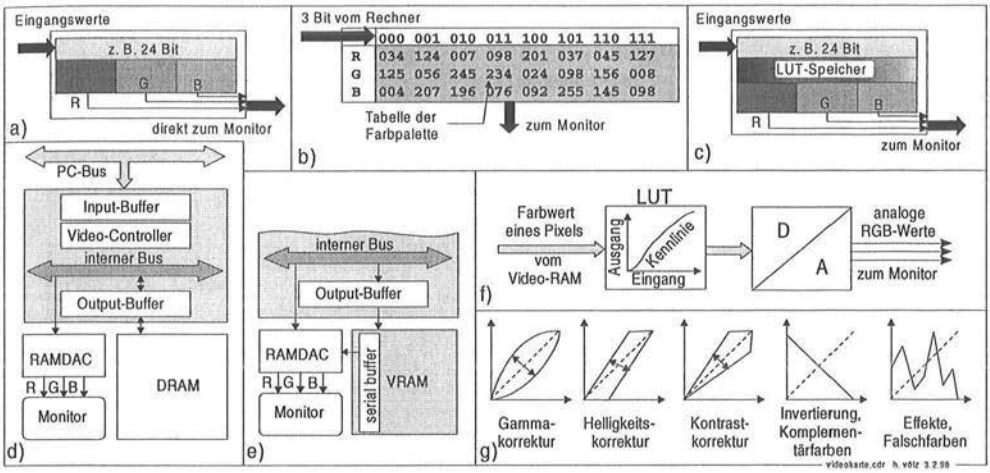


Bild 9.7 Aufbau, Möglichkeiten und Grenzen bei Grafikkarten

Neben dem bisher geschilderten Ablauf hat die Grafikkarte noch weitere Funktionen zu erfüllen. Um z. B. Speicherkapazität im Video-RAM bzw. bei der Bilddatei zu sparen, kann eine *Farbpalette* angewendet werden. Sie enthält nur wenige Farben, z. B. 16 oder 256. Ihnen können frei wählbar beliebige Farbvalenzen zugeordnet werden. Meist sind sie so bestimmt, daß sie den Hauptfarben im Bild entsprechen. Nahe liegende Farben werden hierauf abgeändert. Ihre Parameter (RGB-Werte) sind im Header der Bilddatei enthalten. Sie werden nur einmal zur Grafikkarte übertragen und dort in der CLUT (colour look up table) gespeichert. Danach genügt es für alle Pixel, nur ihre „Kennung" zu übertragen. Für drei Bit Farbtiefe, also 8 verschiedene Farben, zeigt dies schematisch Bild 9.7b. Die grau unterlegte Fläche entspricht der gespeicherten Farbpalette. Zur Grafikkarte gelangen nur die 3-Bit-Werte, zum RAMDAC und damit zum Monitor aber die zugehörigen 24 Bit (3mal 8 Bit). Im Vergleich mit den üblichen 24 Bit (Bild 9.7a) wird also der Bus erheblich entlastet.

Weiter existiert auf den meisten Grafikkarten zwischen dem Video-RAM und dem RAMDAC ein kleiner, schneller Speicher für die drei Farben (R, G, B zu je 8 Bit). Er wird meist als „look up table" (**LUT**) bezeichnet (Bild 9.7f). Mit ihm werden die ankommenden 24-Bit-Werte anderen, frei wählbaren 24-Bit-Werten zugeordnet. Dies kann schematisch nach Bild 9.7c oder als Kennlinie gemäß Bild 9.7f beschrieben werden. Der letzte Fall wird meist in Grafikprogrammen benutzt. Die wichtigsten damit möglichen Operationen zeigt Bild 9.7g.

Moderne Grafikkarten besitzen u. a. weiter einen zusätzlichen 3D-RAM, wo echte dreidimensionale Koordinaten von Objekten gespeichert werden. Ohne große Rechenleistungen der CPU können dann spezialisierte Teile des Video-Controllers echte 3D-Operationen durchführen.

Trotz dieser Entwicklungen erfordert die Übertragung der Bilddaten von der CPU zur Grafikkarte hohe Datenraten. Mit jedem Bildwechsel können nämlich große Datenmengen anfallen. So entstanden spezielle Bus-Systeme. Z. Z. ist (noch) der PCI-Bus (Peripheral Component Interconnect) am gebräuchlichsten. Es gibt aber bereits einen neuen Standard AGP (Accelerated Graphics Port). Dabei ist der Video-Speicher bereits wieder ein Teil des Arbeitsspeichers. Eine besondere Schnittstelle verbindet ihn direkt mit der Grafikkarte.

Durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Grafikkarten und die ständig wachsende Anzahl von Videoanwendungen existiert heute eine Vielzahl an „Grafikmodi". Die Tabelle auf der gegenüberliegenden Seite enthält also nur wenige ausgewählte Varianten. Allein für das *Fernsehen* bestehen beachtlich viele Normen, die nicht nur PAL, NTSC und SECAM betreffen. Auch der begonnene Übergang zum digitalen Fernsehen erfolgt keineswegs einheitlich. Hier ist bereits die Begriffsvielfalt verwirrend. Im Deutschen Sprachraum ist HDTV (high definition television) oder ganz deutsch „hochauflösendes Fernsehen" üblich. Dabei wird das 16:9-Bildformat mit 480 000 Bildpunkten in

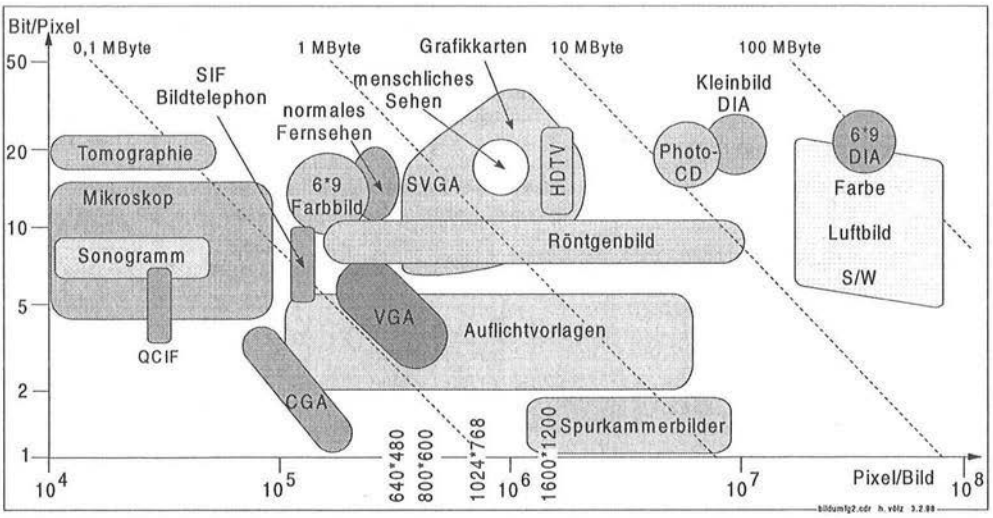


Bild 9.8 Pixelanzahl und Bittiefe bei verschiedenen Verfahren

1250 (1152 sichtbare) Zeilen verwendet. Der übliche Europäische Standard heißt HD-MAC (high definition multiplexed analogue components). Im d2MAC-Verfahren werden dabei durch effektive Kompression einschließlich Ton je Bild nur 1296×625 Bit übertragen. In den USA gibt es das EDTV (extended definition television) und das IDTV (improved definition television). Beide nutzen spezielle Maßnahmen, um beim NTSC eine deutlich bessere Bildqualität zu erreichen. Eigentliches HDTV heißt ATV (advanced television). Hierfür sind vom ATSC (Advanced Television Systems Committee) 18 mögliche Formate vorgeschlagen, die auch vom FCC (Federal Communications Commission) bestätigt wurden. Sie sind in der obenstehenden Tabelle zusammengefaßt. Das japanische HDTV-Programm heißt Hi-Vision.

Pixel	Verhältnis	Bildwechsel
1920×1080	16:9	60i; 30p; 24p
1280×720	16:9	60p; 30p; 24p
704×480	16:9 | 4:3	60p; 30i; 30p; 24p
640×480	4:3	60p; 60i; 30p; 24p

i = interlaced und p = progressiv

Weitere Normen und Bildschirmauflösungen existieren beim *Bildtelefon* (Videotelefon, Fernsehtelefon). Ursprünglich gab es analoge Varianten, die durch Modulationen auf dem üblichen Telefonkanal etwa 28 kBit/s erreichten (Kompression 2 bis 7). Die Audiodaten wurden auf ca. 5 kBit/s reduziert. Damit konnten je Sekunde wenige Schwarzweißbilder mit 128×96 Pixel in 128 Graustufen übertragen werden. 1993 wurde der Testversuch für das digitale, farbige Bildtelefon unter ISDN abgeschlossen. Die Bildwiederholfrequenz beträgt 29,7 Hz ohne Zeilensprung. Je nach Nutzung der beiden Kanäle mit 64 kBit/s sind die vier Modi der untenstehenden Tabelle möglich. Zu ihnen gehören zwei Bildformate. Die hohe Auflösung wird als CIF (common intermediate format) oder als SIF (standard IF) bezeichnet. Sie nutzt 360 (352)×288 Pixel für die Helligkeit und je 180 (176)×144 für die beiden Farbdifferenzsignale *U* und *V*. Sie werden nur mit einem Viertel der Auflösung des Helligkeitssignals *Y* übertragen. Die Klammerwerte beziehen sich auf den sichtbaren Teil des Formats. Die kleine Auflösung mit 180 (176)×144 und 90 (88)×72 heißt QCIF (quarter-CIF). Eine Übersicht zu den wichtigsten Auflösungen und der zugehörenden Farbtiefe zeigt **Bild 9.8.**

Modus	Bildkanal	Tonkanal	Kommentar
1	48 kBit/s; 3,1 kHz	16 kBit/s	tarifsparend
2	64 kBit/s; 3,117 kHz	64 kBit/s	Standardfall
3a	112 kBit/s; 3,1 kHz	16 kBit/s	höchste Bildqualität
3b	96 kBit/s; 7 kHz	32 kBit/s	gute Bildqualität, Breitbandton

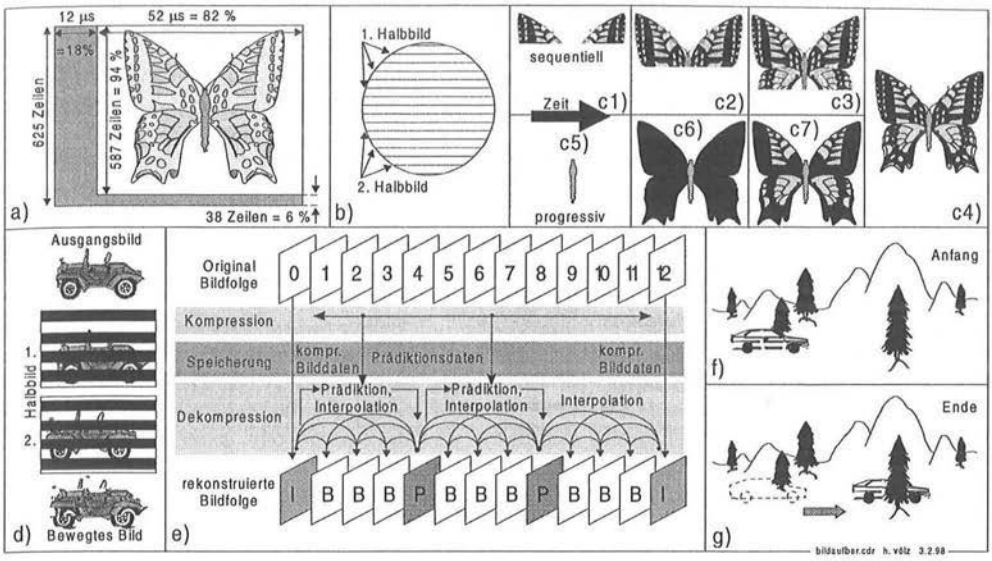


Bild 9.9 Methoden zur Erzeugung von Bildern auf dem Bildschirm

Auch beim Aufbau des Bildes gibt es mehrere Möglichkeiten. Bisher wurde das einfache zeilenweise (*noninterlaced*) Scannen (Abtasten) stillschweigend vorausgesetzt. Daneben gibt es das Zwischenzeilenverfahren (= Zeilensprung) des Fernsehens. Heute heißt dieses Prinzip allgemein interlaced (verflochten). Zunächst werden alle geradzahligen Zeilen als 1. Halbbild übertragen. Dann folgen die ungeradzahligen als zweites Halbbild (**Bild 9.9**b). Die Auflösung ist genauso hoch wie ohne Zeilenwechsel. Aber bezüglich des Flimmerns genügt für ein Vollbild (engl.: frame) die Hälfte der Bildwechsel. Folglich sinkt die Bitrate (Übertragungsbandbreite) auf die Hälfte. Es entsteht allerdings ein zuweilen störendes Zwischenzeilenflimmern. Bei schneller Bewegung kann noch zusätzlich Unschärfe entstehen (Bild 9.9d). Deshalb wird immer mehr zum noninterlaced Betrieb übergegangen.

Zwei weitere Varianten im Bildaufbau ergeben sich aus der Dateistruktur für Bilder. Reine Pixeldateien sind bevorzugt zeilenweise strukturiert. Der Bildaufbau erfolgt dann beim Einlesen *sequentiell* (Bild 9.9c gemäß 1 bis 4). Auch ein Aufbau von unten nach oben tritt auf. Vor allem bei Vektordateien erfolgt ein *progressiver* Bildaufbau. Die einzelnen Strukturen werden hier gemäß der Reihenfolge c5, c6, c7, c4 in Bild 9.9c nacheinander erzeugt. Diese Methode entspricht dem einmal bei CAD verwendetem Vektordisplay.

Weitere Begriffe sind *Over- und Underscan*. Das Overscan wird beim Fernsehen angewendet. Der Elektronenstrahl schreibt dabei über die vier Bildschirmränder hinaus. So ist es technisch leichter, auf der sichtbaren Fläche eine gut lineare, unverzerrte Darstellung zu erreichen. In der Computertechnik ist das Underscan üblich. Dabei sind die Ablenkungsränder auf dem Bildschirm sichtbar.

Vor allem beim Radar erfolgt keine zeilenweise Ablenkung. Statt dessen wird kreisförmig, also in Polarkoordinaten, gearbeitet. Ausgehend von der Bildmitte läuft der Elektronenstrahl zum Rand und kehrt verdunkelt zurück. Dieser Vorgang entspricht der Zeilenfrequenz. Überlagert ist er mit einer Drehung, die mit der Umlauffrequenz der Radarantenne synchronisiert ist.

Schließlich sei noch kurz die *MPEG-Kompression* beschrieben. Die MPEG (Motion Picture Experts Group) ist eine von der ISO (International Organisation for Standardization) berufene Gruppe von Experten, Industrie- und Interessenvertretern. Die von ihr ausgearbeiteten Normen (MPEG-1, -2 und -4) dienen der Komprimierung von digitalisierten Fernsehbildern und Ton. MPEG-1 verwendet Bilder mit 352×288 Pixel ($^1/_4$-PAL 768×576; = SIF source interface format). Sie werden mit 25 Bil-

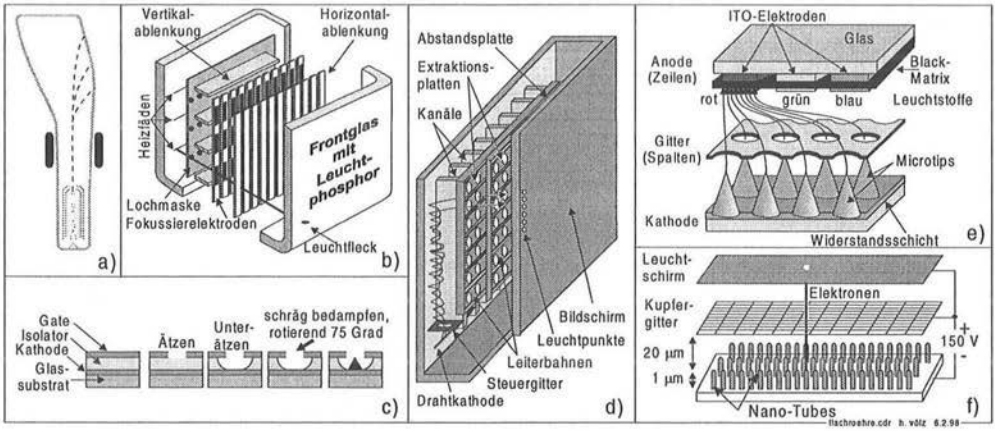


Bild 9.10 Beispiele für flache Bildröhren

dern/s und einer Datenrate von ca. 1,2 MBit/s ≈ 150 kByte/s übertragen. Dabei wird etwa VHS-Qualität erreicht. MPEG-2 ist dagegen mit 2 bis 10 MBit/s für professionelle digitale Fernsehübertragungen bis zu 1024 Zeilen vorgesehen. Es genügt damit für HDTV. Dafür war ursprünglich MPEG-3 vorgesehen. Es gehört jetzt mit zu MPEG-2. MPEG-4 betrifft Bildtelefone für ISDN. Bei der typischen MPEG-Codierung (Bild 9.9e) wird etwa jedes zwölfte Bild als Intraframe **I** nach JPEG (Joint Photographic Experts Group) komprimiert. Weiter werden Daten für die Bildveränderungen als Bewegungsvektoren bestimmt. Sie betreffen gemäß Bild 9.9f und g sowohl die bewegten Objekte als auch verdeckte und frei werdende Bildbereiche (8×8-Bit-Flächen mit 16×16-Bit-Umgebung). Sie werden als Prädiktionsdaten festgehalten. Nur sie und die **I**-Bilder werden gespeichert | übertragen. Selbst bei Kameraschwenks sind bei diesem Prinzip nur wenige Daten erforderlich. Daher ist eine mittlere Datenreduktion bis auf $^1/_{200}$ üblich. Bei der Wiedergabe werden zunächst die Prädiktionsbilder **P** bestimmt. Anschließend berechnet man mittels bidirektionaler Interpolation die **B**-Bilder. Selbst leistungsstarke Rechner erfordern hierfür – um schnell genug zu sein – Spezialschaltkreise, die meist auf MPEG-Erweiterungskarten untergebracht sind.

9.2.6 Flache Bildröhren

Die Bildröhre hat einige wenig vorteilhafte Eigenschaften. Dazu zählen vor allem die erhebliche Masse, die große Bautiefe und der hohe Energieverbrauch. Ein Display sollte u. a. ähnlich wie ein Bild flach an der Wand hängen. Daher wird seit Jahrzehnten versucht, flache Bauformen zu entwickeln. Die größten Fortschritte in diese Richtung wurden allerdings mit völlig anderen Techniken erreicht (siehe nächster Abschnitt). Die Technologie der Bildröhre erlaubt aber durch jahrzehntelange Erfahrung eine hohe Bildqualität und kostengünstige Produktion. Dies sind wahrscheinlich die wichtigsten Gründe, weshalb die heute zweitwichtigste Technik (LCD) bisher überhaupt nicht in den Heimfernsehbereich eindringen konnte. Sie konnte sich nur dort durchsetzen, wo nie zuvor die Röhre war, also z. B. bei den Laptops. Die drittwichtigste Technik (Plasmapanal) weist z. Z. zwar hohe Zuwachsraten auf, ist aber noch deutlich zu teuer. Daher entstanden im Laufe der Jahre mehrere flache Bildröhren. Zwei Beispiele zeigt **Bild 9.10**a und b. Im erstem Fall werden die Elektronen von unten kommend „um die Ecke" zum Bildschirm geführt. Diese Methode war, bevor es die LCD gab, zeitweilig bei Taschenfernsehern in Gebrauch. Im zweiten Fall werden mittels mehrerer Heizfäden und einer Lochmaske gleichzeitig viele Elektronenstrahlen erzeugt. Je eine horizontale Gruppe durchläuft eine Vertikalablenkung. Senkrecht übereinander liegende Strahlen werden danach gemeinsam horizontal abgelenkt. Dieses Prinzip macht deutlich, daß eine flächige Elektronenquelle für einen flachen Bildschirm sehr vorteilhaft ist. Genau hier setzt denn auch die Entwicklung des 1997 vorgestellten Zeusdisplays

von Philips an (Bild 9.10d). Die Flächenkathode wird durch „Elektronenhopping" erzeugt. Alle Elektronen gehen jedoch nur von einem einzigen, unten befindlichen, BaSr-beschichteten Heizfaden mit nur 1000 K aus. Der dann folgende Effekt arbeitet mit Sekundärelektronen (s. S. 199ff). Die Ausbeute wird aber möglichst genau auf 1:1 eingestellt. Hierzu ist das rückwärtige Glas speziell beschichtet. Weiter wird die Bildung der Sekundärelektronen ähnlich wie beim SEV (S. 105f) mehrfach wiederholt. Hierzu dient ein schwaches, nach oben gerichtetes Beschleunigungsfeld. Insgesamt erscheint es daher so, als ob jedes Elektron schrittweise nach oben hüpft (Eletronenhopping). Die senkrecht stehenden Stützen (Kanalplatten) erzeugen spaltenweise Gebiete für die Elektronen. Für jeden Kanal kann die Anzahl der Elektronen durch ein Kontrollgitter eingestellt werden (Helligkeit). Über das Potential der Leiterbahnen auf den Platten (Zeilen) können nun die Kanalelektronen durch die Löcher nach vorne gesaugt werden. Durch entsprechende Potentiale an den Extraktionsplatten können also die Elektronen zeilen- und spaltenweise zum Bildschirm geführt werden. Mit diesem einfachen Prinzip ist aber noch keine ausreichende Strukturfeinheit erreichbar. Deshalb werden mehrere Extraktionsplatten mit unterschiedlichem Raster voreinander angeordnet. Sie verteilen noch einmal die Elektronen. Die optimalen technologischen Werte liegen bei drei Extraktionsplatten. Diese Konstruktion hat zusätzlich einen erheblichen Vorteil für den flachen Bildschirm. Die Kanal-, Extraktions- und eine zusätzliche Abstandsplatte zum Bildschirm fangen vollständig den hohen Luftdruck auf. So besitzt diese Röhre einen vollkommen planen Bildschirm. Die Dicke der Röhre beträgt etwa 5 cm. Die vorteilhafteste Diagonale liegt bei 71 cm. Für den Betrieb sind folgende Spannungen notwendig: 5V als Steuerspannung am Gitter, 200 V für die Leiterplatten und nur 4,5 kV zur Beschleunigung. Um eine gleichmäßige Helligkeit auf dem ganzen Bildschirm zu erreichen, ist noch ein Ausgleich über eine zusätzliche Leiterbahn erforderlich. Die Röhre erreicht die große Helligkeit von 1000 cd/m^2; bei 6 kV sind sogar 5000 cd/m^2 möglich. Übliche Bildröhren geben dagegen nur etwa 100 cd/m^2 ab. Höhere Werte führen bei ihnen zu Unschärfen durch zurückgestreute Elektronen. Bei der neuen Röhre ist weiter vorteilhaft, daß es keine Konvergenzfehler gibt und daß sie eine sehr lange Lebensdauer von über 10000 Betriebsstunden besitzt. Ob sie sich allerdings durchsetzen kann, bleibt abzuwarten [LEM2]. Denn ein konkurriendes Prinzip – nämlich mit Feldemission (s. S. 120) – befindet sich bereits im ersten Einsatz. Es wird als nächstes beschrieben.

Beim Feldemissionsdisplay (*FED*) wird die Flächenkathode durch eine gewaltige Anzahl von feinsten Spitzen erzeugt. Den prinzipiellen Aufbau eines Farbtripels zeigt Bild 9.10e. Die Spitzen (Microtips) bestehen aus Molybdän oder Silizium und haben einen Spitzenradius unter 1 µm. Daher ermöglichen bereits relativ geringe Spannungen (etwa 50 V Gatespannung) eine Feldemission. Die von ihnen ausgehenden Elektronen werden über die Löcher des Gitters von der Anode mit dem roten Leuchtphosphor angesaugt. Ebenso können sie auch zum grünen oder blauen Phosphor bewegt werden. Genau hierzu dienen die Zeilenleitungen. Die Spalten sind dagegen bei den Kathoden zusammengeschaltet. Unterhalb der Kathoden befindet sich eine Widerstandsschicht, die den Strom auf einen maximalen Wert begrenzt. Zu jedem Pixel gehören (entgegen der Darstellung im Bild) etwa 2000 Microtips. Die Herstellung eines derartigen Displays erfordert folglich eine hochleistungsfähige Technologie. Ihre Hauptschritte können mittels Bild 9.10c erklärt werden. Auf einem Glassubstrat wird zunächst die Widerstandsschicht abgeschieden. Darüber folgt ein Isolator (Dielektrikum etwa 1 µm dick) und dann die Metallschicht des Gitters (Gate). Mit einem lithographischen Prozeß werden zunächst die Löcher in das Gate geätzt. Durch Unterätzen entsteht ein tiefes Loch im Isolator. Mittels eines Aufdampfprozesses unter 75 Grad und bei rotierendem Substrat entstehen unter jedem Loch die Microtips. Zum fertigen Display ist dann nur noch die getrennt gefertigte Anode mit Abstandshaltern in 200 µm anzubringen. Zum Schluß wird das gesamte Display evakuiert. Es ist nur 2 mm dick. Das z. Z. größte Problem besteht darin, daß bei diesem Aufbau die Beschleunigungsspannung an der Anode nur einige hundert Volt betragen darf. Dafür gibt es aber noch keine Phosphore, die eine gute Helligkeit in allen Farben liefern. So liegt die Helligkeit meist unter 100 cd/m^2 bei einer Ausbeute von etwa 15 lm/W und einem Kontrast von 1:60. Je Microtip fließt dabei ein Strom von rund 1 µA. Höhere Beschleunigungsspannungen lassen sich nur mit aufwendigeren Konstruktionen und zusätzlichen Maßnahmen zur Vermeidung von Überschlägen und Kathodenzerstäubung erreichen. Für die Kathode der FED sind inzwischen neben den Microtips weitere Varianten erfolgreich erprobt. Einmal können planare, diamantartige Kohlenstoffschichten genutzt werden. Eine weitere

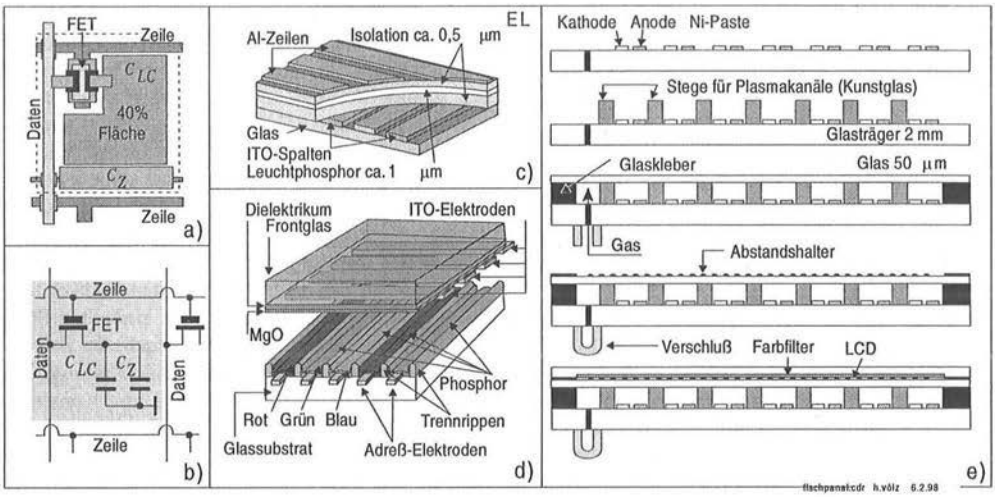


Bild 9.11 Beispiele für Flachdisplays

Technologie erzeugt die Nanotubes (Bild 9.10f). Sie entstehen in einer Heliumatmosphäre unter definierten Bedingungen. Diese Kohlenstoffstrukturen sind mit den kugelförmigen Fullerenen verwandt. Sie sind etwa 1 µm lang, enden in einer sehr feinen Spitze und besitzen an der Basis einen Durchmesser von ca. 15 nm.

9.2.7 Andere Flachdisplays

Gegenüber einer Bildröhre, z. T. auch gegenüber den zuvor behandelten flachen Bildröhren, besitzen alle Flachdisplays mehr oder weniger die folgenden Vorteile:

- Sie benötigen weniger Betriebsleistung (außer Plasmadisplays) und sind damit besonders für Batteriebetrieb geeignet.
- Sie sind vollkommen plan.
- Sie erzeugen keine Felder, die für Menschen schädlich sein könnten.
- Sie erzeugen keine komprimierenden Strahlungen, sind also auch nicht abhörbar.
- Es gibt keine nachteilige Beeinflussung durch äußere (Magnet-) Felder.
- Sie besitzen keine Geometrie-, kaum Farbfehler und hohe Randschärfe.
- Sie sind sehr unempfindlich gegenüber mechanischen Erschütterungen.

Die Vielzahl der möglichen und versuchten Flachdisplays kann in die folgenden drei Gruppen eingeteilt werden:

- **Beleuchtete** Panals|Displays beruhen meist auf LCD-Techniken und sind bereits ab Seite 131 in den verschiedenen Varianten recht ausführlich behandelt.
- Zu den **selbstleuchtenden** Panals gehören formal auch die im vorigen Abschnitt behandelten flachen Bildröhren. Den Schwerpunkt bilden jedoch die Plasmapanals.
- Die verschiedenen **Projektionstechniken** werden im Abschnitt 9.2.8 ab S. 219 behandelt.
- Weiter seien hier noch – wenn auch eigentlich nicht in diese Gliederung passend – die direkt auf die Augen einwirkenden Techniken erwähnt, wie sie z. B. beim *Datenhelm* Anwendung finden, genannt (s. S. 223).
- Einer Erwähnung bedürfen dann auch noch *Stereobildtechniken* (s. S. 226).

Zum Vergleich mit den anderen Techniken zeigen **Bild 9.11**a und b den strukturellen und den schaltungstechnischen Aufbau einer aktiven LCD-Zelle. Daraus ergibt sich, daß oft nur 40% der Fläche für die Lichtausbeute nutzbar sind. Beim plasma-adressierten PALC werden jedoch bessere Werte erreicht. Ihre typische Technologie zeigt Bild 9.11e von oben nach unten. Auf einer etwa 2 mm starken Glasplatte werden zunächst die Kathoden- und Anodenstreifen gedruckt. Mit Kunstglas folgen dann die Stege zur Trennung der Plasmakanäle. Sie werden mit einem 50 µm dicken Glas abgeschlossen. Jetzt kann das Gas eingefüllt und anschließend der Pumpstutzen verschlossen werden. Nachdem die Abstandhalter aufgebracht wurden, wird übliches Flüssigkristall aufgebracht. Es folgen die Farbfilter und die Deckplatte.

Bei den selbstleuchtenden Displays ist noch eine Unterteilung nach Formaten sinnvoll. Bei *kleinen Formaten* haben die Vakuumfluoreszenzdisplays (VFD; Beispiel gemäß Bild 7.14i und j auf S. 124) und die Elektrolumineszenz-Displays (EL) eine gewisse Bedeutung erreicht. Da beim EL auf S. 130ff nur das Prinzip behandelt wurde, ist hier mit Bild 9.11c die Anordnung der Elektroden für eine Matrixansteuerung ausgewiesen. Die dritte Variante für kleine Flächen sind Leuchtdiodenarrays. Sie sind als LED ab S. 140 ff behandelt. Auf die spezielle Variante eines Miniaturdisplays wird noch auf S. 224f eingegangen. Für *große Formate* hat sich dagegen bisher nur das Plasma-Display-Panel (PDP) behaupten können. Trotz seines hohen Preises verzeichnet es zur Zeit einen großen Zuwachs. Die grundsätzlichen Lösungen hierfür wurden bereits ab Seite 120ff und einige Details zu den verschiedenen Zelltypen sind auf S. 123 behandelt. Ferner sei auf die Leuchtphosphore auf S. 128f verwiesen. Hier sollen an Hand der Bilder 9.11d und e nun weitere Details beschrieben werden.

Generell wird heute ein Gasgemisch aus Neon, Argon, Helium und/oder Xenon verwendet, das bevorzugt ultraviolettes (UV) Licht erzeugt. Dieses Licht regt dann die einzelnen Leuchtphosphore an. Den typischen Aufbau eines Wechselstromdisplays zeigt Bild 9.11d. Mittels der MgO- und Dielektrikum-Schichten wird das Plasma vom Leuchtstoff ferngehalten. Der dabei entstehende Kondensator speichert zusätzlich Ladungen. So genügen Ansteuerspannungen von knapp 200 V. Das Adressieren erfolgt zeilenweise. Es wird eine Spitzenhelligkeit von reichlich 200 cd/m^2 erreicht. Der Plattenabstand liegt bei 0,2 mm. Die Platten sind um 3 mm stark. Da ein Plasma nur an oder aus sein kann, erfolgt die Steuerung der Helligkeit über Pulslängenmodulation. Die Tiefe eines derartigen Displays beträgt nur rund 10 cm. Der zulässige Betrachtungswinkel um 160° ist ähnlich groß wie bei der Bildröhre (140°) und doppelt so groß wie beim LCD (vertikale 40 - 50° und horizontal 90°). Nachteilig ist der relativ große Energieverbrauch. Ein typischer 13-Zoll-Schirm benötigt ca. 70 Watt, also ähnlich viel wie eine Bildröhre. Großformatige PDP erreichen heute Diagonalen von deutlich über einem Meter. Die Technologie der Plasmapanals ist zwar noch aufwendig, aber dennoch lösen sie bereits jetzt auf einigen Gebieten andere Anzeigesysteme ab. Die Tendenz ihrer Anwendung ist stark steigend. Daher dürften auch bald preiswertere Varianten auf dem Markt erscheinen. Da für jede Zelle aber relativ viel Platz benötigt wird, ist ihre lokale Auflösung deutlich kleiner als z. B. bei Bildröhren. Werte wie Pitchabstände von 0,28 mm sind kaum zu erwarten. Daher kommen sie nur für relativ große Displays in Betracht. Z. T. dringen sie dadurch aber auch bereits in den Bereich der Großprojektionen vor.

9.2.8 Großprojektionen

Für einige Anwendungen ist es erforderlich, Anzeigen einem größeren Kreis unmittelbar zugänglich zu machen. Dafür ist inzwischen eine größere Anzahl von technischen Varianten entstanden. Sie betreffen vor allem

- Röhrentechniken, z. B. als Fernseh-Projektoren oder als Beamer sowie als Eidophor-Projektoren,
- LCD-Varianten, z. B. als spezielle Projektoren, Zusatz für Overheadprojektoren und ihre Nutzung als Lichtverstärker (ILA = image light amplifier),
- Laserprojektoren,
- mikromechanische Klappspiegel (DMD = digital micromirror device) und
- Zusammenbau von mehreren Plasmapanels zu einer großen Einheit.

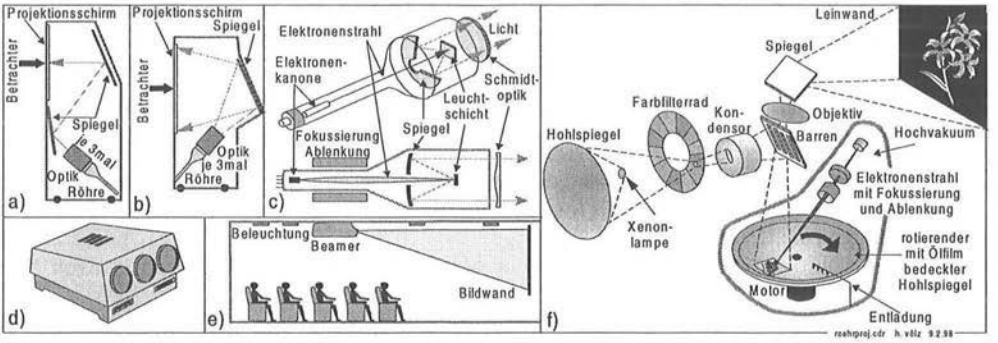


Bild 9.12 Projektionssysteme mit Elektronenstrahltechnik

Will man eine große Bildfläche erreichen, so ist die Projektion des Bildes auf einen Schirm besonders vorteilhaft. Dieses Prinzip hat (bisher) nur bei den Plasmapanels keine Bedeutung erlangt. Wahrscheinlich liegt es daran, daß hier keine hinreichend kleinen Bildpunkte zu erzeugen sind. Daher ist es bei ihnen vorteilhafter, mehrere Displays neben- und übereinander anzuordnen. Sie werden daher im folgenden nicht weiter behandelt. Bei einer Projektion ist es immer schwierig, eine hinreichende Helligkeit zu erreichen. Dabei ist es unwesentlich, ob die Aufprojektion auf eine Bildwand (Leinwand) oder die Durchprojektion auf eine Mattscheibe erfolgt. Um für verschiedene Verfahren vergleichbare Helligkeitswerte zu erhalten, hat das Amerikanische Norminstitut ANSI das *ANSI-Lumen* geschaffen. Die Bilddiagonale wird dabei auf 102 cm eingestellt. Wenn das Gerät eine Zoom-Optik besitzt, kann der kürzeste Abstand gewählt werden. Für die Einstellung von Helligkeit und Kontrast ist ein spezielles ANSI-Testbild zu verwenden. Die Helligkeit wird dann getrennt in neun festgelegten Sektoren gemessen, und der Durchschnittswert ist das ANSI-Lumen. Bei LCD-Projektoren werden etwa Werte von 200 bis 400 ANSI-Lumen erreicht. Damit sind ausreichende Helligkeiten auch in leicht beleuchteten Räumen möglich. Es muß aber eine hochwertige Bildwand und keine zu große Bilddiagonale gewählt werden. Röhrenprojektoren liegen meist etwas darunter. Die allerhellsten Projektoren z. B. in Lichtventil-Technik erreichen etwas mehr als 1000 ANSI-Lumen.

Zur Großbildprojektion des Fernsehens wurden bereits in den 70er Jahren spezielle, monochrome Projektionsröhren entwickelt (**Bild 9.12**c). Der Elektronenstrahl schreibt bei ihnen auf ein kleines, internes Target. Es ist mit einem Leuchtphoshor beschichtet, der eine besonders hohe Leuchtdichte ermöglicht. Das Bild wird dann mittels der aus der Astronomie stammenden Schmidtoptik (1931, Spiegel und Korrekturlinse) zur Bildwand projiziert. Der Spiegel befindet sich in der Röhre. Die nicht sphärische Korrekturlinse vor der Röhre gleicht die Abbildungsfehler des internen Spiegels aus. Für farbige Bilder sind drei solche Röhren – rot, grün und blau – erforderlich. Erheblichen Aufwand bereitet der gegenseitige Abgleich der drei Systeme. Bei der Gerätetechnik werden zwei Arten von Durchlichtprojektion unterschieden. Von einer *Aufprojektion* (fälschlich bzgl. der obigen Einteilung) wird dann gesprochen, wenn die Röhre und der Betrachter sich auf der gleichen Seite der Bildwand befinden (Bild 9.12b). Bei der *Rückprojektion* befinden sie sich auf entgegengesetzten Seiten (Bild 9.12a). Um die Helligkeit und den Kontrast zu steigern, wird die Bildwand oft strukturiert oder als Fresnellinse ausgebildet. Dadurch wird dann allerdings der Winkel, unter dem das Bild betrachtet werden kann, verringert.

Eine etwas abweichende Variante der Röhrenprojektion sind die Videoprojektoren bzw. *Beamer*. Sie enthalten ähnliche, aber meist sogar flüssigkeitsgekühlte Kathodenstrahlröhren mit einer Diagonale von 7 Zoll. Die drei farbigen Einheiten werden in einem kompakten Gerät (Bild 9.12d) zusammengefaßt und an der Decke eines (Vortrags-) Raumes aufgehängt (Bild 9.12e). Diese Geräte können auch von Rechnern angesteuert werden. In einem verdunkelten Raum können so Flächen bis zu mehreren m^2 ausgeleuchtet werden.

Ein erheblich abgewandeltes Prinzip, das *Eidophor*-Verfahren, geht auf den Züricher Fischer zurück, der es bereits 1935 vorschlug. Die typische Masse von derartigen Projektoren liegt bei 800 kg. Die Auflösung reicht bis etwa 1200×1280 Pixel. Mittels der Schlierenoptik ermöglicht es eine kinoartige Größtprojektion auf Flächen von über hundert m^2. Dabei sind Lichtströme von 5000 lm und Kontraste von 1:100 erreichbar. Das Prinzip zeigt Bild 9.12f. Der eigentliche, bilderzeugende Teil befindet sich im Vakuum und enthält ein sonst „übliches" Elektronenstrahlsystem. Die Elektronen schreiben auf den langsam rotierenden Hohlspiegel. Er ist mit einer dünnen Ölhaut versehen. Ohne Elektronenstrahl besitzt sie eine glatte, gut reflektierende Oberfläche. Dort, wo der Elektronenenstrahl auf den Ölfilm trifft, verbleiben die Elektronen als Ladung. Benachbarte Ladungen stoßen sich ab und verformen so die Oberfläche des Films. Das vom Elektronenstrahl erzeugte Ladungsbild ruft also eine entsprechende Oberflächenverformung des Ölfilms hervor.

Das Projektionslicht stammt von einer sehr starken Lichtquelle, oft eine Xenon-Lampe. Es wird mittels eines einfachen Hohlspiegels und Kondensers so gebündelt, daß es auf den Barren gelangt. Seine Stege reflektieren es auf den rotierenden Hohlspiegel. Das durch die Öffnungen gehende Licht wird nicht genutzt. Die Brennweite des rotierenden Hohlspiegels und die Justage des Barrens sind so gewählt, daß das Licht von den Stegen des Barrens wieder genau auf sie zurückfällt. Bei glattem Ölfilm kommt daher kein Licht über das obere Objektiv und den Planspiegel zur Leinwand. Jede Verformung der Öloberfläche verändert aber die Justage. Von den entsprechenden Bildpunkten auf dem Ölfilm gelangt dann Licht durch die Schlitze des Barrens zur Leinwand. Durch die Rotation des Spiegels stehen für jedes Bild neue Ölflächen zur Verfügung. Vorher werden die Ladungen durch Elektroden entfernt und der Ölfilm damit wieder geglättet.

Für die Bildprojektion haben in den letzten Jahren verschiedene LCD-Techniken große Bedeutung erlangt. Die einfachste Variante liegt dann vor, wenn ein speziell dazu aufbereitetes Durchlicht-LCD-Display auf einem Overhead-Projektor benutzt wird (**Bild 9.13**f, nächste Seite). 1997 ist sogar ein Laptop erschienen, dessen Display abgenommen werden kann und dann eine solche Benutzung erlaubt. Größere Anwendungsbreite erlangten jedoch spezielle LCD-Projektoren, deren prinzipiellen Aufbau Bild 9.13e zeigt. Das Licht einer Lichtquelle wird mittels dichroitisch durchlässiger Spiegel in die Farbkomponenten Rot, Grün und Blau zerlegt. Es gelangt auf drei LCD-Systeme. Die von ihnen durchgelassenen Bilder (Farbauszüge) werden anschließend durch ein dichroitisches Prisma wieder zusammengefaßt und über die Optik projiziert.

Eine völlig andersartige Nutzung von Flüssigkristallen ist die ILA-Technik (image light amplifier) bzw. Lichtventiltechnik (vgl. S. 137 und Bild 7.19 S. 136). Die Ansteuerung bei den üblichen LCD erfolgt über Spannungen durch Elektroden, die entsprechend viel Platz verbrauchen (Bild 9.13b). Hier erfolgt sie direkt durch ein Bild (Bild 9.13a). Mit ihm wird von links eine über dem LCD befindliche Halbleiterschicht beleuchtet. Sie ändert dadurch ihre Leitfähigkeit (Ladung). Über mehrere Schichten, darunter auch Spiegel, wird der Zustand der LCD-Schicht elektrostatisch beeinflußt. Sie kann von rechts mit sehr hellem Licht bestrahlt werden. Beim Hin- und Rückweg im Flüssigkristall wird es entsprechend der Helligkeit des primären Bildes in seiner Polarisationsebene gedreht. Über den Polarisations-Strahlteiler entstehen daraus Helligkeitsänderungen. Sie werden bei der Projektion sichtbar (Bild 9.13d). Für eine farbige Übertragung sind drei parallel angeordnete Lichtventile erforderlich. Mit entsprechenden Geräten werden 2000 lm und bis zu 1600×1200 Pixel erreicht. Die typische Masse liegt bei 150 kg.

Eine erheblich abgeänderte Variante der ILA-Technik wurde auf der Photokina 1996 als DRI (direct reflecting imaging) gezeigt. 1997 wurde dann die daraus entstandene D-ILA-Technik (Direct (driven) Image Light Amplifier) vorgestellt (Bild 9.13 c). Es wird wieder eine „übliche" Ansteuerung der LCD verwendet. Infolge mikroelektronischer Techniken auf Siliziumbasis nehmen die aktiven Transistoren und die Leitungen jedoch nur 7 % der Fläche ein. Sie werden außerdem auf der dem Licht abgewandten Seite der wieder spiegelnden LCD zusammengefaßt. So kann bis zu 93 % des Lichtes genutzt werden. Es erfolgt kaum eine Aufwärmung des etwa 2,3 cm großen Chips mit 1365×1924 Pixel. Daher entfällt die bei üblichen LCD-Projektoren (50 % Lichtabsorption im Chip) notwendige Kühlung und die so bedingte Lärmbelästigung. Mit einer 400 W Xenon-Lampe werden 1000 ANSI-Lumen und ein Kontrast von 1000:1 erreicht.

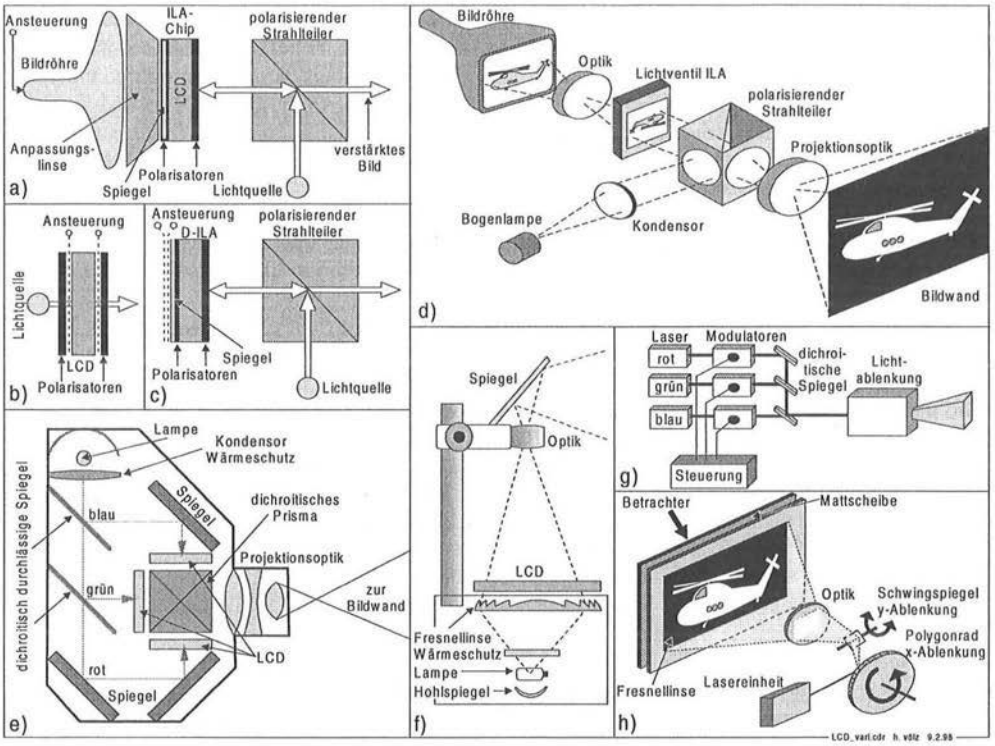


Bild 9.13 Anwendung von LCD zur Bildprojektion

Seit einigen Jahren wird vom **Laser-TV** oder laser beam recorder (LBR) gesprochen. Erste Muster wurden 1996 vorgestellt. Eine Produktion gibt es jedoch noch nicht. Das Hauptproblem ist der blaue Laser (s. S. 142f). Da diese Technik aber sehr wahrscheinlich Einzug halten wird, sei sie kurz mittels Bild 9.13g und h beschrieben. Die drei Laser für rot, grün und blau werden zunächst über Lichtmodulatoren in der Helligkeit gesteuert. Über dichroitische Spiegel werden ihre Strahlen zusammengefaßt und zeilen-spaltenweise abgelenkt zur Bildwand projiziert. Die bekannt gewordene Ablenkung arbeitet mit einem Spiegelrad und einem Klappspiegel. Damit lassen sich sehr hohe Auflösungen erreichen.

Die Grundlagen für ein völlig anderes Prinzip wurden von Texas Instruments entwickelt und führten zu einem mikromechanischen Halbleiterchip, der DMD (digital micromirror device) heißt. Er trägt etwa eine Million beweglicher Spiegel von je etwa 4×4 μm^2. Die daraus entwickelten Geräte heißen DLP (digital light processing). Sie sind z. Z. eine der bedeutendsten Anwendung der MEMS (micro electro mechanical systems). Einen stark vereinfachten Aufbau des Spiegels zeigt **Bild 9.14**a. Auf dem Halbleitersubstrat sind zwei Ansteuerelektroden. Darüber befindet sich der Spiegel. Er wird mittels Stützpfosten von einem dünnen Torsionsband gehalten. Je nach der Spannung an den Elektroden kippt er nach vorne oder hinten. Auf den Landeflächen wird er in einer genauen Position gehalten. Etwas genauer zeigt den Spiegelaufbau Bild 9.14b. Aus dem Halbleitermaterial ist der Spiegelbereich herausgeätzt. Es besteht dann nur aus dem kleinen Joch mit den Torsionsscharnieren. Erst in weiteren Prozeßschritten wird auf das Joch der Spiegelträger mit dem Spiegel aufgesetzt. Den optischen Vorgang für einen Spiegel zeigt Bild 9.14c. Um die mittlere, ungestörte Ruhelage kippt er um jeweils 10° nach rechts oder links. Dies erfolgt in weniger als einer ms. In der rechten Lage ist der Spiegel eingeschaltet und reflektiert das Licht durch die Projektionsoptik zur Bildwand. In der ande-

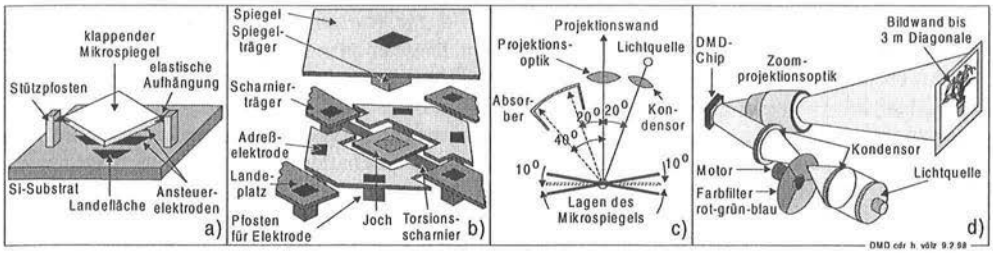


Bild 9.14 DMD-Chip und damit aufgebauter Bildprojektor

ren Lage gelangt das Bild zu einem Absorber. Die Helligkeit eines jedes Spiegels (Pixels) wird durch die Zeiten eingestellt, in welchen sich der Spiegel in Ein- bzw. Ausstellung befindet. Der Abstand zwischen den einzelnen Spiegeln beträgt nur 1 µm. Dadurch werden immer 90 % des Lichtes reflektiert. Der Chip erwärmt sich also nur wenig.

Der Chip mit allen Spiegeln wird gemäß Bild 9.14d beleuchtet. Ein synchron zur Bildfrequenz rotierendes Farbfilter wählt die einzelnen Lichtfarben aus. Ein Gerät für Rückprojektion ist nur 67 cm tief und hat eine Masse von 58 kg. Eine 100 W Halogenlampe erreicht auf einer Projektionsfläche von 1×0,75 m^2 350 ANSI-Lumen. Inzwischen gibt es drei verschiedene Systeme. Neben der beschriebenen 1-Chipvariante gibt es ein 2-Chipsystem mit fixem Rot und Wechsel zwischen Blau und Grün. Im 3-Chipsystem existiert ein Chip für jede Farbe. Vorhanden sind z. Z. Chips mit 848×600 Spiegeln. Die Entwicklung strebt 2048×1152 Spiegel an.

9.2.9 Individuelle Displays

Die Großbildtechnik ermöglicht vielen Betrachtern, gleichzeitig die Bilder zu sehen. Das Gegenteil sind Varianten, die nur für einen Betrachter geeignet sind. Sie sind hier unter der Bezeichnung individuelle Displays zusammengefaßt. Die Gründe für solche Techniken können recht verschieden sein. Einige dieser Geräte sind klein und damit gut transportierbar. Andere ermöglichen zusätzliche Leistungen. Besonders typisch ist hierfür der Datenhelm. Bisher lassen sich die folgenden fünf Klassen erkennen:

- *Minidisplays* sind durch ihre Kleinheit, geringe Masse und eine meist recht spezielle Benutzung gekennzeichnet.
- *Datenhelme* werden auf dem Kopf getragen. Sie sind vor allem für die Erzeugung einer virtuellen Realität entstanden.
- *Betrachtungsgeräte* sind frei bewegliche Einrichtungen, die in ihrer Funktion den Datenhelmen entsprechen. Man tritt an sie heran und vermeidet so das Tragen der großen Masse und das komplizierte „Aufsetzen".
- *Direkte Projektion* von Licht auf die Netzhaut.
- *Biologische Implantate* für Sehgeschädigte befinden sich erst in der Entwicklung, könnten aber in der Zukunft beachtliche Bedeutung erlangen.

Bei den *Mini-Displays* sind bisher drei Varianten bekannt geworden. Ein „Privat Eye" wurde von der Fa. Reflection Technologies aus Massachusetts bereits vor einigen Jahren entwickelt. Das Gerät ist etwa 3,0×3,3×8,9 cm^3 groß und wird an einem Stirnband getragen (**Bild 9.15**b, übernächste Seite). Seinen inneren Aufbau zeigt Bild 9.15e. Eine Spalte aus 280 roten Leuchtdioden befindet sich am hinteren Ende und wird durch eine Elektronik angesteuert. Am vorderen Ende befindet sich ein Klappspiegel, der das Licht der LED über eine größere Länge im Sinne einer Bildzeile verteilt. Durch die synchrone Ansteuerung von LED und Spiegel entstehen dabei 720 Pixelpositionen der 280 Zeilen. Mittels der Linse kann ein im Raum schwebender Bildschirm für Entfernungen von 20 cm bis 2 m

eingestellt werden. Bewährt hat sich dieses Gerät u. a. für Wartungstechniker bei Flugzeugen. Sie benötigen bei ihrer Arbeit ständig viel Dokumentation. Diese können sie mit diesem Gerät – ohne von der Arbeit aufzublicken – parallel abrufen und betrachten. Man kann auch zwei Geräte benutzen, dann ist ein Stereobild möglich.

Im letzten Jahr hat ein amerikanisches Unternehmen eine hochauflösende *Aktiv-Matrix-LCD* als Bauelement, zunächst noch ohne eine konkrete Nutzung, geschaffen. Das Pixelraster liegt bei nur 15×15 μm^2. Das sind 1700 dpi, geplant sind 2000. Auf einer Fläche von 4,8×3,6 mm^2 werden so 320×240 Pixel erreicht. Durch eine vorgesetzte Linse ist der Sichtwinkel auf 16° eingestellt. Das entspricht in der virtuellen Entfernung von 1,5 m einer Bildschirmdiagonale von 50 cm. Der LCD-Chip wird von hinten mit mehreren LED beleuchtet und erreicht so eine Helligkeit von 70 cd/m^2. Es sind 256 Graustufen und ein Kontrast von 80:1 möglich. Das komplette Modul mit Treiberschaltung, Beleuchtung, Linse und Kabelanschluß ist 17×11×10 mm^3 groß, besitzt eine Masse von 6,5 g und benötigt nur 20 mW. Mittels sequentieller Farb-LED ist auch Farbtüchtigkeit geplant.

Eine dritte Entwicklung „*Virtuo-Vue*" stammt von Motorola (Bild 9.15a). Sie beruht auf einer Matrix aus 34560 AlGaInP-LED, die ein Display mit 240×144 Pixel darstellt ($^1/_8$ VGA). Die LED strahlen bei 605 nm, erscheinen daher bernsteingelb. Sie erzeugen eine maximale Helligkeit von reichlich 25 cd/m^2. Es sind 16 Graustufen erreichbar. Durch das kleine Rastermaß von 40 µm beträgt die Größe des LED-Chips nur 5,8×3,85 mm^2. Die Ansprechzeit des Moduls liegt bei 3 µs. Einige Details zum Aufbau zeigt Bild 9.15d. Mit der Linse erscheint das Bild bei einer virtuellen Entfernung von 1,5 m etwa in der Größe eines 18-Zoll-Monitors. Das gesamte Modul besitzt eine Masse von 10 g und benötigt 30 mW Leistung. Als erste Anwendungen sind ein Lesegerät für Chipkarten und der Einsatz bei leistungsfähigen Pagern geplant.

Völlig anders funktioniert ein VRD (virtual retinal display = *Retina Display*), das am Human Interface Technology Laboratory (HITL) entwickelt wurde. Mit gebündeltem Licht wird ein virtuelles Bild direkt auf die Retina des Beobachters projiziert (Bild 9.15c). Ein schwacher Laserstrahl wird durch zwei bewegliche Spiegel in beide Richtungen abgelenkt. Über ein Linsensystem aus der Fokussierungsoptik und dem Okular gelangt dieses Licht über die Linse des Auges direkt auf die Netzhaut. Das Auge soll dabei entspannt in die „Ferne" blicken. Durch Helligkeitssteuerung des Lasers und genau darauf synchronierte Bewegung der beiden Spiegel entsteht auf der Netzhaut das Bild. Um 1995 wurden bereits 60 Hz Bildfrequenz und 640×480 Pixel erreicht. Der subjektive Bildwinkel der Fläche lag bei 40°×30°. Das Hauptproblem besteht in der hohen Ablenkgschwindigkeit des horizontal wirkenden Spiegels (Zeile). Er muß mit Ultraschallfrequenzen definiert schwingen. Obwohl Resonanzeffekte genutzt werden, konnten nur wenige Winkelgrade erreicht werden. Für räumliche Bilder müssen zwei Systeme benutzt werden. Damit gelangt dieses Display in die Nähe der Datenhelme. Es ist geplant, die Auflösung auf 1024 Zeilen mit 1280 Bildpunkten und die Bildwiederholfrequenz auf 72 Hz zu erhöhen. Das Sehfeld läßt sich auf 120° erweitern.

Die Entwicklung von Datenhelmen (HMD = Head Mounted Display) war von Anbeginn mit anderen Zielen verknüpft. Es sollte eine Virtuelle Welt erlebbar werden. Dazu gehören viele Komponenten, aber vor allem ein spezielles Stereobild (s. S. 226ff). Deshalb mußte einmal beiden Augen je ein Display zugeordnet werden. Außerdem mußten alle Bewegungen des Kopfes erfaßt werden (S. 195ff). Den ersten Datenhelm hat wahrscheinlich 1968 Ivan Sutherland als Student an der Havard Universität gebaut. Er verwendete kleine Bildröhren zur Anzeige und einen gewaltigen Metallarm für die Ortung. Wegen der großen Masse erhielt der Helm den Spitznamen „Damoklesschwert". 1984 begann dann Moffet Field bei der NASA, einen Helm mit zwei LCD-Monitoren (je 320×240 Pixel), die er von Taschenfernsehern demontierte, zu bauen. Eine relativ anschauliche Zusammenstellung dieser und weiter Varianten enthält [AUK]. Ein Überblick zum Stand von 1995 weist bereits 33 Helme und helmähnliche Konstruktionen aus (c't 11/95, S. 208). Bis etwa 500×500 Pixel werden heute Aktiv-Matrix-LCD und darüber bis zu Auflösungen von 2048×2048 Bildröhren verwendet. Es ist bisher aber nicht gelungen, Farbbildröhren mit kleinen Abmessungen herzustellen. Deshalb werden Farbshutter mit LCD oder rotierende Farbräder verwendet. Die dabei notwendige Bildwiederholfrequenz von etwa 180 Hz und die hohen elektrischen Spannungen von einigen kV müssen zum Menschen hin sehr gut abgeschirmt werden. LED-Varianten gibt es noch nicht, obwohl als Bauelemente

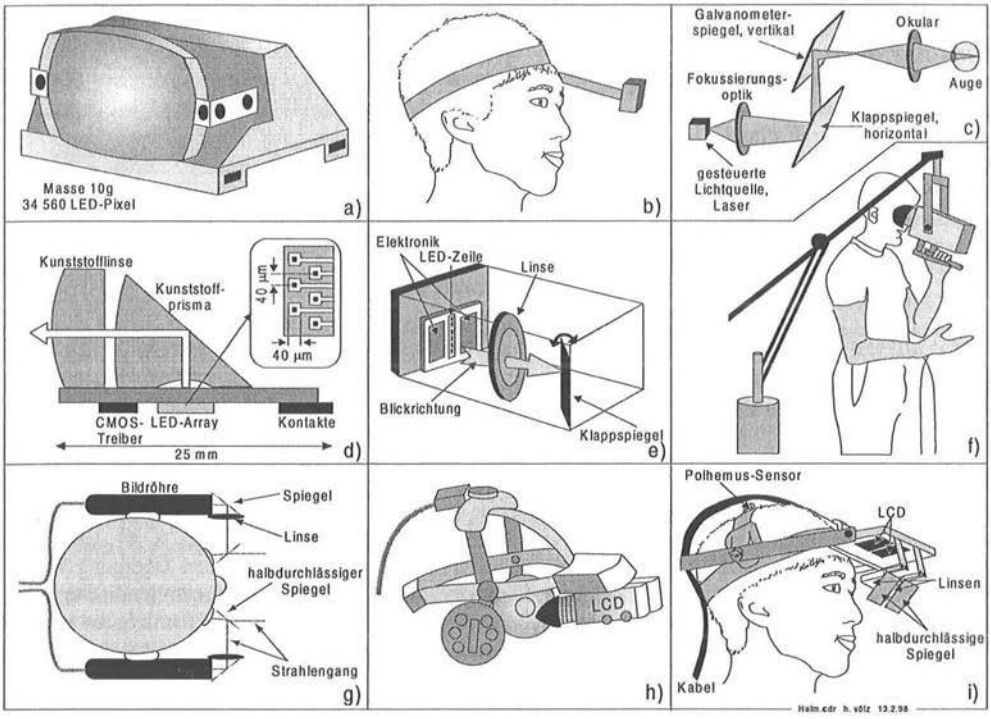


Bild 9.15 Varianten individuell zu nutzender Anzeigen

bereits Muster mit 1000×1000 Pixel vorliegen. So ergeben sich die beiden Prinzipaufbauten von Bild 9.15g und h. Bei der Variante von Bild 9.15h sind zusätzlich auch Kopfhörer vorhanden, die das zum Bild gehörende räumliche Schallfeld erzeugen. Auch eine Variante mit zusätzlicher Beobachtung der realen Welt kommt jetzt öfter vor. Sie benutzt gemäß Bild 9.15i halbdurchlässige Spiegel. Ein erstes Muster dieser Art entstand 1989 an der Universität von North Carolina (UNC-Helm). Die einfachsten Geräte begnügen sich mit etwa 263×230 Pixel. Die Preise beginnen bei knapp 600 und reichen bis zu einigen 100000 DM. Die Masse der Helme liegt zwischen 150 g und 3 kg. Zum Vergleich: eine übliche Brille hat etwa 150 g Masse. Weitere Details zu optischen Eigenschaften, wie Blickwinkel, Auflösung usw. folgen im nächsten Abschnitt ab S. 226. Die Anwendungen der Datenhelme sind heute bereits recht vielfältig. U. a. werden sie bei der Schulung|Ausbildung von Piloten, Chirurgen usw. zur Simulation realer Situationen eingesetzt. Auch können durch sie weitere und z. T. sehr entfernte Mediziner sehend|fühlend eine Operation miterleben und eventuell beratend eingreifen. Vorteilhaft sind Übungen zum Umgang mit gefährlichen Substanzen. In der Architektur hat das scheinbare Begehen von geplanten Bauwerken Bedeutung erlangt. Schließlich erhofft sich die Industrie mit Spielen und Unterhaltung auf dieser Basis einen Gewinn.

Eine Anordnung, die wie ein Helm funktioniert, wurde 1990 vom Forschungszentrum der NASA entwickelt und als BOOM (Binocular Omni Orientation Monitor) bezeichnet. Ihre Benutzung erfolgt, wie es Bild 9.15f zeigt. Man tritt einfach an das Gerät heran, bewegt es zu den Augen und schaut hinein. Genauso einfach kann man es auch wieder verlassen. Der Kopf wird durch keine Masse belastet. Die Aufhängung ist so gestaltet, daß es leicht in jede Position zu bewegen ist und dann auch dort ausbalanciert verbleibt. Die Auflösung des Systems beträgt 1280×1024 Pixel.

1993 pflanzte ein USA-Forscherteam einem Freiwilligen Elektroden in die Sehrinde. Der Proband sah Lichtmuster. Spätestens seit dieser Zeit wird versucht, durch direkte Stimulation Sehschwachen

und Blinden Hilfe zu geben. Am meisten fortgeschritten sind Möglichkeiten, die Nervenzellen in der Retina elektrisch direkt zu reizen. Das ist schätzungsweise für 600 000 Menschen sinnvoll, bei denen nur die Sehzellen ausgefallen sind. Dazu soll eine Minikamera in eine Brille eingebaut werden. Ihre Signale werden zunächst über neuronale Netze vorverarbeitet und dann durch Sonden elektrisch auf die Retina übertragen. Für viele würde es genügen, sich so wenigsten grob optisch orientieren zu können, indem sie z. B. den Umriß einer Tür erkennen. Der Preis für ein Implanat wird auf etwa 120000 DM geschätzt (c't 9/96, S. 116, Computer Ztg. 1+2/98, S.24).

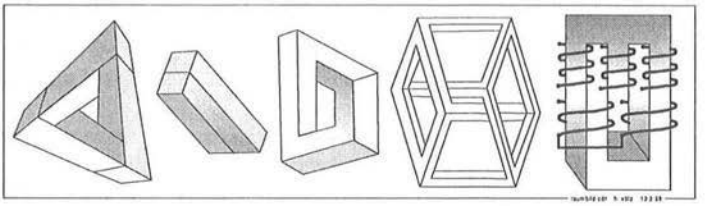


Bild 9.16 Beispiele für „unmögliche" Objekte

9.2.10 Stereobildtechniken

Wir sehen im Raum Objekte. Das wird besonders an jenen Bildern deutlich, die unmögliche räumliche Objekte darzustellen scheinen. Einige typische Beispiele zeigt **Bild 9.16.** (vgl. S. 44, Bild 3.23) Das ganz rechte Bild versucht sogar, einen „technischen" Transformator für den Übergang von 1- nach 3-Phasenstrom zu demonstrieren. Sehr umfangreich und bewußt hat sich der holländische Maler M. C. Escher in vielen Bildern mit falschen Perspektiven und Ansichten auseinandergesetzt. Dies beweist, daß es genau genommen falsch ist, von Stereo-, Raum- oder 3D-Bildern zu sprechen. Bilder sind stets zweidimensional. Da diese Begriffe nun aber einmal üblich sind, werden sie auch hier weiter verwendet. Die Ursache dieser Begriffsbildung liegt darin begründet, daß unsere beiden Augen ja *nur* zwei Ansichten (Bilder?!) der Objekte ermöglichen. Dennoch konstruieren wir offensichtlich (immer) auf höherer Nervenebene fast immer Objekte. Es ist nämlich nahezu unmöglich, selbst bei den obigen falschen Bildern die dritte Dimension zu unterdrücken. Die zentrale Ursache dürfte darin begründet sein, daß wir uns (offensichtlich) immer im dreidimensionalen Raum bewegen und dafür sehen, hören und fühlen zur Hilfe nehmen müssen. Um so erstaunlicher ist es, daß an einigen Stellen erwähnt wird, daß nur etwa 20 % der Bevölkerung überhaupt räumlich, also stereoskopisch sehen kann [HEN1]. Hinzu kommt, daß wirkliches räumliches Sehen – mittels zweier unterschiedlicher Teilbilder – nur im Nahbereich bis zu wenigen Metern möglich ist. Durch künstliche Änderung des Augenabstandes kann allerdings die sichtbare Raumtiefe verändert werden. Im Theaterglas wird sie verringert, um die Kulissen nicht flächig erscheinen zu lassen. Beim Fernglas wird sie erweitert, um auch in der Ferne noch Tiefen wahrzunehmen. Andererseits sehen wir auch indirekt – also mit einem Auge – räumlich. Hierzu trägt zunächst die Perspektive bei. Im einfachsten Fall geschieht dies dadurch, daß bekannte Objekte in der Nähe groß und in der Entfernung klein erscheinen. Dann können vordere Objekte die hinteren verdecken. Schließlich haben neueste Untersuchungen gezeigt, daß auch die optisch immer begrenzte Tiefenschärfe erheblichen Einfluß hat. Wenn wir mit einer Kamera oder unserem Auge ein Objekt in bestimmter Entfernung fixieren | fokussieren, dann sind nähere oder fernere Objekte mehr oder weniger unscharf. Der Grad der Unschärfe ist ein gewisses Maß für den Abstand vom fixierten Objekt. Weiter ist zu beachten, daß wir auch nur in einem begrenzten Winkelbereich wirklich räumlich sehen können, nämlich nur dort, wo die beiden Teilbilder der Augen den gleichen Raumbereich erfassen (s. S. 24, Bild 3.3c). Unter Berücksichtigung dieser Fakten lassen sich drei wichtige Klassen für Stereobilder ableiten:

- Arten der Bilder mit räumlicher Wirkung,
- Herkunft der Bilder, also z. B. Stereophoto oder 3D-Modelle und
- Methoden der Erzeugung der Bilder, die wir betrachten.

Alle drei Klassen müssen noch weiter zerlegt werden. Für die Bilder mit räumlicher Wirkung ergibt sich dann:

1. Der räumliche Eindruck wird durch die *Perspektive* eines zweidimensionalen Bildes hervorgerufen (wird hier nicht weiter behandelt).
2. Der räumliche Eindruck entsteht indirekt durch „Schielen" bei speziellen Bildern („Magisches Auge" ≈ *SIRDS* = single image random dot stereogram; s. S. 230). Dem Auge wird also nur suggeriert, räumliche Bilder zu sehen.
3. Es wird eine echte Raumtiefe dadurch erzeugt, daß den beiden Augen *zwei Bilder* aus entsprechend unterschiedlicher Sicht angeboten werden. Diese Bilder können herrühren von
   a. zwei Photographien oder Kameras bzw.
   b. durch Berechnungen aus einem Modell oder einer dreidimensionalen Funktion.
4. Es ist zusätzlich möglich, *verschiedene Raumansichten* zu betrachten;
   a. dies wird durch manuelle Steuerung, z. B. mittels Maus erreicht,
   b. dies wird durch Bewegung von Kopf, Körper und/oder Augen automatisch bewirkt oder
   c. es liegt ein Hologramm (s. S. 231) vor, um das ich etwas „herumgehen" kann.
5. Ein möglichst *großes Blickfeld* läßt einen Anwesenheitseffekt (≈ Immersion) aufkommen. Hierauf wird weiter unten eingegangen.
6. Statt der zwei Teilbilder für beide Augen wird ein *virtuelles Raumbild* erzeugt. Dies ist bei der Holographie der Fall.
7. Es wird ein *filmisches Geschehen* erzeugt, das dann automatisch ablaufen kann. Da dies nur eine spezifische Erweiterung der obigen Punkte darstellt, wird hier darauf nicht weiter eingegangen.

Die beiden Varianten 4a und 4b verlangen analog zu 3a und b entweder die Steuerung der Aufnahmekamera oder es erfolgt eine Berechnung aus dreidimensionalen Modellen der dargestellten Objekte. Bei den Modellen sind meist nur die Koordinaten für Punkte und deren Verbindungen gegeben. Zur Erzeugung der Objekte sind dann für jede gewählte Ansicht auch Verfahren für das Erzeugen von Oberflächen und Rendering erforderlich. Dabei sind auch Beleuchtungsarten und -richtungen von großem Einfluß. Je nach der gewählten Sicht werden also bei 3b, 4a und 4b die beiden jeweils aktuellen, zweidimensionalen Teilbilder neu berechnet. Ob die Steuerung bzw. die Berechnung der Ansichten dann nach 4a oder 4b erfolgt, ist vor allem eine technische Frage der gewählten Schnittstellen und Anwendungen. Für die **Herkunft der Bilder** sind vier Wege wichtig:

- Die Bilder werden | wurden über eine Aufnahmetechnik von *realen Objekten* gewonnen. Das kann u. a. durch Photographieren oder mittels Videokameras erfolgen.
- Die Bilder werden aus einem *formalen, mathematischen Modell*, z. B. $z = f(x, y)$ gewonnen. Das kommt vor allem in der Wissenschaft vor.
- Die Bilder werden aus einem Modell gewonnen, das *Koordinaten* von Punkten und deren Verbindungen enthält (s. o).
- Die Koordinaten für Bilder werden durch *3-dimensionales Scannen* (mittelbar) erhalten und dann in ein Modell eingebaut (vgl. S. 193).

Ein systematischer Überblick zu den **Prinzipien der Bilderzeugung** ist erheblich komplexer. Deshalb ist er im Schema von **Bild 9.17** (nächste Seite) zusammengestellt. Die einzelnen Verfahren lassen sich zunächst dadurch unterscheiden, ob sie nur eine oder gleichzeitig mehrere Personen nutzen können. Die direkte Projektion in beide Augen gilt eindeutig nur für eine Person. Z. T. ist das auch beim Helm oder der Brille gegeben. Andere Verfahren, insbesondere das mit der Spirale und die Holographie, lassen aber die Möglichkeit zu, daß viele Personen gleichzeitig das Raumbild sehen können. Auch bei Brillen ist dies dann möglich, wenn die Bilder so großflächig projiziert werden, daß mehrere Beobachter mit je einer Brille zuschauen können. Für die weitere, unabhängige Untergliederung sind die Varianten mittels Perspektive und die SIRDS hier nur noch der Vollständigkeit halber aufgenommen. Entscheidend ist die Dreiteilung nach *Brille, Helm und unbewaffnet* (ohne Brille, auch autostereoskop genannt). Die untere Zeile im Bild weist noch auf Besonderheiten von drei Verfahren hin, die etwas später noch genauer behandelt werden. Durch die Spezifik der Rot-Grün-Brille ist es praktisch nicht möglich, hiermit farbige Raumbilder zu erreichen. Die Auflösung für holographische

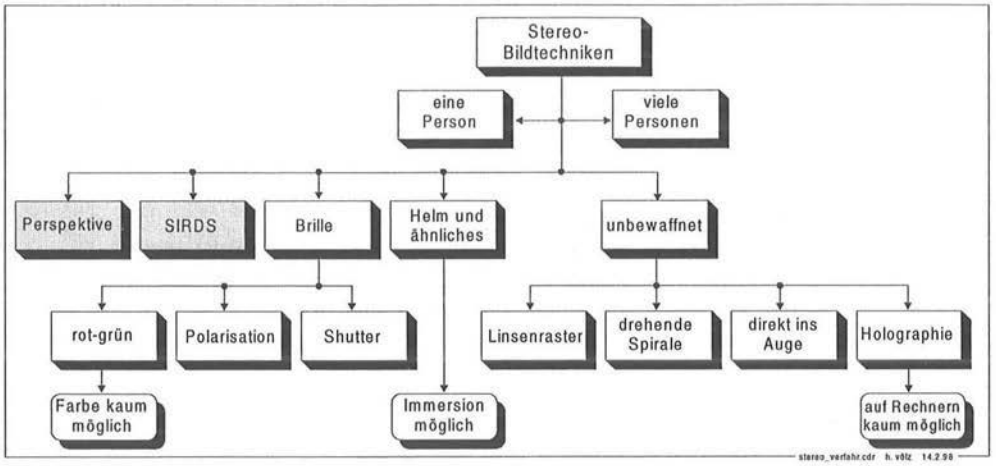


Bild 9.17 Methoden zur Darstellung von räumlichen Bildern

Bilder muß so hoch sein, daß sie nur bei extrem hohem Rechneraufwand und sehr spezieller Hardware möglich ist. Der Helm bietet als einziger die Möglichkeit, einen hinreichend großen Raumwinkel für die Immersion zu erreichen. Hierzu ist zu beachten, daß unsere beiden Augen einen Bereich von 180° horizontal und 80° vertikal erfassen (s. S. 25, Bild 3.3c). Der Stereobereich beträgt dabei jedoch nur etwa 45 ° in beide Richtungen. Gut scharf sehen wir sogar nur innerhalb von 40°. Alle diese Bereiche können wir ohne Bewegung des Kopfes dadurch erweitern, daß wir die Augen um 60° horizontal und 40° vertikal bewegen. Folglich sind maximal 300° horizontal und 160° vertikal erreichbar. Selbst ohne Raumeffekt ermöglichen dies nur spezielle Panoramakinos. Mit der Photographie sind entsprechende Aufnahmen mittels Fischaugenoptiken möglich. Auf den damit gemachten Bildern sind aber erhebliche „perspektivische" Verzerrungen vorhanden. Werden derartige Aufnahmen von zwei Standorten für spätere Stereobilder gemacht, so stören die Verzerrungen noch mehr. Daher hat vor längerer Zeit die Firma LEEP spezielle Optiken entwickelt, welche die Verzerrungen beim Betrachten weitgehend aufheben. Jede Optik enthält drei asphärische Linsen mit etwa 6facher Vergrößerung. Diese Optiken werden heute in ähnlicher Weise bei den Datenhelmen eingesetzt. Für das Field of view (FOV = horizontaler und vertikaler Blickwinkel) ermöglichen sie Werte von 20° bis 140° horizontal und 14° bis 66° vertikal. Die besseren Werte (größer als 90°×40°) bewirken deutliche Immersionseffekte. Für die Überlappung beider Bilder (Raumeffekte) wird meist empfohlen, sie zu 80 % für einen Winkel um 180° und zu 100 % bei einem Winkel ≤ 120° zu wählen.

Zu den wichtigsten Raumbildverfahren gibt **Bild 9.18** einen Überblick. Die wohl älteste Methode ist der *Stereobildbetrachter*, wie ihn Bild 9.18a zeigt. Auf einem Blatt befinden sich zwei Bilder, die von verschiedenen Standorten aufgenommen wurden. Über ein Linsen-Prisma-System sind die Bilder nur getrennt den beiden Augen zugänglich. Das Verfahren entstand mit der Photographie um 1835 in mehreren Varianten. Die Geräte und zugehörenden Bilder wurden etwa ab 1850 in großer Stückzahl produziert. Heute ist diese Technik so gut wie vergessen.

1850 erfanden unabhängig voneinander Rollmann und D'Almeida die *Anaglyphentechnik*. Sie drucken je ein Bild in roter und grüner Farbe. Mittels entsprechender Farbfilter werden sie dann getrennt den beiden Augen zugeführt. Dies ist wohl die technisch einfachste und zugleich preiswerteste Methode. Ihre Grundlagen enthält z. B. [MUC2]. Auch heute noch werden die Anaglyphen in verschiedenen Büchern zur Illustration räumlicher Zusammenhänge angewendet. Als Beispiele seien nur die darstellende Geometrie [MUC1] und die komplexen räumlichen Stoffstrukturen [MUC3] genannt. Aber auch in der Didaktik und für Sehübungen bei Kindern hat sich die Methode bewährt [SAC]. Daher ist es nicht verwunderlich, daß sie auch bei Computern zum Einsatz kommt. Es gilt

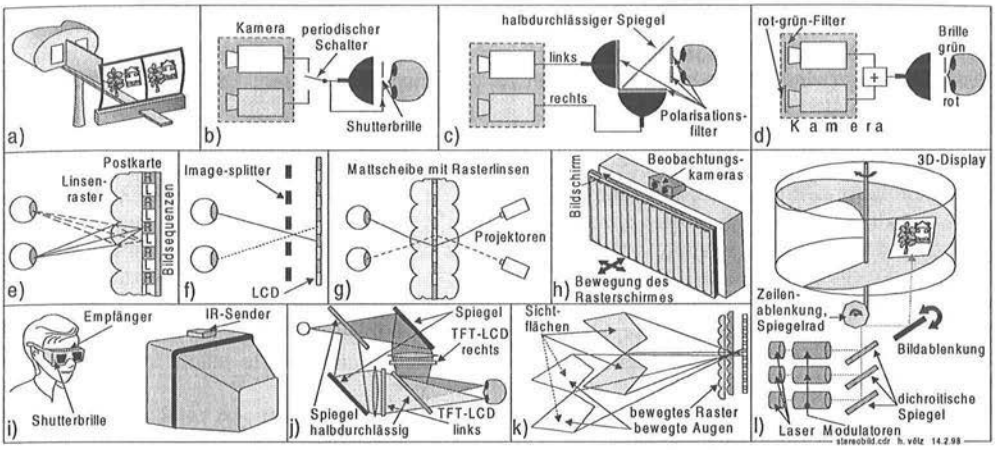


Bild 9.18 Verfahren zur Erzeugung von räumlichen Bildern

dann das Schema von Bild 9.18d. Vereinfachend genügt sogar eine Kamera, der die farbgefilterten Teilbilder über Spiegel zugeführt werden. Natürlich können auch Modelle von 3D-Strukturen oder mathematische Zusammenhänge so dargestellt werden. Statt rot-grün wird zuweilen auch rot-blau benutzt. Dann werden noch weniger Ansprüche an die Brillen gestellt. Jedoch ist unser Auge für blau weniger empfindlich als für grün. Durch die Wahl der beiden Filterfarben kann das entstehende Mischbild etwas in seinem Grundton zwischen golden, grau und bläulich variiert werden.

Ein anderes Prinzip erfand 1945 der Franzose M. Bonnet (Bild 9.18e). Es verwendet nebeneinander liegende *Zylinderlinsen*. Es heißt auch Lentikularverfahren. Die beiden getrennt erzeugten | aufgenommenen Teilbilder werden senkrecht in viele schmale Streifen geschnitten und rechts-links-verschachtelt ineinander gefügt. Vor jedem Streifenpaar befindet sich eine dünne, aus Kunststoff gepreßte Zylinderlinse. Auch kleine Primen sind statt der Linsen möglich. Durch sie sind die rechten und linken Streifen der Bilder jeweils nur für das entsprechende Auge sichtbar. Lange Zeit wurde dieses Verfahren im größeren Rahmen nur für Ansichtskarten genutzt. Seit einigen Jahren hat es auch in der Rechentechnik Einzug gehalten. Die beiden Teilbilder werden dann ähnlich verschachtelt z. B. auf einem LCD-Diplay angeordnet. Zur Trennung genügt sogar ein einfacher „Image-splitter", der ähnlich einem Gartenzaum aus periodischen, undurchsichtigen Stegen besteht (Bild 9.18f). Dieses Prinzip läßt sich auch zur Projektion für viele Personen nutzen. Mit einem doppelseitigen Linsenraster entsteht dann eine Anordnung wie sie Bild 9.18g zeigt. Hier werden die beiden Bilder von hinten auf die Mattscheibe projiziert und von vorne beobachtet. Damit ist prinzipiell eine Beobachtung für mehrere Personen möglich. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Positionen für ein einwandfreies Raumbild begrenzt sind. Je ein Auge muß sich dabei in einer Raute des Bildes 9.18k befinden. Bewegt man sich von dieser Position weg, so entstehen neue Rauten, die aber auch eine Position des vorderen Rasterschirmes erfordern. So entsteht eine Anordnung wie sie Bild 9.18h zeigt. Durch Beobachtungskameras wird der jeweils aktuelle Standort des Beobachters erfaßt. Daraus leitet das System dann die zugehörige Position der Linsenrasterplatte vor dem Großdisplay ab. So ein System wurde u. a. im Heinrich-Hertz-Institut-Berlin (HHI) im vom Bonner Forschungsministerium geförderten Projekt „Blick" entwickelt. Es verwendet u. a. ein 50-Zoll-Rückprojektions-Display.

Eine andere Methode mit Brille nutzt polarisiertes Licht aus. Die beiden Teilbilder werden durch *Polarisatoren* waagrecht bzw. senkrecht orientiert (Bild 9.18c). Eine entsprechende Brille vor den Augen realisiert dann die Trennung. Dieses Verfahren wird u. a. in speziellen Kinotheatern und bei DIA-Vorträgen viel benutzt. Seitdem die dichroitischen Polaristionsfolien preiswert herzustellen sind, ist es eine günstige Alternative zu den Anaglyphen und ermöglicht zusätzlich auch farbige Raumbilder. Die Brille ist kaum teurer und genauso leicht. Bei einer Bildübertragung werden die Signale von

den beiden Aufnahmekameras je einem Monitor zugeführt. Vor jedem Monitor befindet sich eine Polarisationsfolie. Ihre Polarisationsebenen sind senkrecht zueinander justiert. Über einen halbdurchlässigen Spiegel sind beide Monitore in einem Bildfeld zusammengeführt. Die Filter der Brille des Beobachters sind analog ausgerichtet.

Technisch einfacher ist das *sequentielle Verfahren* nach Bild 9.18b und i. Bei ihm wird auch von Tachistoskopie gesprochen. Hier werden die beiden Teilbilder nacheinander übertragen. Auf ein rechtes Bild folgt immer ein linkes usw. Die Trennung für die Augen erfolgt durch eine elektronisch gesteuerte LCD-Shutter-Brille (z. B. i-glasses und CrystelEyes), die erstmalig 1981von der Lenny Lipton's Stereo Graphics Corporation vorgestellt wurde. Sie sperrt abwechselnd den Lichtdurchgang zum linken und rechten Auge. Das Hauptproblem dieser Technik besteht darin, daß Flimmern zu reduzieren. Die Bildfrequenz muß nämlich mindestens doppelt so hoch wie beim üblichen Monitor sein.

Eine Variante des Retinadisplays, also der direkten Projektion ins Auge (s. S. 225), zeigt Bild 9.18j. Hier ist das System möglich gut ineinander gefaltet. Dadurch fällt es relativ klein aus. Diese Technik verfolgt u. a. Sharp.

Schließlich sei noch ein besonders leistungsfähiges Verfahren mittels Bild 9.18l beschrieben. Hier rotiert eine räumlich *spiralförmige Projektionsfläche*. So wird es möglich, ein echt räumliches Bild in dem Zylindervolumen darzustellen. Es ist zugleich für viele Personen in einem relativ großen Winkelbereich gut zu betrachten. Mit der Bildablenkung durch einen Klappspiegel werden quasi die Zeilen – also die Höhe im Volumen – ausgewählt. Das Spiegelrad schreibt dann die Punkte in den Bildzeilen. Die drei Laser (rot, grün und blau) mit ihren Modulatoren erzeugen die Bildpunkte innerhalb der Zeilen. Um geringes Flimmern zu erreichen, muß die Drehung der Spirale mit etwa 50 Hz erfolgen. Der Ablenkspiegel und das Spiegelrad müssen daher je nach Anzahl der Bildpunkte im dreidimensionalen Raum deutlich schneller als beim „einfachen" Fernsehen erfolgen. Daher stellt das Verfahren große Ansprüche an den technischen Aufwand. Es befindet sich bestenfalls in der Erprobungsphase.

Eine ganz ungewöhnliche Form der Raumbilderzeugung sind die *Autostereogramme*. Im größeren Rahmen wurden sie erst durch das 1992 erschienene Buch *„Magic Eye"* bekannt. Es enthält eine größere Anzahl solcher Bilder. Erst später zeigte sich, daß solche Versuche nachweisbar bereits 1883 gemacht wurden. Zwei wichtige Vorläufer der heutigen Technik sind dann Masayuki Ito (1970) und Bela Julesz (1971). Beide erzeugten unabhängig derartige Zufalls-Stereobilder (SIRDS = single image random dot stereogramm). 1973 schreibt Salvador Dali ein Buch über stereoskopische Malerei. 1976 schafft David Marr die Berechnungsmodelle für Autostereogramme. Drei Jahre später stellt auf dieser Basis Christo Tyler das erste „berechnete" Autostereogramm her. Zur gleichen Zeit erscheinen die grundlegenden Arbeiten von Christopher Tyler und Maureen Clarke. Doch erst 1990 werden solche Bilder in den USA kommerziell vermarktet. Mehrere Jahre sind sie dann eine wirkungsvolle Modeerscheinung. Sie werden nur sichtbar, wenn es uns gelingt, zwei Fähigkeiten unseres Sehens zu entkoppeln. Das vollbringt nicht jeder. Einen Gegenstand *fixieren* wir, indem wir beide Augen auf ihn richten (*Konvergenz*). Zusätzlich werden die Linsen so gewölbt, daß scharfe Netzhautbilder entstehen (*Adaption*). Durch die Seherfahrung erfolgt beides automatisch und fest gekoppelt. Eine Entkopplung ist nur in Sonderfällen möglich. Besonders geeignet sind hierfür periodische Strukturen. Sie werden im „Normalfall" so gesehen, wie es **Bild 9.19**c zeigt. Die Augen können aber auch willentlich und durch Training so gestellt werden, daß sich jeweils benachbarte Würfel bezüglich der beiden Netzhautbilder decken. Dann sind zwei Fälle zu unterscheiden. Im Bild 9.19d sind die Augen so verdreht, daß sich die Sehstrahlen vor den eigentlichen Würfeln kreuzen. Die Folge ist, daß je zwei benachbarte echte Würfel zu einem scheinbaren Würfel verschmelzen, der näher zu liegen scheint. Da seine Größe auf der Netzhaut aber erhalten bleibt, erscheint er – weil näher – zugleich kleiner. Voraussetzung für dieses Sehen ist aber, daß die Adaption auf die wirkliche Entfernung erhalten bleibt. Auch der umgekehrte Fall ist möglich (Bild 9.18b). Wir verringern den Winkel der beiden Augen und bringen dadurch ebenfalls benachbarte Würfel zur Deckung. Dann kreuzen sich die Sehstrahlen in größerer Entfernung. Dieser Effekt ist meist leichter zu erreichen. Wenn wir nämlich entspannt in die Ferne blicken, sind unsere Sehstrahlen parallel. Dann wird von unten das Blatt vor die Augen gebracht und wir brauchen nur noch zu adaptieren, ohne jedoch die Stellung der Augen zu ändern. Im Bild 9.19b ist aber auch der wesentliche Effekt erkennbar. Wenn nämlich die Würfel nicht ganz exakt periodisch

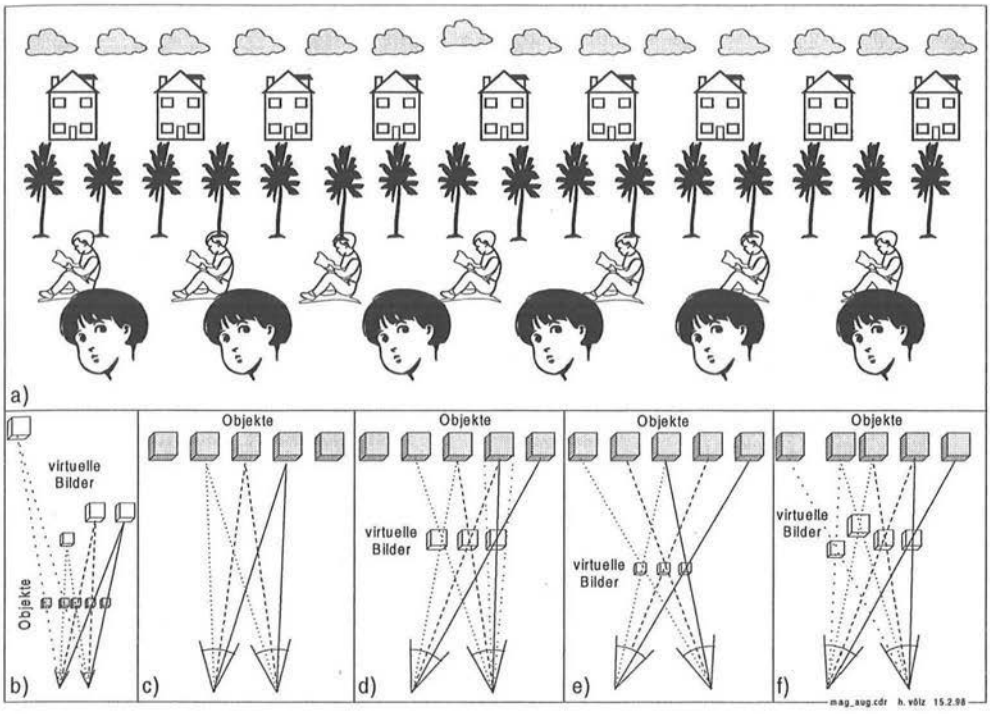


Bild 9.19 Autostereogramm und seine Herleitung

angeordnet sind, dann befinden sich die scheinbaren Würfel in unterschiedlicher Entfernung. Sie stehen unterschiedlich im Raum. Im Bild 9.19f ist dies deutlicher für den Fall gekreuzter Sehstrahlen erkennbar. Bild 9.19e zeigt schließlich noch eine weitere Möglichkeit. Es lassen sich nicht nur benachbarte Würfel zu einem Bild ergänzen, sondern auch solche mit einem Abstand zwei, ja sogar drei, vier usw. Diese Verfahren funktionieren bei allen regelmäßigen Strukturen und sollen zuerst an Tapetenmustern entdeckt worden sein. Solche Strukturen findet man an Wänden (in Wartezimmern!). Diese Wände lassen sich dann näher oder ferner (und damit kleiner oder größer und oft in mehreren Stufen) je nach Stellung der Augen betrachten. Die eigentlichen Raumbilder werden aber erst durch die leichten Unregelmäßigkeiten in den Abständen erzeugt. Als Beispiel hierfür kann das Bild 9.19a dienen. Bei gekreuzten Sehstrahlen befinden sich alle Strukturen vor der Papierebene: ganz nahe die Portraits, dann der lesende Junge, dahinter der Reihe nach die Bäume, die Häuser und ganz hinten die Wolken. Nur die Häuser stehen exakt in einer Entfernung. Bei allen anderen wurden die Abstände, und damit die subjektiv erscheinenden Entfernungen, verändert. Eine Wolke wurde bewußt „höher" gesetzt, um eine solche „Störung" zu erkennen. Bei entspanntem Blick sind alle Figuren hinter dem Papier. Man blickt quasi durch das Fenster „Papier". Dann ist die Reihenfolge anders: Junge, Portrait, Bäume, Wolken Haus. Es ist nicht abzusehen, ob das Autostereogramm jemals eine praktikable Anwendung findet [RIC4; THI; NN16].

Das *Hologramm* als räumliches Bild hängt bereits in vielen Galerien. Die Grundidee hierzu und erste Ergebnisse stammen von Dennis Gabor (1947/8). Die erste öffentliche Vorführung eines Hologramms erfolgte 1963 in den USA. Eine wesentliche Weiterentwicklung stellt das 1969 von der Polaroid-Company erfundene Regenbogen-Hologramm dar. Dadurch wird es möglich, bereits erzeugte Hologramme massenweise zu vervielfältigen. 1984 wird auf dieser Basis im Märzheft der „Geographic" erstmalig ein Adler elfmillionenmal als großes Hologramm „gedruckt". Heute wird diese Tech-

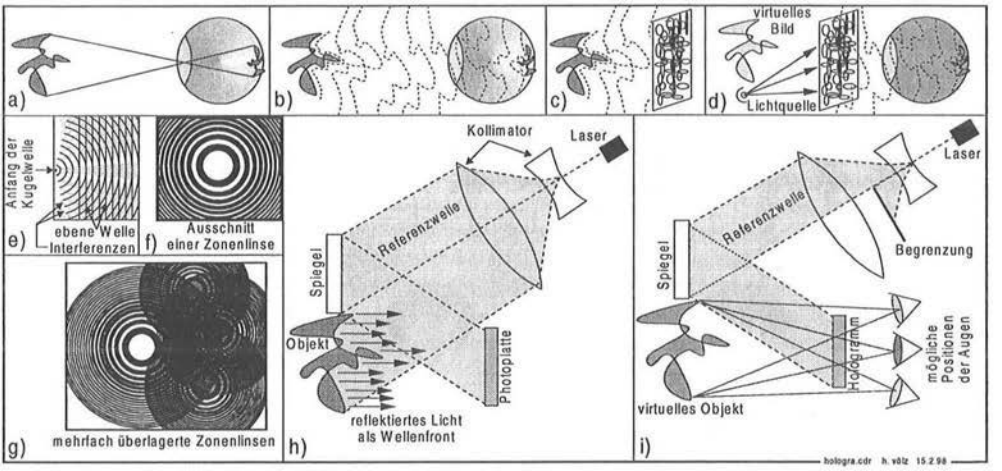


Bild 9.20 Entstehen eines Hologramms und seine Wiedergabe

nik äußerst vielfältig auf Kreditkarten, als Softwareschutz usw. angewendet. Die Erzeugung des primären Hologramms bleibt aber äußerst schwierig. Obwohl die „Berechnung" aus 3D-Modellen aufwendig ist, stellt sie heute kein größeres Problem mehr dar. Aber eine direkte Rechnerausgabe wird es wohl einstweilen nicht geben. Für ein besseres Verstehen folgt eine sehr kurze Beschreibung.

Optische Abbildungen werden meist mittels Lichtstrahlen beschrieben. Eine typische Darstellung dafür ist **Bild 9.20**a. Licht kann aber auch als Ansammlung bewegter Photonen oder als Welle interpretiert werden. Bei der Wellenbeschreibung gilt das Huygenssche Prinzip: Von jedem Punkt, den das Licht erreicht, geht eine Kugelwelle aus. Die Summe der Kugelwellen bildet eine Wellenfront. Das versucht Bild 9.20b zu veranschaulichen. Auch so gelangt ein Bild des Objektes auf unsere Netzhaut. Wenn diese Wellen nun ein Fenster durch- "wandern", so existieren für das „Bild" in diesem Fenster zu jedem Zeitpunkt bestimmte elektromagnetische Feldkonfigurationen. Schematisch sind sie als viele kleine Kreise (s. u. warum) im Bild 9.20c symbolisiert. Wenn es gelingt, diese Feldkonfiguration zu speichern (s. u. wie), dann wird das Fenster zu einem Hologramm. Danach genügt die Lichtquelle. Sie läßt aus der Feldkonfiguration für das Auge das Objekt wieder scheinbar entstehen. Obwohl das Objekt hinter dem Fenster nicht vorhanden ist, wird es aber genauso gesehen.

Wesentlich für die Holographie ist die Interferenz zwischen Wellenzügen. Sie wurde bereits auf S. 27 mit Bild 3.5g kurz eingeführt. Wenn sich eine Kugelwelle und eine dazu kohärente (s. S. 143ff) ebene Welle gemeinsam ausbreiten, dann entstehen ebenfalls Interferenzen. Dies macht Bild 9.20e sichtbar. Sie verstärken sich dort, wo die Wellenzüge gleichphasig sind. An den anderen Stellen sind sie gegenphasig und heben sich auf. Der senkrechte Schnitt durch eine solche Wellenbewegung führt zur Zonenlinse gemäß Bild 9.20f. Sie ist durch dunkle und helle Ringe gekennzeichnet. Überlagern sich mehrere Punktquellen mit einer ebenen Welle, so entsteht das Aussehen von Bild 9.20g. Dies ist die Basis aller Holographie. Wie die Aufnahme eines Objektes erfolgt, zeigt Bild 9.20h. Es wird dazu ein Laser mit ausreichender Kohärenzlänge benötigt. Sie muß länger als die Summe aller Strahlenwege sein. Das Licht des Lasers wird zunächst mit einem Kollimator aufgeweitet und parallel (ebene Welle) gemacht. Die ebene Referenzwelle gelangt über den Spiegel direkt auf die Photoplatte. Von der Oberfläche des Objekts gehen reflektierte Kugelwellen aus. Sie erzeugen eine verbogene Wellenfront, die sich ebenfalls zur Photoplatte bewegt und dort mit dem Referenzstrahl interferiert. Bei hinreichend langer Belichtung entsteht so das eingefrorene Wellenbild gemäß Bild 9.20c. Für die Wiedergabe des „entwickelten" Hologramms genügt dann in etwa gleicher Anordnung der Referenzstrahl (Bild 9.20i). Man kann sogar, soweit es das Hologramm zuläßt, die Augen an unterschiedliche Orte bringen und so um das Objekt quasi „herumgehen". Daher wird auch verständlich, warum bereits ein

Stück von einem Hologramm das vollständige Bild enthält. Es müssen darauf nur ausreichende Abschnitte von allen Zonenlinsen des Objektes vorhanden sein. Die „Menge" der Zonenlinsenanteile bestimmt aber die Bildfeinheit. Sie wird um so besser, je größer das Hologramm ist. Für die heute vorliegenden Hologramme waren noch weitere Lösungen notwendig. Sie betreffen vor allem folgende Punkte:

- Das hier geschilderte Prinzip erzeugt Durchlichtholographie. Wir wollen sie aber als Bilder reflektierend betrachten (Reflexhologramm).
- Das Bild kann nur mit Laserlicht der gleichen Wellenlänge betrachtet werden. Wir wollen aber gewöhnliches Tages- oder Kunstlicht nutzen (Regenbogenhologramm).
- Die Erzeugung eines Hologramms ist sehr aufwendig. Das Hologramm muß aber massenweise verfügbar sein (Hologrammkopie).

Da die hierzu notwendigen Lösungen auch in absehbarer Zeit (s. u.) kaum für die Mensch-Technik-Schnittstelle Bedeutung erlangen werden, braucht hier darauf nicht weiter eingegangen zu werden. Eine gut lesbare Darstellung enthält u. a. [ERN3]. Hier seien nur noch die wichtigsten *Voraussetzungen* für die Holographie zusammengefaßt:

- Es wird ein Laser mit großer *Kohärenzlänge* benötigt.
- Es wird ein *Photomaterial* benötigt, daß die feinen Interferenzen speichern kann. Dazu sind mehrere tausend Linien/mm notwendig. Ein üblicher Photoabzug erreicht aber nur etwa 10 Linien/mm und ein Farbfilm etwa 100 bis 200 Linien/mm. Solche hochauflösenden Photomaterialien sind sehr wenig lichtempfindlich. Daher kann die Aufnahme eines Hologramms durchaus Stunden dauern.
- Es wird eine extrem hohe *mechanische Stabilität* der Aufnahmeapparatur verlangt. Während der gesamte Aufnahmezeit darf sich keine Position aller beteiligten Einrichtungen um Bruchteile der Wellenlänge verlagern. Das erfordert u. a. hohe Temperatur- und Feuchtekonstanz, aber auch höchste Erschütterungssicherheit.

Diese Aufzählung macht auch deutlich, wo die technischen Probleme liegen. Wann werden wir z. B. ein elektronisches Wiedergabeverfahren besitzen, daß Strukturen deutlich unterhalb eines µm, also mit mehr als 25000 dpi auszugeben vermag?

Raumbilder sind also auf vielfältige Weise und mit recht unterschiedlichen Eigenschaften zu erzeugen. Was bringen sie uns aber an zusätzlichen Möglichkeiten, welchen Gewinn erreichen wir durch sie? Bezüglich der Farbe gab es eine ähnliche Frage vor reichlich zehn Jahren. Heute scheint uns Farbe unverzichtbar zu sein. Rein schwarz-weiße Ausgaben sind aber dennoch nicht verschwunden. Für Texte und viele einfache Zeichnungen bringt Farbe kaum Vorteile. Aber bereits bei Präsentationen entstehen deutliche Vorteile. Farbe kann einer klaren Gliederung dienen, macht Zusammenhänge besser verständlich und hat zuweilen auch Signalwirkung. Bei vielen Bildern ist sie fast unentbehrlich geworden. Zuweilen wird sogar photorealistische Farbe verlangt. Wir leben und handeln in einer dreidimensionalen Welt. Dennoch macht z. B. bei einer Textverarbeitung Dreidimensionalität keinen Sinn. Sie wird eher die Arbeit behindern. Räumliche Zusammenhänge dagegen werden so weitaus besser verständlich. Auch ein großer Winkel bei der Räumlichkeit hat Vor- und Nachteile. Ein zu weites Gesichtsfeld kann vom wesentlichen ablenken und so die Arbeit behindern. Das dürfte z. B. für das Zeichnen gelten. Beim Wandern und Erkunden im Gelände ist jedoch der Rundumblick vorteilhaft und bezüglich Gefahren sogar unentbehrlich. Schließlich entsteht auch die Wirkung, das Erlebnis virtueller Welten erst im großen Sehraum.

9.3 Schallausgaben

9.3.1 Schallausbreitung und -erzeugung

Als Schall werden mechanische Schwingungen bezeichnet, die im für uns hörbaren Frequenzbereich (20 Hz bis 20 kHz) liegen. Schwingungen höherer Frequenz heißen Ultra- und tieferer Frequenz Infraschall. Schall kann sich in allen Medien, also Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen, aber nicht im Vakuum ausbreiten. Darauf bezogene Begriffe sind Körper- und Luftschall. Beim Schall führen die Moleküle des Mediums Bewegungen um ihre Ruhelage aus. Folgen sie einer Sinusschwingung der Frequenz f, so gilt für die Auslenkung (in der Akustik mit ξ bezeichnet, x ist für den Ort reserviert)

$$\xi = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t).$$

Hierin bedeuten a die Amplitude der Bewegung und $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Kreisfrequenz. Die Geschwindigkeit der Bewegung ergibt sich durch Differenzieren nach der Zeit zu

$$s_t = \frac{d\xi}{dt} = a \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Ihre effektive Größe heißt *Schallschnelle* $s = a \cdot \omega$. Sie ist deutlich von der *Schallgeschwindigkeit* v zu unterscheiden, mit der sich die Bewegung der Moleküle im Raum fortpflanzt. Der Unterschied wird aus **Bild 9.21**a deutlich. Dort existieren nur die in einer Spalte untereinander gezeichneten Massekügelchen. Sie mögen an einem elastischen Faden hängen. Die nebeneinanderliegenden „Fäden" gelten für die eine Kette, jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Anfangs wird die oberste Kugel (durch Unterdruck) nach oben gezogen. Für die Auswirkung sind nach rechts spätere Zustände dargestellt. Später wird die oberste Kugel nach unten bewegt (durch Überdruck). Beim periodischen Wiederholen führt also die oberste Kugel eine Sinusbewegung um ihre Ruhelage mit der Amplitude a, der Schnelle s und der Frequenz f aus. Über das elastische Band wirkt die so erzwungene Bewegung der obersten Kugel auf die darunter befindlichen ein. Auf diese Art pflanzt sich die Verlagerung der einen Kugel durch das Band nach unten fort. Die dabei auftretende Geschwindigkeit ist nur von der Masse der Kugeln und der Elastizität des Bandes abhängig. Die Amplitude und Frequenz der Bewegung der oberen Kugel haben darauf (im Idealfall) keinen Einfluß. Die Schnelle ist also ein Maß für die Intensität der Bewegung (des Schalles). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist unabhängig davon und typisch für das Ausbreitungsmedium. Einige typische Schallgeschwindigkeiten betragen für Luft 340, für Wasser und Gummi 1500, für Knochen 3600 und für Aluminium 6200 m/s. Für den Menschen hat die Schallausbreitung in der Luft die größte Bedeutung. Nur in Sonderfällen oder bei Behinderten kommen Flüssigkeits- oder Festkörperwellen (Knochenleitung) zur Anwendung. Die Schallgeschwindigkeit bestimmt auch die Wellenlänge λ der Schallausbreitung gemäß

$$f = \frac{v}{\lambda} \text{ bzw. } \lambda = \frac{v}{f}.$$

Für gewöhnliche Luft ergeben sich so die Werte der folgenden Tabelle:

f in Hz	20	50	100	200	500	1 k	2 k	5 k	10 k	20 k
λ	17 m	6,8 m	3,4 m	1,7 m	68 cm	34 cm	17 cm	6,8 cm	3,4 cm	1,7 cm

Wichtig ist noch der Schalldruck als Kraft je Fläche. Im Gegensatz zum Luftdruck mit etwa 10^5 N/m^2 handelt es sich hierbei um den Effektivwert eines Wechseldruckes. Wir können Schalle im Bereich zwischen etwa $2 \cdot 10^{-5}$ und 20 N/m^2 hören. Ein Sprecher in 1 m Abstand erzeugt 0,01 bis 0,1 N/m^2. Der Wechseldruck ist also klein im Vergleich zum statischen Luftdruck.

Die bisher betrachtete Schallausbreitung ist nur eine mögliche von vielen. U. a. brauchen nicht immer die Bewegungsrichtung der Moleküle (Schnelle) und die der Ausbreitungsrichtung übereinstimmen. Die wichtigsten *Wellenformen* bzw. *-arten* sind:

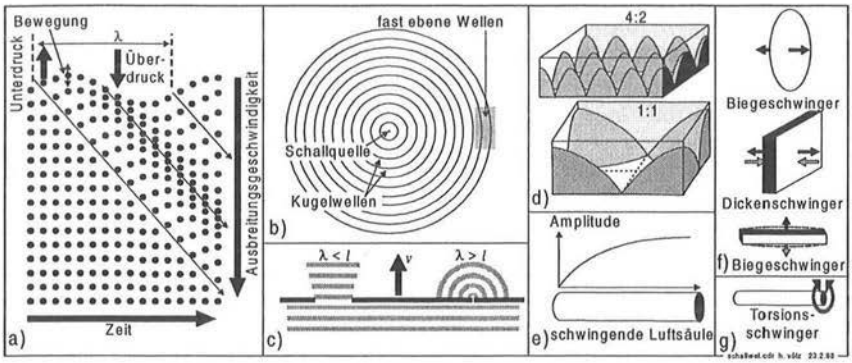


Bild 9.21 Ausbreitung und Wirkung von Schall

- Bei den *Längs-* bzw. *Longitudinalwellen* stimmt – wie oben beschrieben – die Bewegung der Partikel mit der Ausbreitungsrichtung der Wellen überein. Sie treten bevorzugt bei Flüssigkeiten und Gasen auf. Zu ihnen gehört immer die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit.
- *Transversal-* bzw. *Schubwellen* treten (zusätzlich) bei Festkörpern auf. Bei ihnen sind nämlich Längenänderungen in einer Richtung mit Änderungen in den dazu senkrechten Richtungen über entsprechende Elastizitätsmodule verknüpft.
- *Kugelwellen* gibt es für Longitudinal- und Transversalwellen. Sie setzen einmal ein Medium voraus, das in jeder Richtung groß gegenüber der Wellenlänge ist. Außerdem muß dazu der Schall von einer punktförmigen Quelle ausgehen, und es darf keine Ausbreitungsrichtung bevorzugt sein (Bild 9.21b). Der Schalldruck nimmt immer mit der Entfernung ab ($s_r = s_0/r$). Für die Schnelle gilt dagegen im Nahfeld $1/r^2$.
- Bei *ebenen Wellen* ist die Ausbreitungsfront eine ebene Fläche. Näherungsweise gilt dies auch in großer Entfernung bei einer Kugelwelle (Bild 9.21b).
- *Biege-* oder *Dehnwellen* treten in Medien auf, deren Abmessung zumindest in einer Richtung in der Größenordnung der Wellenlänge liegt. So gibt es u. a. schwingende Stäbe und Membranen (Bild 9.21f.).
- *Torsionschwingungen* treten durch Verdrehung eines stabförmigen Mediums auf (Bild 9.21g).
- *Oberflächenwellen* können schließlich noch an der Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Medien auftreten. Auf sie wurde bereits auf S. 115f und in Bild 7.10f und g eingegangen.
- *Schwingende Luftsäulen* treten in abgegrenzten Räumen auf. Dies ist u. a. bei Orgelpfeifen und Blasinstrumenten der Fall (Bild 9.21e). Aber auch in großen Räumen sind solche Resonanzeffekte möglich. Sie wirken sich dann meist störend auf die Akustik aus. Bild 9.21d zeigt zwei Beispiele für rechteckige Räume und bei Anregung mit einer Frequenz. In einem quadratischen Raum entsteht die unten gezeigte 1:1-Welle dann, wenn die Wellenlänge den Abmessungen des Raumes entspricht. Die 4:2-Welle (oben) erfordert dagegen für eine Frequenz einen rechteckigen 1:2-Raum und eine Wellenlänge von der Hälfte der kurzen Raumseite.

Für die Ausbreitung des Luftschalles gilt wieder das Huygenssche Prinzip (Bild 9.21c). Von jedem Punkt, den der Schall erreicht, geht wieder eine Kugelwelle aus. Dies bedeutet, daß bei Hindernissen die Größe der Öffnung im Vergleich zur Wellenlänge entscheidend ist. Hinter einem Loch mit der Öffnung $l < \lambda$ erscheint eine Kugelwelle. Gilt für das Loch dagegen $l > \lambda$, so entsteht eine nahezu ebene Welle, die kaum divergiert. Dies legt es nahe, Licht und Schall zu vergleichen (umseitige Tabelle). Insbesondere durch die völlig anderen Größenordnungen, können also Aussagen nur sehr bedingt übernommen werden. Dies macht u. a. das Beispiel einer üblichen Raumwand deutlich. Alles, was optisch sehr uneben erscheint, kann akustisch ein hervorragender Spiegel sein.

Eigenschaft	Licht	(Luft-) Schall
Energieart	elektromagnetisch	mechanisch
Geschwindigkeit	$3 \cdot 10^8$ m/s	340 m/s
Wellenlänge	400-700 nm	17 m - 1,7 cm
Reflexion an Zimmerwand	diffus	spiegelnd
Absorption an der Wand	10-50%	10-20%

Schall gelangt von einem Sender zu einem Empfänger. Wenn sich der Abstand zwischen beiden verändert, so registriert der Empfänger eine Frequenz f_E, die von der des Senders f_S abweicht. Bewegt sich der Sender mit v_S gegenüber dem Empfänger, so werden die Wellenlängen im Medium geändert. Bewegt sich der Empfänger mit v_E, so nimmt er die Wellenlängen im zeitlich veränderten Maßstab wahr. Daher gehen beide Geschwindigkeiten unterschiedlich in die Berechnung ein:

$$f_E = f_S \cdot \frac{v - v_E}{v - v_S}.$$

Dieser Doppler-Effekt wurde von Ch. Doppler (1803 - 1853) an optischen Erscheinungen entdeckt. Das ist insofern paradox, da er dort infolge der Relativitätstheorie nur sehr bedingt gültig ist. Die obige Formel läßt sich für den Fall vereinfachen, daß $v_E \ll v$ und $v_S \ll v$ gilt. Mit $\Delta v = v_S - v_E$ gilt

$$f_E = f_S \cdot \left(1 + \frac{\Delta v}{v}\right).$$

Für Gase besteht ein Zusammenhang zwischen dem (statischen) Druck p, dem Volumen V und der Temperatur T. Hierfür gilt die Gleichung

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

wobei n die Molzahl und $R \approx 8{,}31\ \mathrm{JK^{-1}mol^{-1}}$ die Gaskonstante ist. Die Druckänderungen durch den Schall bewirken also lokale Temperaturänderungen. Beim Schall erfolgen nun die Änderungen aber so schnell, daß kein Wärmeausgleich erfolgen kann. Sie verlaufen daher nicht isotherm, sondern adiabatisch. Dann folgt

$$p \cdot V^{\chi} = const.,$$

wobei $\chi = c_p/c_V$ das Verhältnis der Wärmekapazitäten bei konstantem Druck (p) bzw. konstantem Volumen (V) ist. Für Luft gilt $\chi \approx 1{,}4$. Umgekehrt kann durch lokales Erwärmen | Abkühlen der Luft eine Druckänderung erreicht werden (s. S. 243).

9.3.2 Schallnutzung und -aufbereitung

Üblicherweise unterscheiden wir vier Klassen akustischer Signale:

- Die *menschliche Stimme* kann sich als Sprache, Gesang oder auch in Geräuschen artikulieren. Grundlagen hierzu sind bereits im Abschnitt 6.2 ab S. 75 behandelt.
- *Naturgeräusche* sind u. a. Tierstimmen (z. B. Bellen und Vogelgezwitscher), Donner, Wind, Regen, Meeres- und Waldesrauschen.
- Die *Musik* als künstliches Klanggebilde wird primär vom Menschen vorwiegend mit Musikinstrumenten erzeugt, wobei auch die menschliche Stimme ergänzend mitwirken kann. Musik erzeugt Genuß, wirkt unterhaltend und anregend, dient dem Tanz, der Untermalung (z. B. Film), wird zur Therapie eingesetzt, kann aber auch störend empfunden werden (Wilhelm Busch).
- *Zivilisationsschall* ist meist unerwünscht und wird dann als Lärm empfunden. Er kann sowohl technischen Ursprungs sein (z. B. Straßenlärm, Preßlufthämmer, Flugzeuge, Staubsauger) oder von Menschen verursacht werden, z. B. tobende Kinder oder „Festivitäten".

Eigenartigerweise wird seit geraumer Zeit der Zivilisationsschall immer häufiger auch zur „Kunst" umfunktioniert. Den Anfang hierzu machte wahrscheinlich Rolf Liebermann mit seiner „Symphonie

Les Echanges", deutsch meist als „Musik für Maschinen" benannt. Er schrieb dieses „Werk" als Beitrag zur Schweizerischen Landesausstellung von 1954. Auf einem extra dafür hergerichteten Podium wurden dazu 156 Ausstellungsgeräte, die per Lochstreifen zu steuern waren, angeordnet. Darunter befanden sich 16 Schreib-, 18 Rechen-, 8 Buchungsmaschinen, 12 Streifenlocher, 10 Registrierkassen, 8 Klebestreifenbefeuchter, 1 Streckenläutwerk der Schweizerischen Bundesbahn, Bahnübergangssignale und Autohupen. Damit die „richtige" Wirkung entstand, wurden alle Maßnahmen der Schalldämpfung von den Geräten entfernt. Wenn man den Raum betrat, dann erzeugten diese Geräte – vom Lochstreifen gesteuert – das Klangwerk. In ungewöhnlicher Weise waren so optisches und akustisches Geschehen verwoben. Trotz des gewaltigen Aufwands hat Liebermann kein lautes, schrilles, sondern eher ein dezentes, durchaus hörenswertes Stück geschaffen. Es ist 2 Minuten und 45 Sekunden lang, enthält 8 verschiedene Rhythmen und besitzt die klassische Form A (Introduzione, presto) – B (Allegro vivace) – A und B (Stretta) – C (Cadenza mit kurzem Finale). Verwirklicht wurde es in monatelanger Gemeinschaftsarbeit. Für die elektronische Steuerung zeichnete dabei Dr. Fritz von Ballmoos verantwortlich. Die Anordnung der Geräte oblag dem Ausstellungs-Architekten Rolf Gutmann. Hansjörg Pauli und der Tonmeister Haus Harder setzten Liebermanns Partitur für den steuernden Computer um. Kurz darauf entstand eine Jazzintepretation für ein präpariertes Klavier und zwei Schlagzeuge. Außerdem gibt es eine von Liebermann autorisierte Fassung, die H. Fink dem Original sehr nahe für ein Perkussionsensemble arrangiert hat.

Bereits in den 40er Jahren gab es „musique-concrete"-Komponisten wie Pierre Schaeffer und Pierre Henry. Sie montierten Geräusche | Klänge aus Schallplatten- und Tonband-Schnipseln. In den 60er Jahren verschmolz Stockhausen elektronische Klänge mit Elementen diverser Musikkulturen der Welt. Berio und B. A. Zimmermann kombinierten Zitate zwischen Gregorianik und Stockhausen. 1986 schilderte Charles Ives mit symphonischen Mitteln, wie Großstadtklänge und Musikfragmente von Straßensängern und Klavieren in die Stille des Central Parks einbrechen. Während man also bei dem Werk von Liebermann noch von einer „klassischen" Musikkomposition sprechen kann, haben sich schrittweise neue (elektronische) Techniken entwickelt, die sich immer mehr an Zivilisationsklängen orientieren. Dafür wurden u. a. Begriffe wie Sound Art, Klang-Installation, plastische Arbeit mit Klang, akustisches Environment, Soundscapes, Klanglandschaften oder hörbare Landschaften geprägt. Vor allem die Radiomacher (z. B. Wettbewerb Internationale Digitale Radiokunst) und die „Medienkünstler" bemühen sich um interessante „Realisierungen". Ihrer Meinung nach ist Schall, ebenso wie Wasser und Luft, ein Rohstoff, der in unserer Gesellschaft verbraucht, mißbraucht und vergeudet wird. Das heute breit angewandte Designing versucht sie auch auf den Schall anzuwenden. Der Lucas Film in Kalifornien hat sogar für seine Filme einen eigenen „Sound Designer" Randy Thom. Er entwarf u. a. für den Film „Forrest Gump" neue Klangwelten.

Während die genannten Wege eine vielleicht logisch zu nennende Fortsetzung von Musik (und Hörspiel) darstellen, gibt es auch bewußten „Mißbrauch". Als ein Musterbeispiel ist hier das Geschehen von Februar 1993 in Waco (Texas) um die Sekte „Stamm Davids" zu nennen. Der Führer der Sekte war der verkrachte und brutale Rocksänger David Koresh. Er verkündete den Untergang der Welt und scharrte um sich viele „Schäfchen" und Waffen im Wert von 200 000 Dollar. Wahrscheinlich stand Massenselbstmord bevor. Die amerikanische Behörde für Alkohol, Tabak und Feuerwaffen versuchte 51 Tage lang durch Verhandlungen und Belagerung eine Aufgabe des Camps zu erreichen. Dabei wurde auch Schall im Sinne einer psychologischen Kriegführung eingesetzt. Pausenlos wurde Mount Carmel u. a. mit Babygeschrei, Dröhnen von Zahnarztbohrern und Schmerzensschreien gequälter Hunde in gewaltiger Intensität beschallt. Die Einsatzleitung nannte das Sonic Assault, Schallangriff. Beim dann folgenden Erstürmen brach aus ungeklärtem Grund ein Feuer im Camp aus. In den Flammen kamen Koresh und über 70 Davidianer ums Leben. Das ganze wurde mit Originalton (O-Ton) im Hörstück „Cantata of Fire", deutsch „Krieg der Stimmen" vom australischen Sender ABC aufgearbeitet. Die Deutsche Fassung wurde 1996 vom WDR und anderen Stationen gesendet.

Genau das Gegenteil versucht der Frankfurter Künstler Achim Wollscheid zu erreichen. Er will auf Straßen und Plätzen oder auch in Parks Orte der absoluten Stille schaffen. Diese „geräuschlosen Passagen" würden uns deutlich machen – so hofft er –, daß wir immer von einer Art „Klang-Haut" umgeben sind.

Abstrahlung - Resonanz	Erregung: einzeln (Schlagen, Zupfen, Klopfen, Stampfen)	(quasi-) periodisch (Schütteln, Ratschen)	kontinuierlich (Streichen (Reibung) Luftstrom (Wirbel)
Saite	Klavier, Cembalo, Harfe, Gitarre, Laute, Zither, Hackbrett		Geige, Viola, Cello, Baß, Fidel, Drehleier
Zunge	Spieluhr		Akkordion, Mundharmonika
Membran	Becken, Gong, Trommel, Pauke	Klappern	Glasharfe
Festkörper (Stäbe)	Glocken, Lyra, Xylophon	Kastagnetten, Rasseln	Vibraphon
Luftraum	Röhrenglocken	Lochsirene	Blasinstrumente Orgel

Bild 9.22 Systematik von Musikinstrumenten

Bei der Mensch-Technik-Schnittstelle geht es nun darum, wie diese große Vielfalt von Schallen zu erzeugen und zu steuern ist. Dabei wird in diesem Buch das Speichern (analog und digital) und das Sampeln von Schall (Digitalisieren) weitgehend als gegeben vorausgesetzt. Jeder Schall, der einmal ablief und dabei gespeichert wurde, ist danach beliebig nutzbar. Die *technische Erzeugung* von Schall beginnt wohl mit der Erfindung von speziellen „Geräten". Ihre Varianten spiegeln sich noch heute in vielen Musikinstrumenten wider. Sie geben zugleich Hinweise für die Klassifikation der Schallerzeugung bei der Mensch-Technik-Schnittstelle. Eine hierfür geeignete Einteilung benutzt zwei unabhängige Kriterien. Einmal betrifft es die Schallerregung. Zum anderen ist es das Gebilde, welches die Abstrahlung bewirkt und meist eine deutliche Eigenresonanz besitzt. So entsteht die Matrix von **Bild 9.22**. Die Erregung kann 1. einmalig durch Schlagen, Zupfen usw., 2. wiederholt durch Schütteln, Ratschen usw. und 3. kontinuierlich durch gleichmäßiges Reiben (z. B. mit dem Geigenbogen) oder durch einen Luftstrom erfolgen. In diesen drei Varianten wird dem Instrument Energie zugeführt, die z. T. in Schall umgewandelt wird. Die historisch ältesten Varianten sind wohl Saiten und teilweise abgeschlossene, mit Luft gefüllte Hohlräume. Diese Resonanzen werden meist durch einen Abstrahlkörper (u. a. Geigenkörper und Klavierrahmen) verstärkt, d. h. der umgebenden Luft besser angepaßt. Bei der Trommel kommt das Resonanzfell hinzu. Trommelartige Instrumente verwenden also gleichermaßen die Luft- und Trommelfellresonanz (Membran). Deswegen sind sie im Bild 9.22 über die Zeilen hinausgehend eingetragen. Die weiteren, in Bild 9.22 eingetragenen Instrumente dürften in diesem Kontext unmittelbar verständlich sein. Es muß aber noch darauf hingewiesen werden, daß diese einfache Systematik in der Literatur nicht existiert. In [Hey] z. B. wird ganz formal versucht, die Anzahl der Konstruktionselemente zur Klassifikation heranzuziehen. In [MIC] und mehreren anderen Klassifikationen wird betont von der musikalischen Anwendung ausgegangen. Beide sind jedoch für die weiteren Betrachtungen wenig geeignet.

Für die technische, d. h. heute betont *elektronische* Schallerzeugung sind zwei Gebiete deutlich zu unterscheiden:

1. Die *menschliche Stimme*, insbesondere die Sprache soll nachgebildet werden oder
2. es sind beliebige *andere*, insbesondere musikalische *Schalle* zu erzeugen.

Für die menschliche Stimme sind heute drei Verfahren in Gebrauch (vgl. S. 75ff):

- Es werden *Formanten* gemäß der Beschreibung im Bild 6.5 Bild, S. 77 sowie alle *Phoneme* (S. 77-78) durch spezielle Algorithmen *erzeugt*.
- Es werden die Klangbilder als *digitale Samples* von „natürlicher" Sprache gespeichert.
- Es wird der *Sprachtrakt* gemäß Bild 6.3 mit Filtern und Stimmband-„Schwingern" nachgebildet.

Mit allen Methoden läßt sich heute eine gut verständliche synthetische Sprache erzeugen. Ein Problem dabei ist jedoch der Übergang von der Schreibweise (ASCII-Text) zur Aussprache. Hierzu müssen zusätzliche Regeln eingesetzt werden, welche u. a. die Nationalsprache und Ausnahmen erfassen. Das zweite Problem ist der Sprachklang innerhalb eines Satzes und die unterschiedliche Betonung von Sachverhalten mit gleicher Syntax. Trotz aller Fortschritte bleibt gerade wegen dieser Schwächen (bisher) alle synthetische Sprache computerhaft kalt.

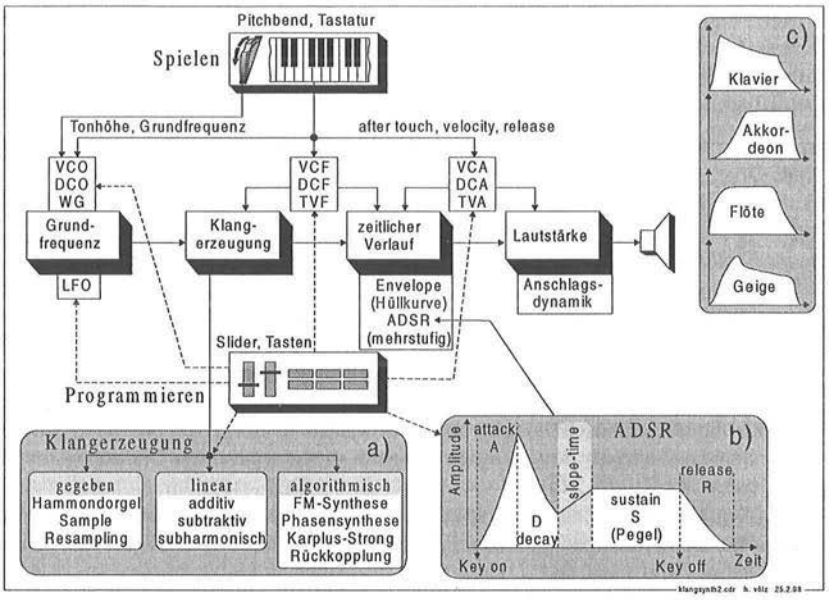


Bild 9.23 Grundlagen zur elektronischen Klangerzeugung

Bild 9.22 läßt sich sinngemäß auf die elektronische Synthese aller möglichen, aber insbesondere musikalischen Klänge übertragen. Dann entsteht das allgemeine Schema von **Bild 9.23**. Zur Vereinfachung zeigt es nur eine Stimme (Grundfrequenz). In der Praxis werden jedoch meist mehrere solche Stimmen parallel benutzt. Aus der *Grundfrequenz* werden durch die *Klangerzeugung* zusätzlich Obertöne erzeugt bzw. ausgefiltert. Dadurch kann u. a. auch das Spektrum der „natürlichen" Musikinstrumente nachgebildet werden (s. S. 168, Bild 8.12b). Schalle beginnen und enden. Dazwischen besitzen sie einen typischen *zeitlichen Verlauf*. Schließlich kann ihre *Lautstärke* verändert werden. Die technische Realisierung dieser vier Basiseinheiten kann recht unterschiedlich sein. Sie wird hier am Beispiel der typischen Synthesizer behandelt (vgl. S. 150, Bild 8.1a und d). Von der Funktion her sind dann die Bereiche „Spielen" und „Programmieren" zu unterscheiden. Das Spielen betrifft die Betätigung der Tastatur und des Pitchbend. So wird die Grundfrequenz (Wahl der Taste und Stellung des Pitchrades) und der zeitliche Verlauf (Länge und Intensität des Tastendruckes ≅ after touch, velocity, release) beeinflußt. Das sind etwa jene Möglichkeiten, die z. B. auch beim Klavierspielen gegeben sind. Das „Programmieren" bewirkt dagegen Parametereinstellungen für den Klang. Hierzu dienen u. a. Slider (Regler) und Tasten. Sie bewirken ähnliches – jedoch erheblich vielfältiger – wie Registrierungen beim Cembalo und bei der Orgel sowie stark vereinfacht die Pedale beim Klavier. Auf einem Synthesizer können nämlich u. a. die typischen Klänge verschiedener Instrumente nachgebildet werden. Neben dem zuvor genannten Spektrum besitzt nämlich jedes Instrument auch typische Ein- und Ausschwingvorgänge. Beispiele zeigt Bild 9.23c. Hierzu wird meist die als ADSR bezeichnete Hüllkurve des Amplitudenverlaufs benutzt (Bild 9.23b). Mit dem Betätigen einer Taste beginnt der Einschwingvorgang (**A***ttack*). **D***ecay* ist der Übergang zum konstanten Teil. Er wird durch Eigenschaften des noch zu besprechenden Regelverstärkers und durch die Anschlagdynamik bestimmt. **S***ustain* legt den konstanten Verweilpegel beim Halten der Taste fest. **R***elease* beginnt mit dem Loslassen der Taste und entspricht dem Ausschwingvorgang. Bei leistungsfähigeren Synthesizern kann die Hüllkurve noch komplexer gestaltet werden. Als einfaches Beispiel ist deshalb grau unterlegt die slope-time in Bild 9.23b eingefügt.

Die relativ freie Parametereinstellung der ADSR-Kurve ermöglicht vielfältige Klänge, und zwar auch solche, die sich deutlich von jenen der klassischen Musikinstrumente unterscheiden. Dennoch wird das Klangbild erheblich stärker durch die verschiedenen Methoden bei der *Klangerzeugung* bestimmt. Einen groben Überblick dazu enthalten Bild 9.23a und die folgende Beschreibung:

1. Es sind die einzelnen Klangbilder (vorwiegend) als Kurvenform *gegeben* | gespeichert. Bei der Hammond-Orgel (1934) waren es zunächst Lichtton und später die magnetische Aufzeichnung. Heute sind es digitale Samples vorhandener Klänge, die z. B. als Wavetable erzeugt bzw. gekauft und eingebaut | geladen werden können.
2. Die *lineare Synthese* benutzt einen geradlinigen, also ohne Rückkopplung verlaufenden, Informationsfluß. Hierzu gehören folgende Untergruppen:
   2a. Die *additive Synthese* summiert die Spannung mehrerer Oszillatoren verschiedener, teilweise auch synchronisierter Frequenzen (**Bild 9.24**a, nächste Seite).
   2b. Die *subtraktive Synthese* beginnt mit einer oberwellenreichen Schwingung. Typisch ist z. B. die Rechteckschwingung. Sie enthält gemäß Bild 9.24i fast alle Obertöne. Ähnliches gilt auch für die Sägezahnschwingung und in gewissem Umfang für breitbandiges Rauschen. Filter trennen dann aus dem Frequenzgemisch die gewünschten Obertöne mit passenden Amplituden aus (Bild 9.24b).
   2c. Beim *Trautonium* werden durch spezielle Schaltungen zu dem Grundton synchronisierte Subharmonische hinzugefügt. Dadurch entstehen sonst nicht erreichbare, aber sehr typische neue Klänge (Bild 9.24c und S. 152).
3. Recht komplex, aber effektiv sind algorithmische Methoden vor allem mit der FM- (Frequenzmodulation) und PD-Synthese (phase distortion. Bei Casio-Synthesizern wird die Phase statt der Frequenz gesteuert, was aber keinen wesentlichen Unterschied bedeutet.).

Formal sind diese Verfahren im Bild 9.23 zusammengefaßt. In der Hardware (oberer Bildteil ≈ Spielen) werden spezielle Baugruppen verwendet. Sie sind durch Abkürzungen aus meist drei Buchstaben gekennzeichnet. Dabei bedeuten A: amplifier, Verstärker; C: controlled, gesteuert; D: digital; F: Filter; G: Generator, Oszillator; L: low, niedrig; O: Oszillator; V: voltage (durch Spannung gesteuert); W: waveform, Kurvenform. Bei den ursprünglich analogen Synthesizern (Moog-Synthesizer) wurden die Baugruppen durch Spannung gesteuert (V). Wird die Frequenz eines Oszillators verändert, so liegt ein VCO (voltage controlled oscillator) vor. Beim VCA (amplifier) wird der Verstärkungsgrad der Baugruppe beeinflußt. Der VCF ist ein steuerbares Filter. Meist wird jedoch nur eine Grenzfrequenz verschoben. Für die heute üblichen digitalen Synthesizer sind digitale Baugruppen DCO, DCA und DCF (digital) gebräuchlich. Die Firma Roland verwendet abweichende Begriffe: der WG (wave generator) entspricht dem frequenzgesteuerten Oszillator. TVA und TVF sind digital steuerbare (time variabel) Verstärker bzw. Filter. Neben den drei Baugruppen O, A und F besitzen alle Synthesizer noch den LFO (low frequency oscillator). Er variiert relativ langsam und periodisch die schon erzeugten Klänge in der Amplitude und | oder in der Frequenz. So entstehen Vibrato, Tremolo, Wah-wah und weitere Klangeffekte. In einigen Fällen wird den Klängen auch Rauschen hinzugefügt oder gar von Rauschen ausgegangen. Die Karlplus-Strong-Synthese geht z. B. von Rauschen und Rückkopplungen aus und hebt dabei bestimmte Frequenzbereiche hervor. Sie hat Vorteile bei der Simulation von Zupfinstrumenten. Die Klangsynthese mittels Frequenzmodulation wurde 1973 von John Chowing entwickelt und dann 1983 mit dem Synthesizer DX7 von Yamaha eingeführt. Er erlebt z. Z. wegen seines typischen, besonders brillanten und manchmal etwas metallisch harten Klanges eine Renaissance. Der carrier (Trägerfrequenz) wird mit einer zweiten Frequenz so moduliert, daß sie (quasistatisch betrachtet) um den Frequenzhub schwankt (Details folgen weiter unten). Zusätzlich kann dieses Spektrum mit einem steuerbaren Verstärker (VCA oder DCA) amplitudenmoduliert werden. Eine derartige Schaltung heißt dann Operator (Bild 9.24f). Der DX7 besitzt sechs Operatoren. Sie können unterschiedlich verbunden werden. Der erste Operator kann z. B. als Modulator auf den zweiten Operator einwirken (Bild 9.24g). Beim DX7 sind 19 verschiedene Zusammenschaltungen der 6 Operatoren vorgegeben. Sie sind numeriert und heißen auch Algorithmen. Die Algorithmen „1" und „19" zeigt Bild 9.24h. Mittlerweile ist die Synthesizer-Elektronik mit weitaus mehr Operatoren in OPL-*x*-Chips

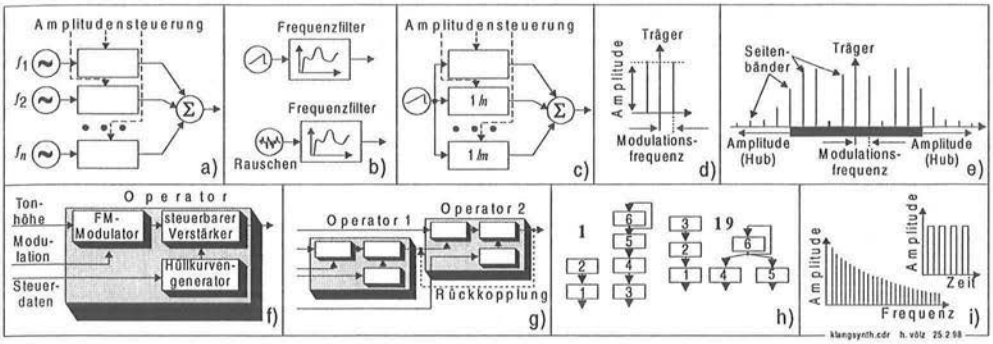


Bild 9.24 Verschiedene Klangsynthesen

verschiedener Entwicklungsstufen vereinigt. Sie werden bei vielen Sound-Karten verwendet. Heute kommen immer mehr Soundsamples zum Einsatz. Beim alten analogen Synthesizer waren es von einer Tonbandkassette einlesbare, typische Klangbibliotheken, die dann als Stimme verwendet wurden. Heute sind es vorwiegend von „echten" Instrumenten abgeleitete, analog aufgenommene und dann digitalisierte Dateien. Sie können daher auch leicht in andere Frequenzbereiche transponiert werden. Bei Höhertransponierung entsteht u. a. der Micky-Mouse-Effekt. Aus solchen Sampels werden ganze Sound-Bibliotheken als Wavetables zusammengestellt und kommerziell vertrieben. Z. B. kann man mit nur zwei Samples je Oktave, die von einem Markenflügel gewonnen wurden, jedes Klavierstück fast originalgetreu synthetisieren. Anhaltende Töne werden mit einer Loop-Funktion des Samplers ständig wiederholt. Eigentlich gilt für Wavetables das Copyright, jedoch ist oft der Urheber schwer eindeutig nachweisbar.

Alle (analogen) Modulationen gehen von einer Trägerschwingung

$$u_t(t) = u_{T0} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$$

mit der Trägerfrequenz ω_0 und der Amplitude u_{T0} aus. Sie werden mit einer Signalfrequenz ω_m der Amplitude u_m beeinflußt:

$$u_m(t) = u_0 \cdot \sin(\omega_m \cdot t).$$

Bei der Amplitudenmodulation (AM) wird die Amplitude U_{T0} beeinflußt. Es folgt daher

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) &= u_{T0} \cdot (1+m) \cdot \sin(\omega_m \cdot t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \\ &= u_{T0} \cdot \left[\sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{m}{2} \cdot \sin((\omega_0 + \omega_m) \cdot t) + \frac{m}{2} \cdot \sin((\omega_0 - \omega_m) \cdot t) \right]. \end{aligned}$$

Es entstehen also zwei Seitenbänder (Bild 9.24d). Bei der Frequenzmodulation (FM) wird dagegen die Trägerfrequenz verändert. Die Amplitude u_0 bewirkt einen Frequenzhub $\Delta\omega$ gemäß

$$u_{FM} = u_{T0} \cdot \sin((\omega_0 + \Delta\omega \cdot \sin(\omega_m \cdot t + \varphi_m)) \cdot t).$$

Das zugehörige Spektrum ist jedoch sehr viel breiter und komplizierter als man anschaulich gemäß $2 \cdot \Delta\omega$ erwarten würde. Die Fourieranalyse von zwei ineinander verschachtelten harmonischen Schwingungen führt nämlich zu einer unendlichen Summe von Besselfunktionen $J_n(x)$

$$\sin(x \cdot \sin(\psi)) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(x) \cdot \sin(n \cdot \psi).$$

Für weitere Zusammenhänge muß hier auf die Spezialliteratur der Nachrichtentechnik verwiesen werden. Ein typisches Beispiel zeigt Bild 9.24e. Die einzelnen Spektrallinien besitzen also den Abstand der Modulationsfrequenz ω_m. Die Intensität bestimmt den Hub $\Delta\omega$. Die Spektrallinien (Seitenbänder) reichen jedoch (weit) darüber hinaus. Dies macht die FM-Synthese einerseits sehr effektiver, andererseits aber schwer verständlich.

9.3.3 Arten der Schallausgabe

Die Signale des erzeugten Schalls müssen schließlich den Menschen erreichen. Dies kann erfolgen

- mittels Luftschall durch Lautsprecher oder Kopfhörer,
- mittels Knochenleitung, indem Schallschwingungen direkt das Felsenbein (z. B: hinter dem Ohr) bzw. die Zähne erregen (Test in der Audiometrie), oder
- durch elektrisch erregte Elektroden im Innenohr, Nucleus cochlearis bzw. Hörzentrum.

Die letzte Methode ist für stark Hörgeschädigte von Bedeutung und wird mit immer mehr Erfolg angewandt. Bereits heute tragen etwa 17 000 Menschen eine *Innenohr-Prothese*. Technisch führend ist für diese Technik Australien. Eine leistungsfähige Entwicklung gibt es auch im Frauenhofer-Institut in Dresden (Compter Ztg. 15. Juni 95). Meist wird ein Implantat unter die Haut in der Nähe des Ohres eingepflanzt. Seine Sonden gehen in das jeweils noch intakte Gebiet. Extern werden die Schallsignale meist individuell für jeden Patienten aufbereitet. Mit einer Spule werden sie dann drahtlos zum Implantat übertragen. Die Knochenleitung wird bei hohem Umgebungslärm oder bei Patienten mit geschädigtem Mittelohr bzw. zerstörtem Trommelfell eingesetzt. Die in den nächsten Abschnitten behandelten Schallsender sind dann so zu verändern, daß eine möglichst verlustfreie Ankopplung erfolgt. Hierfür sind harte, flächige Membranen vorteilhaft. Sie werden fest auf die Haut gepreßt und erregen den darunter befindlichen Knochen. Diese beiden Beschreibungen zeigen, daß in den weiteren Betrachtungen nur noch der Weg über den Luftschall zu behandeln ist. Dabei sind aber wiederum Unterscheidungen wichtig:

- Der *Lautsprecher* dürfte am häufigsten Verwendung finden. Bei ihm muß noch genauer zwischen der eigentlichen Erzeugung der Schallschwingungen und ihrer bestmöglichen Übertragung in den Hörraum unterschieden werden. Weiter kann unter Lautsprecher 1. das Bauteil, was meist als *Chassis* bezeichnet wird, und 2. ein „Gehäuse", in dem ein oder mehrere Chassis eingebaut sind, verstanden werden. In nicht eindeutigen Zusammenhängen wird hier im letzten Fall der Begriff *Lautsprechersystem* benutzt.
- Der *Kopfhörer* ist ein kleiner Schallwandler, quasi Miniaturlautsprecher, der direkt an das Ohr herangehalten (z. B. beim Telephon) oder aber mit einem Bügel am Kopf befestigt wird. Bei den Hörern mit Bügel wird meist getrennt für jedes Ohr eine Kapsel verwendet. So ist auch Stereohören möglich. Weiter gibt es bereits spezielle Surroundhörer. Zu den Kopfhörern gehören auch die Sprechgarnituren, die zusätzlich ein Mikrophon in die Nähe des Mundes bringen. Sie sind besonders bei der Spracheingabe vorteilhaft/notwendig.
- Der *Inohr-Hörer* (Ohrhörer) ist im Gegensatz zum Kopfhörer ein kleines Gebilde, das seinen Schall unmittelbar in den Gehörgang abgibt und auch meist im Anfang des Gehörganges befestigt wird.
- Spezielle *Hörprothesen* für Schwerhörige gibt es in mehreren Varianten. Fast durchweg verwenden sie einen speziellen Inohr-Hörer als Schallsender, der durch einen höheren Wirkungsgrad, besondere Kleinheit und engeren Frequenzbereich (oft nur 300 Hz bis 3 kHz) gekennzeichnet ist. Hinter-das-Ohr-Geräte (HdO) besitzen den Schallsender im Gerät hinter dem Ohr und koppeln ihn über einen Schlauch in den Gehörgang. Ähnlich wirken Hörbrillen. Bei ihnen sind die Elektronik und der Schallsender in das Brillengestell eingearbeitet. Innenohrgeräte (IdO) sind so klein, daß sie fast vollständig im Gehörgang verschwinden.

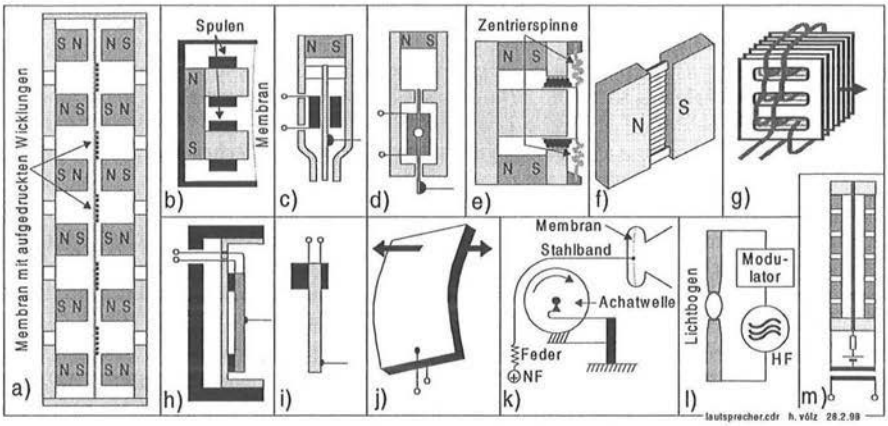


Bild 9.25 Methoden zur Schallerzeugung

- Die *PA-Komponenten* (**p**ublic **a**ddress) sind Lautsprechersysteme, die für Übertragungen bei Massenveranstaltungen im Freien (open air) oder in großen Sälen und auch zum Betrieb unter rauhen Bedingungen ausgelegt sind.
- Schließlich müssen oft *Schallfelder* erzeugt werden, die dem Hörer eine Orientierung im Raum ermöglichen bzw. bewegte Schallquellen vermitteln können. Hierzu werden mehrere Lautsprechersysteme mit spezieller Anordnung im Raum bzw. komplexe Kopfhörer und zugehörige, speziell aufbereitete Signale benötigt.

9.3.4 Erzeugung der Schwingungen

Zur Schallerzeugung können einmal all jene Mikrophontypen von Bild 8.10 auf Seite 165 eingesetzt werden, die dort als passive Wandler bezeichnet sind. Für die Anwendung als Schallsender sind aber andere Dimensionierungen erforderlich. Bezüglich der Ankopplung an die Luft können allgemein folgende Varianten unterschieden werden:

- Eine direkt angeregte *Membran* oder Fläche kann auch gleich zur Schallabstrahlung genutzt werden. Dies betrifft z. B. die Methoden von **Bild 9.25**a, b, f, g, j und m. Natürlich können noch Methoden zur Verbesserung des Wirkungsgrades (s. u.) zusätzlich genutzt werden.
- Bei vielen anderen gibt es einen *Punkt der stärksten Bewegung* (vgl. Bild 9.25c, d, h, i und k). Hier ist dann eine schallabstrahlende Membran anzukoppeln. Ähnlich gilt dies auch für den Antrieb mit einem Motor, der allerdings ähnlich einer Drehspule (vgl. Bild 7.9c auf Seite 114) nur hin und her „wackelt". Er wird nur bei speziellen Tieftönern angewendet.
- Eine Besonderheit stellt die *Schwingspule* (Bild 9.25e) dar. Hier erfolgt primär die Bewegung eines Kreisrandes. Das erfordert eine spezielle Anpassung der Membran, auf die noch unten genauer eingegangen wird.
- Schließlich sei noch auf den *Ionenlautsprecher* verwiesen, der primär überhaupt keine Bewegung erzeugt (Bild 9.25l). Ein Hochfrequenzgenerator HF erzeugt einen Lichtbogen. Dadurch erwärmt sich die Luft in seiner unmittelbaren Umgebung und dehnt sich gemäß der Beschreibung auf Seite 236 aus. Wird nun die Amplitude der HF-Schwingung mit dem Schallsignal moduliert, so ändert sich die Temperatur des Lichtbogens und damit auch die Ausdehnung der Luft. Dieses masselose und damit resonanzfreie Prinzip ist eigentlich ein idealer Lautsprecher, da es keinen Frequenzgang besitzt. Leider ist der Wirkungsgrad sehr schlecht, die erzielbare Lautstärke gering und der Aufwand sehr hoch. Dennoch wird es zuweilen vorteilhaft bei hohen Frequenzen benutzt.

Aus Sicht der *physikalischen Effekte* gibt es für die Schallerzeugung folgende Prinzipien:

- *Anziehung* bzw. *Abstoßung* eines *weichmagnetischen Materials (elektromagnetisch)*, z. B. Membran oder Zunge (vgl. S. 113f., Bild 7.9a). Bild 9.25b zeigt das Beispiel des klassischen „Telephon"-Hörers. Die bewegte elastische Zunge gemäß Bild 9.25c wird als Freischwinger bezeichnet. Dreht sich dagegen eine starre Zunge um einen Drehpunkt zwischen vier Magnetpolen (Bild 9.25d), so liegt ein Drehschwinger vor.
- Das *induktive Prinzip* wird auch *magneto-* bzw. *elektrodynamisch* genannt. Es kann u. a. von der Tauchspule (9.25e und h), vom Bändchen (Bild 9.25h) oder vom isodynamischen Antrieb (auch orthophon genannt) Gebrauch gemacht werden (Bild 9.25a). Diese Fälle werden unten noch genauer beschrieben. Grundlagen sind schon auf S. 113ff. und insbesondere im Zusammenhang mit dem dortigen Bild 7.9 behandelt (vgl. auch S. 166f., Bild 8.11).
- Das *magnetostriktive Verfahren* (Bild 9.25g) wurde schon auf S. 116 im Zusammenhang mit dem dortigen Bild 7.10m behandelt. Es hat nur für Ultraschall Bedeutung erlangt.
- Zwei *piezoelektrische Antriebe* (vgl. S. 115f., Bild 7.10) zeigen Bild 9.25h und i. Im Fall (h) ist der piezo*keramische* Schwinger an mehreren Punkten befestigt und kann daher nur in der Mitte schwingen. Im zweiten Fall (i) liegt ein Biegeschwinger mit einseitiger Einspannung vor. Für diese Lautsprecher gibt es keine Leistungsangabe, sondern nur Grenzspannungen, z. B. max. 26 V_{eff}. Sie werden nur als Hochtöner benutzt. Zu den piezoelektrischen Materialien zählen auch einige *hochpolymere Folien* (vgl. S. 116; HP-Filme, PFDF-Folie). Sie ermöglichen direkt schwingende Flächen gemäß Bild 9.25j. Lautsprecher dieses Typs sind aber kaum verfügbar.
- Das *kapazitive Prinzip* zeigt Bild 9.25m. Grundlagen dazu wurden auf S. 114ff. und dem Bild 7.9e behandelt. Es verlangt Spannungen bis zu 5 kV. Für die vorteilhafte, sehr geringe Masse der Membran sind jedoch nur kleine Amplituden zu erreichen. Außerdem kann es in feuchter Umgebung zu elektrischen Überschlägen kommen. Ein großer Vorteil ist der vollständig flächige Antrieb der Membran. Dadurch entstehen praktisch keine störenden Teilschwingungen der Membran. Daher wurde mehrfach versucht, allerdings bisher erfolglos, es auch breitbandig zu nutzen. Heute besitzt es nur für Hochtöner Bedeutung. Für nicht zu große Leistungen werden auch Elektrete (vgl. S. 167) eingesetzt. Dann können die zusätzliche Gleichspannung und der Gegentaktbetrieb von Bild 9.25m entfallen.
- Das *elektrostatische Haftreibung*sprinzip von Bild 9.25k wurde relativ erfolgreich in der Anfangszeit des Rundfunks genutzt. Es beruht auf den Johnson-Rahbeck-Effekt [VÖLB] S. 52f. Mit der Spannung zwischen der sich drehenden Achatwalze und dem Stahlband ändert sich der Reibungskoeffizient. Dadurch wird das Band gegenüber der Federkraft bewegt.
- Das *adiabatische Ionenprinzip* von Bild 9.25l wurde bereits als Ionenlautsprecher auf der vorigen Seite besprochen.

9.3.5 Elektrodynamische Lautsprecher

Der elektrodynamische Lautsprecher wurde schon 1898 von dem Engländer Oliver Lodge erfunden. Doch sein Aufbau erschien zunächst so kompliziert und sein Wirkungsgrad so gering, daß er sich erst in den späten 30er Jahren durchsetzte. Dabei war es auch wichtig, daß Hochleistungsmagnete entstanden. Eine Zeitlang hielt sich zunächst noch der fremderregte Magnetkreis mit hohem Energieverbrauch. Den heute üblichen Aufbau des elektrodynamischen Lautsprechers zeigt **Bild 9.26**a. Ein *Ringmagnet*, der meist aus Ferrit besteht, erzeugt über Weicheisenjoche einen engen zylindrischen Spalt mit möglichst hoher Feldstärke. Nur für besonders leistungsfähige Typen (höhere Feldstärke) werden die wesentlich teureren AlNiCo-Magnete verwendet.

Im Spalt ist die bewegliche, ein- oder zweilagige *Schwingspule* gelagert. Sie soll sowohl einen möglichst geringen elektrischen Widerstand als auch eine kleine Masse besitzen. Allgemein wird runder Kupferdraht verwendet. Einen kleineren Widerstand und eine bessere Ausnutzung der Spaltfeldstärke ermöglicht der rechteckförmige und teure Kupferdraht. Für einen typischen Tieftonlautsprecher mit 30 cm Konusdurchmesser enthält die Schwingspule ca. 10 m Draht. Bei der Bewegung der Schwingspule wirkt sie auch als Generator und erzeugt Strom. Er wird bei Kurzschluß besonders

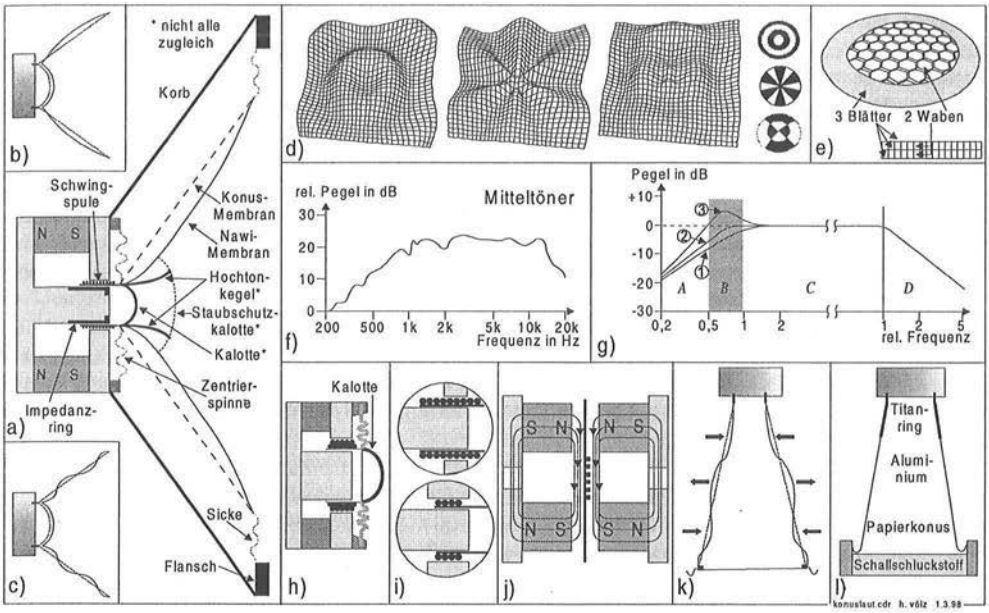


Bild 9.26 Der elektrodynamische Lautsprecher und seine Details

groß. So können Eigenschwingungen des Systems gedämpft werden. Deshalb werden ein kleiner Innenwiderstand des Verstärkers und „dicke" Lautsprecherleitungen gefordert. Die richtige Lage der Schwingspule im Spalt wird durch die elastische Zentrierspinne erzwungen. Die Auslenkung der Schwingspule ist solange dem eingespeisten Strom proportional, wie sich die „ganze" Schwingspule im konstanten Spaltfeld befindet. Für den Membranhub gilt dann

$$h \approx \frac{N}{25 \cdot A \cdot f},$$

wobei A die Membranfläche, f die Frequenz und N die Leistung bedeuten. Für einen schon großen Lautsprecher mit 40 cm Membrandurchmesser erfordern bereits nur 0,1 W und bei 30 Hz eine Schwingamplitude um 2 mm. Wenn dann die Schwingspule etwa genauso lang wie der Luftspalt ist, müssen ihn zeitweilig einige Windungen verlassen. Das führt zu deutlichen Nichtlinearitäten. Daher wird die Schwingspule deutlich länger oder kürzer als der Luftspalt gewählt (Bild 9.26i). In beiden Fällen bleiben dann auch bei größeren Hüben gleichviele Windungen im Luftspalt. Doch beide Varianten gehen auf Kosten des Wirkungsgrades. Bei der kurzen Spule wird das Magnetfeld, bei der langen der Spulenstrom unvollständig genutzt.

Von der Schwingspule wird die *Membran* angetrieben. Sie soll leicht und steif sein. Daher kommen heute langfasriges Papier, Kunststoff (Polypropylen, Kevlar) und Hartschaum (Polysterol) sowie Titan- oder Aluminiumlegierungen (z. T. in Wabenstruktur, s. u.) zur Anwendung. Ursprünglich hatte die Membran die Form eines Kegelausschnittes (Konusmembran). Ein großer Winkel macht dabei die Membran leicht aber wenig steif, ein kleiner Winkel bewirkt dagegen eine höhere Masse. Beides bringt Probleme. Außerdem treten bei der Kolbenmembran bei mehreren Frequenzen leicht stark störende Teilschwingungen auf (Bild 9.26b und c). Deshalb hat Polypropylen, obwohl es schwerer als Papier ist, durch seine größere innere Dämpfung häufig Vorteile. Ein anderer Weg besteht darin, die Papiermembran mit geeignetem Kunststoff zu beschichten. In jedem Fall bringt aber eine Nawi-Membran (**n**icht **a**b**w**ickelbar) zusätzlich erheblichen Schutz gegenüber Eigenschwingungen. Dies

wird dann noch dadurch verstärkt, daß die Membran bei der Schwingspule relativ dick (steif) beginnt und sich zum Außenrand hin verdünnt. So schwingt sie bei tiefen Frequenzen vollständig homogen, bei hohen Frequenzen dagegen nur in der Nähe der Schwingspule. Für den Übergang der Schallschwingungen zur Luft wäre eigentlich eine vollkommen plane Flachmembran ideal. Sie erzeugt nämlich eine ebene Schallfront. Außerdem besitzt ein Flachlautsprecher eine geringe Einbautiefe. Deshalb wurde er mehrfach produziert. Zur Erhöhung der Steife wird dann eine komplizierte Wabenstruktur nach dem Sandwich-Prinzip gemäß Bild 9.26e verwendet. Bei etwa punktförmigem Antrieb können jedoch immer vielfältige Teilschwingungen auftreten. Bild 9.26d zeigt hierfür drei Beispiele als Höhenbilder. Zur besseren Erkennbarkeit sind die Schwingungen zusätzlich noch einmal stark vereinfacht ganz rechts gezeigt. Eine brauchbare Unterdrückung ergibt sich mit mehreren phasengleichen Antrieben oder einer Schwingspule mit großem Durchmesser.

Eine andere Membran ist die *Kalotte*, zuweilen auch Dom oder Hochtonkegel genannt (Bild 9.26a und h). Infolge ihrer kleinen Fläche ist sie jedoch nur für mittlere und hohen Frequenzen (Hubgrenze) geeignet. Sie bleibt dafür aber in diesem Bereich weitgehend starr. Bei größeren Hüben besteht bei ihr die Gefahr einer Taumelbewegung, die dann zur Berührung im Spalt und damit zur Zerstörung des Systems führen kann.

Bei den üblichen Membranen wird das Taumeln der Schwingspule durch die zweite „Führung" mittels der *Sicke* am Rand verhindert. Sie besteht aus Gummi, Schaumstoff, beschichtetem Gewebe oder, bei der sogenannten harten Aufhängung, aus dem Membranmaterial. Wenn keine Kalotte für hohe Frequenzen genutzt wird, existiert eine weiter vorn liegende *Staubschutzkalotte*. Sie hat oft auch eine thermische Funktion. Durch sie wird dann die bei großen Leistungen entstehende heiße Luft aus den dafür vorgesehenen Öffnungen herausgepreßt. In einigen Fällen wird zusätzlich zur Hochtonkalotte auch noch ein besonders steifer *Hochtonkegel* angebracht. Insbesondere bei den PA-Lautsprechern wird der gesamte Spalt mit einem *Ferrofluid* ausgefüllt. Es verbessert die Wärmeableitung. Seine magnetische Komponente vergrößert außerdem die Spaltfeldstärke. Das ganze Lautsprecherchassis wird durch einen stabilen *Korb* gehalten. Sein *Flansch* trägt die Sicke (vgl. Bild 9.26a).

Die wesentlichen Forderungen an akustische Sender, also auch an Lautsprecher lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Der *Frequenzbereich* von ca. 20 Hz bis 20 kHz soll gleichmäßig abgestrahlt werden.
- Zwischen dem elektrischen Strom und dem erzeugten Schalldruck soll ein *linearer Zusammenhang* bestehen. Anderenfalls treten störende Verzerrungen auf (wurde oben behandelt).
- Der *Wirkungsgrad* für die Umsetzung von elektrischer Energie in Schall soll hoch sein (s. u.).

Noch immer ist der Lautsprecher das deutlich schwächste Glied der elektroakustischen Technik (Ela). Bezüglich des Frequenzbereichs stellt ein einzelner Breitbandlautsprecher einen oft brauchbaren Kompromiß im Vergleich zum Aufwand dar. Vorteilhafter ist es jedoch, den Frequenzbereich auf zwei oder drei unterschiedliche Lautsprecherchassis aufzuteilen (vgl. auch Abschnitt 9.3.7, ab S. 252). Es werden dann unterschieden:

- Hochtonlautsprecher (Hochtöner oder Tweeter) für etwa 3 bis 22 kHz,
- Mitteltonlautsprecher (Mitteltöner oder Squawker) für ca. 300 bis 5000 Hz und
- Tieftonlautsprecher (Tieftöner, Woofer, z. T. auch Subwoofer genannt) für ca. 20 bis 600 Hz.

Von *Satelliten* wird dann gesprochen, wenn sich ein hochtonähnliches Chassis in einem getrennten kleinen Gehäuse befindet und der Frequenzbereich bis zu etwa 300 Hz herab reicht. Sie werden dann durch einen getrennt aufgestellten Subwoofer ergänzt. Er strahlt nur jenen Schall ab, den wir nicht direkt lokalisieren können. Für extrem tiefe Frequenzen wird der *Motorbaß*-Lautsprecher benutzt (s. S. 243). Er erreicht bei 20 bis 80 Hz einen sehr hohen Wirkungsgrad und daher Leistungen bis zu 400 W. Im Vergleich zu anderen Tieftönern ist er zudem wesentlich leichter. Theoretisch sind Frequenzen bis zu 250 Hz zu erreichen.

Den typischen *Übertragungsbereich* jedes Konuslautsprechers zeigt Bild 9.26g. Das untere Frequenzende (B) wird durch die typische Resonanzfrequenz bestimmt. Hier wirken die Massen von Schwingspule, Membran, Kalotte usw. mit den Elastizitäten (Rückstellkräfte) von Zentrierspinne und

Sicke zusammen. Diese Resonanz kann sowohl gedämpft werden ①, als auch deutlich ausgeprägt auftreten ③. Besonders für Tieftöner haben beide Varianten Vor- und Nachteile. Große Dämpfung macht die Baßwiedergabe prägnant. Dafür fällt aber der Frequenzgang früher ab. Bei kleiner Dämpfung werden dagegen die Bässe stärker abgestrahlt. Die Baßwiedergabe ist jedoch nicht sauber. Die Baßimpulse erzeugen lange Einschwingzeiten. Für viele Lautsprecher ist die gut geglättete Kurve ② ein guter Kompromiß. Unterhalb der Resonanzfrequenz (*A*) fällt der Frequenzgang mit ca. 12 dB/Oktave ab. Die Bewegungsamplitude der Membran ist hier zu klein, um einen hinreichenden Schalldruck zu erzeugen. Im linearen Bereich (*C*) heben sich zwei Frequenzgänge genau auf. Die Impedanz der Schwingspule nimmt proportional mit der Frequenz zu. Für einen konstanten Strom durch die Schwingspule wäre dann eine steigende Spannung erforderlich. Gleichzeitig wächst aber auch der Strahlungswiderstand. Er entspricht der Schallenergie, die von der Membran abgestrahlt wird. Seine Größe erhält er durch Umrechnung auf die elektrische Seite der Schwingspule. Ab einer bestimmten Frequenz steigt jedoch der Strahlungswiderstand nicht mehr gleichmäßig an. Die Membran folgt nicht mehr der Erregung. Dann endet der Übertragungsbereich (*D*). Für 30-cm-Tieftöner beginnt dies spätestens ab 1000 Hz. Diese Grenze kann durch einen *Impedanzkontrollring* etwas hinausgeschoben werden (vgl. Bild 9.26a). Er erzeugt zwar keinen zusätzlichen Schall, sondern bewirkt Wirbelströme, welche die Induktivität der Schwingspule verringern und dabei die elektrische Leistung in Wärme umsetzen. Eine reale Frequenzkurve zeigt immer zusätzliche viele kleine Unebenheiten, die u.a. durch Teilschwingungen der Membran entstehen. Ein Beispiel für einen Mitteltöner zeigt Bild 9.26f.

Die störenden Teilschwingungen einer Membran können auch vorteilhaft genutzt werden. Ein Beispiel dafür ist der *Biegewellenwandler*. Er besitzt eine spezielle Membran mit hoher Dispersion für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Biegewellen (Bild 9.26k). Eine einzelne Schwingung der Schwingspule aktiviert dadurch nur einen kurzen Teil der Membranfläche. Er ist etwa proportional zu λ^2. Diese Welle wandert von oben nach unten und wird dabei seitlich radial abgestrahlt. Ähnlich verhält sich der *Walsh-Wandler* (Bild 9.26l). Seine Membran besteht aus unterschiedlichem Material und besitzt so eine örtlich unterschiedliche Steife. Die fortschreitenden Wellen werden bei ihm am Ende der Membran durch Schallschluckstoffe absorbiert. Diese und ähnliche Prinzipien werden auch als *Transmission-Line-Lautsprecher* bezeichnet. Sie zielen darauf ab, ein möglichst breitbandiges Spektrum verzerrungsarm zu übertragen. Sie zeigen fast keine Einschwingvorgänge und können daher Impulse besonders gut wiedergeben. Eine breite Anwendung wurde aber (noch) nicht erreicht.

Bei den Wandlerprinzipien im Zusammenhang mit Bild 9.25a wurde bereits der *magnetostatische* Lautsprecher erwähnt. Das Prinzip heißt auch *isodynamisch* oder *orthophon*. Hierbei stehen sich, wie Bild 9.26j zeigt, immer jeweils zwei gleiche Magnetpole gegenüber. Durch Abwechslung der Polarität entsteht ein magnetisches Längsfeld, das in Richtung der zwischen ihnen liegenden Membran zeigt. Auf ihr sind mäanderförmig Leitungszüge gedruckt. So wird bei Stromfluß die Membran senkrecht in die Richtung bewegt (vgl. Bild 7.9b, S. 114). Dies bewirkt einen ideal flächigen Antrieb der Membran. Mit unterschiedlicher Dimensionierung der Membran werden sowohl breitbandige Varianten als auch Tief-, Mittel- und Hochtöner gefertigt. Besonders breite Anwendung hat das Prinzip für orthophone Kopfhörer gefunden.

Auch zum *Bändchenlautsprecher* sind noch einige Ergänzungen notwendig. Bei ihm ist es sehr vorteilhaft, daß die „Schwingspule" und die Membran identisch sind. Dadurch treten keine unerwünschten Resonanzen auf. Die Riffelung schützt das Bändchen vorm Zerreißen. Der maximale Hub ist jedoch recht klein. Außerdem muß der Spalt verhältnismäßig groß sein, wodurch nur eine geringe magnetische Feldstärke im Spalt erreicht wird. Insgesamt ist er daher nur als Hochtöner geeignet. Zur Verstärkung der Schallschwingungen wird ein zusätzlicher Trichter (s. S. 248f.) benutzt. Eine leicht abgewandelte Form ist der *Air-Motion-Wandler*. Bei ihm wird die gefaltete Folie etwas anders betrieben. Sie bewegt sich längs zu ihrer Einspannung. Dabei werden alle Falten einer Seite enger und die der anderen Seite breiter. Hierdurch wird die Luft auf einer Seite aus den Falten herausgepreßt und auf der anderen Seite hineingezogen. Sein Schalldruck nimmt mit steigender Frequenz zu.

9.3.6 Verbesserungen der Abstrahlung

Ein Konuslautsprecher strahlt mit seiner Membran gleichzeitig, aber gegenphasig nach vorne und hinten Schall ab. Treffen beide Schallwellen irgendwo aufeinander, so verstärken oder schwächen sie sich dort. Der eintretende Effekt hängt vom Phasenunterschied beider Wellen und damit von der Frequenz f, d. h. von der Wellenlänge λ und der Wegdifferenz Δx ab. Gilt mit ganzzahligem n etwa $\Delta x \approx n \cdot \lambda$, so erfolgt eine Schwächung und bei gleicher Amplitude sogar eine Auslöschung. Dagegen tritt für $\Delta x \approx (½ \pm n) \cdot \lambda$ Verstärkung ein. Diese Effekte machen sich vor allem bei tiefen Frequenzen, also bei großen Wellenlängen störend bemerkbar. Daher ist es günstig, Vorder- und Rückschall möglichst gut zu trennen. Dazu dient u. a. eine Schallwand aus Holz oder Kunststoff, die auch Dipolwand genannt wird. Bei ihr wird aber dennoch die Schallabstrahlung dann weitgehend unterdrückt, wenn $\Delta x < \lambda/4$ gilt (**Bild 9.27**a). Meist wird dann von akustischem Kurzschluß gesprochen. Der Begriff umschreibt folgendes. Es gelangt deshalb kaum Schall in den Raum, weil die Luft einfach von der Vorder- zur Rückseite strömt bzw. umgekehrt. Allgemeiner treten bei allen Schallwänden aber auch bei höheren Frequenzen unregelmäßige Frequenzverläufe der Schalldruckpegel auf. Besonders stark ausgeprägt ist dies bei einer kreisförmigen Schallwand (Bild 9.27c). Bereits durch zwei voneinander abweichende Radien – die optimal gewählt werden müssen – lassen sich bessere Frequenzgänge erreichen. Noch günstiger sind rechteckförmige Schallwände. Hier ist die Lage des Lautsprechers in der Schallwand von großem Einfluß. Für eine quadratische Schallwand liegt das Optimum etwa bei den Verhältnissen gemäß Bild 9.27b. Für die gerade noch brauchbar abzustrahlende tiefste Frequenz beträgt der kürzeste Abstand zum Rand etwa r [m] $\geq 70/f$ [Hz]. Für 100 Hz sind also schon reichlich 3 m^2 und für 40 Hz gar 20 m^2 erforderlich. Damit ist die Schallwand für tiefe Frequenzen meist deutlich zu groß. Auf andere Wege – u. a. mit vollständiger Absorption der rückwärtigen Strahlung – wird im nächsten Abschnitt ab S. 250 eingegangen.

Ein Nachteil aller Konuslautsprecher ist ihr schlechter Wirkungsgrad. Es werden praktisch nur 3 bis 5 % erreicht. Die Ursache liegt vor allem darin, daß die Membran sehr schlecht an den Schallwellenwiderstand der Luft angepaßt ist. Die Luft weicht einfach weitgehend seitlich aus. Dieser Effekt reduziert die Abstrahlung als Schallwelle. Hier liegt ein wichtiger Grund für die späte Verbreitung der Konuslautsprecher. In den Anfängen des Telephons und der Rundfunktechnik war es äußerst schwierig, hinreichend große elektrische Energie bereitzustellen. Daher überwogen damals Anordnungen mit höherem Wirkungsgrad. Heute ist der Wirkungsgrad – wenn man von transportablen Geräten, Lautsprechern in öffentlichen Räumen (z. B. Bahnhöfen) und teilweise von PA-Anlagen absieht – deutlich nachgeordnet. Es dominiert die Forderung nach höchstmöglicher Klangqualität, also nach geringsten nichtlinearen Verzerrungen und breitem und gleichmäßigem Frequenzgang. Hier ist der Konuslautsprecher von Vorteil und hat folglich fast alle anderen Varianten weitgehend verdrängt. Mit zwei Anordnungen – Drucktransformation und Exponentialtrichter – läßt sich jedoch ein höherer Wirkungsgrad erreichen. Das Prinzip der *Druckkammer* geht auf die Kontinuitätsgleichung (vgl. Bild 7.8c und d auf S. 112) zurück. Ihr Schema zeigt Bild 9.27g. Die Bewegung der Membran erfolgt mit kleiner Amplitude und großer Fläche. Zwingt man den Schall in einen engeren Querschnitt, so nimmt die Amplitude nahezu proportional mit der Flächenverringerung zu. Dies ist ein ähnlicher Effekt wie er auch von der Knöchelchenkette des Gehörs – dort allerdings durch Hebelübersetzung – geleistet wird (vgl. S. 45f.). Beim *Exponentialtrichter* wird dagegen die primäre Schwingung dem Wellenwiderstand der Luft durch eine kontinuierliche Transformation angepaßt. Gemäß Bild 9.27h gilt dann mit der Trichterkonstante k für den Querschnitt am Ort x

$$A_x = A_0 \cdot e^{k \cdot x}.$$

Hierin ist A_0 der Querschnitt der Anfangsöffnung (Halsöffnung) des Trichters. Die unterste übertragbare Frequenz ist ähnlich – wie oben bei der Schallwand gezeigt – durch die Größe der Endöffnung (Mund) bestimmt. Für 30 Hz werden 5 m Länge und 10 m^2 Mundquerschnitt benötigt. Solche gewaltigen Trichter waren in der Anfangszeit des Kinos durchaus gebräuchlich. Durch die bessere Anpassung wird der Wirkungsgrad nämlich etwa verzehnfacht. Außerdem tritt der Schall aus dem Exponentialtrichter vorteilhaft als ebene Wellenfront aus. Dies senkt Verzerrungen durch den Doppler-Effekt

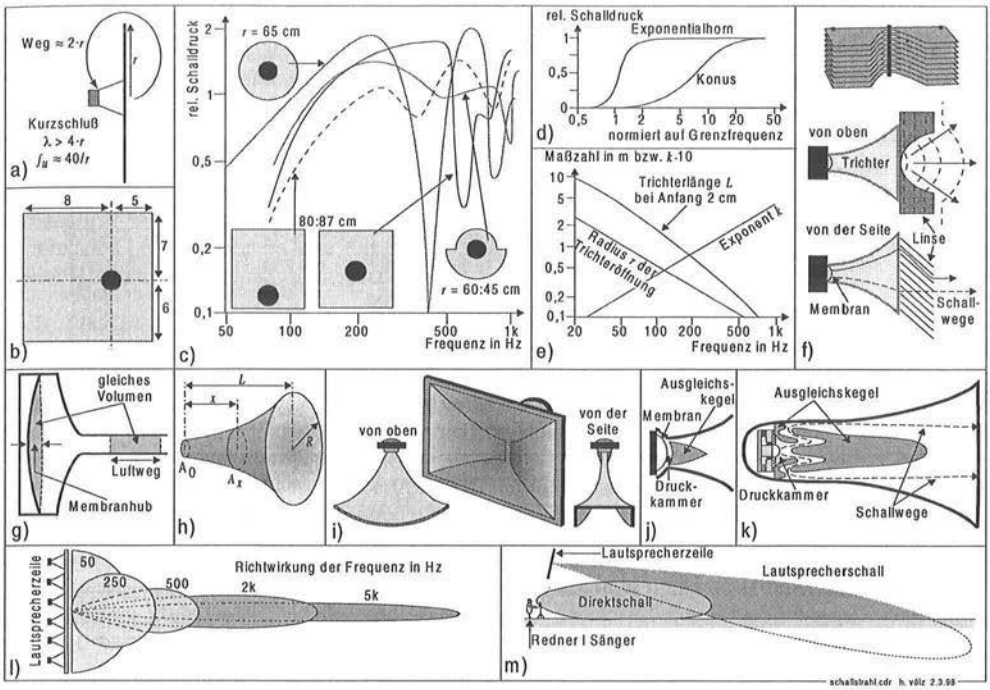


Bild 9.27 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Schallabstrahlung

(s. S. 236 u. 252). Heute werden Trichter nur für Hoch- und z. T. für Mitteltöner eingesetzt. Dann liegt die Mundöffnung im Dezimeterbereich und die untere Grenzfrequenz bei mehreren hundert Hz. Hier sind dann leicht verzerrungsarm Schalldrücke von 100 bis 120 dB zu erreichen. Der Frequenzgang eines Exponentialtrichters weicht an der unteren Frequenzgrenze deutlich von dem eines Konuslautspreches ab. Wie Bild 9.27d zeigt, ist der Abfall bei gleicher Normierung wesentlich steiler. Die Zusammenhänge zwischen dem Exponenten k, der unteren Grenzfrequenz, der Trichterlänge L und der Mundöffnung R zeigt Bild 9.27e. Die Länge des Trichters läßt sich allerdings leicht durch „Falten" problemlos verkürzen. Dies zeigt beispielhaft Bild 9.27k. Für die Mundöffnung müssen aber die Bedingungen zur unteren Frequenz weiterhin eingehalten werden. Deutlicher ist die Kombination von Druckkammer und beginnendem Exponentialtrichter im Beispiel von Bild 9.27j zu erkennen. Die Halsöffnung ist hierbei dem Durchmesser der Kalottenmembran angepaßt. Die Geschwindigkeitstransformation bewirkt der Ausgleichskegel.

Besondere Ausführungsformen des Exponentialtrichters sind *Hörner*. Sie bestehen aus Aluminium, Polyurethan oder anderem Kunststoff. Sie unterscheiden sich vor allem durch den rechteckigen Querschnitt. Dadurch kann man Hörner mit besonderer Richtwirkung bauen. Je nach Ausführung können sie den Schall sowohl stark bündeln als auch breit auffächern. Das ist sogar getrennt für die horizontale und vertikale Abstrahlung möglich. Ein Beispiel veranschaulicht Bild 9.27j. Die typischen Halsöffnungen sind für 1-, 1,5- oder 2-Zoll-Systeme ausgelegt. Die üblichen unteren Grenzfrequenzen liegen bei 700 bis 1000 Hz, Extremwerte bei 400 und 3000 Hz. Ihre Abmessungen betragen in B×H×T etwa (200 - 500) × (150 - 350) × (100 - 250) mm^3. Typische Winkelbereiche sind horizontal 40 - 120° und vertikal 20 - 100°).

Alle Konuslautsprecher zeigen bei hohen Frequenzen eine stark zunehmende Bündelung des Schalls. Dies vermeiden z. T. die Hörner. Ein andere Variante ist die *Akustiklinse* (Bild 9.27f). Bei ihr wird ein Teil des Schalles künstlich verzögert. Hierzu dienen geneigte Lamellen unterschiedlicher

Länge. In der Mitte durchläuft der Schall in ihr nur eine kurze Strecke. An den Rändern ist sie deutlich länger. So entsteht eine stark eine gekrümmte Wellenfront, die den Schall in die Breite zieht. Die Linse wirkt in diesem Beispiel wie eine „Zerstreuungslinse". Mit anderen Formen und Anordnungen lassen sich nahezu alle Analoge zur Optik erreichen.

Eine weitere Methode, die Richtcharakteristik günstig zu beeinflussen, bietet die *Lautsprecherzeile.* Sie wird auch als Lautsprechergruppe oder -säule bezeichnet. Hierbei werden mehrere, meist übereinander angeordnete Lautsprecherchassis gleichphasig betriebenen (Bild 9.27l). Besonders bei hohen und mittleren Frequenzen bewirken die dann entstehenden Interferenzen eine keulenartige Richtwirkung. So ist es z. B. möglich, eine größere Fläche mit annähernd gleicher Lautstärke zu beschallen (Bild 9.27m). Außerdem kann die Gefahr der akustischen Rückkopplung (Heulen|Pfeifen) deutlich gesenkt werden. Die Zeile strahlt am Mikrophon vorbei.

9.3.7 Lautsprechersysteme

Schall soll in einem hinreichend breiten Frequenzbereich und mit der gewünschten Richtcharakteristik abgestrahlt werden. Dies kann kein „nacktes" Lautsprecherchassis. Vielmehr müssen ein oder mehrere Chassis erst zu einem kompletten Lautsprechersystem konfektioniert werden. Einige Voraussetzungen und Beispiele dazu wurden schon im letzten Abschnitt behandelt. Hier werden die verschiedenen Möglichkeiten systematisch zusammengestellt. Sie beruhen auf den folgenden Varianten:

- Die *Schallwand* als ebene Fläche trennt den vorderen und rückwärtigen Schall. Im Gegensatz zu Gehäusen bewirkt sie – sofern hinreichend dämpfendes Material verwendet wird – keine zusätzlichen Klangverfälschungen. Nachteilig sind jedoch die beachtliche Größe und die geringe Membran-Rückstellkraft für tiefe Frequenzen. Zur Vermeidung von Überbelastungen sind daher oft Subsonic-Filter notwendig (vgl. auch S. 248f.).
- *Trichter* gibt es in mehreren Varianten (vgl. S. 248f.). Einmal erhöhen sie den Wirkungsgrad etwa um den Faktor zehn. Zum anderen ermöglichen sie es, verschiedene Richtwirkungen zu gestalten. Für tiefe Frequenzen werden sie sehr groß und lang.
- Mit *akustischen Linsen* kann die Richtwirkung verändert werden (vgl. S. 248f.). Sie sind jedoch nur für höhere Frequenzen geeignet.
- Beim *vollständig geschlossenen Gehäuse* kann kein Schallausgleich um die Membran herum erfolgen. Das Chassis muß dann aber im Innern des Gehäuses die Luft komprimieren und expandieren. Hierzu wird ein beachtlicher Energieanteil verbraucht. Dadurch wird auch die Eigenresonanz des Lautsprechers zu einer etwas höheren Frequenz verlagert. Beide Einflüsse werden um so stärker, je kleiner das Gehäusevolumen ist. Deshalb besitzen kleine Boxen meist einen schlechteren Wirkungsgrad und eine weniger gute Tiefenwiedergabe. Durch Einfügen von Schallabsorbtionsmaterial ist eine gewisse Verbesserung möglich.
- *Baßreflexsysteme* nutzen u. a. die *Laufzeit* für den rückwärtigen Schall und|oder *Luftresonanzen* zur zusätzlichen Verstärkung tiefer Frequenzen aus (s. u.).
- *Zwei-* und *Mehrwegesysteme* mit Frequenzaufteilung erreichen bei beachtlichem Aufwand ein breites Frequenzband (s. u.).
- Durch gezielte *akustische Rückkopplung* lassen sich sehr verzerrungsarme Systeme aufbauen. (s. u., motional feedback system).

Bei den letzten vier Varianten kommen im weitesten Sinne „Gehäuse" bzw. „Boxen" zur Anwendung. Vieles zu ihrem (Eigen-) Bau enthält u. a. [Hau1]. Sie existieren in recht unterschiedlichen Formen und Ausführungen. Zu ihrem Bau werden hauptsächlich zwei geeignete Materialklassen, festes Gehäusematerial und schallabsorbierende Stoffe (Dämmaterial), benötigt. Da der Schalldruck in der Box das Baumaterial zum Schwingen anregen kann, soll es eine hohe innere Dämpfung und möglichst keine Eigenresonanzen besitzen. Andernfalls entstehen Klangverfärbungen. Durch Versteifungen und Schallschluckstoffe im Gehäuse lassen sich verbleibende Eigenschwingungen deutlich reduzieren. Weitere Eigenschaften des Baumaterials betreffen die Oberflächenbeschaffenheit, die Bearbeitbarkeit, die Masse und den Preis. Gebräuchliche Baumaterialien sind:

- *Spanplatten* bestehen aus verleimten Holzspänen. Sie sollten möglichst 19 mm dick sein. Für kleine Boxen genügen auch 16 mm.
- *MDF* sind Spanplatten aus feineren Spänen, besitzen daher höhere Dichte und Eigendämpfung.
- Bei *Sperrholz* ist die Variante „Multiplex" besonders geeignet. Sie hat eine robuste Oberfläche, jedoch geringere innere Dämpfung. Besonders leicht ist Sperrholz aus verleimtem Birkenholz.
- Massives *Kiefernholz* ist sehr preiswert, besitzt jedoch ausgeprägte Eigenresonanzen.
- *Marmor* ist das teuerste und edelste Material mit sehr guten akustischen Eigenschaften. Er ist schwer zu bearbeiten und besitzt eine große Masse.
- *Kunststein* und *Leichtbeton* sind akustisch ähnlich günstig wie Marmor. Sie sind jedoch im Aussehen nicht so vorteilhaft.
- *Plexiglas* und *Acryl* sind akustisch recht gut. Ihre optische Wirkung beruht darauf, daß man in das Gehäuse hineinschauen kann. Sie sind jedoch teuer und aufwendig zu bearbeiten.
- *Plastik* hat ein geringes Gewichts, ist vibrationsarm und besitzt eine unempfindliche Oberfläche, allerdings hat es Körperschallresonanzen.

Als *Dämmaterial* werden vor allem langfaserige Stoffe, wie Natur- und Kapockwolle, verwendet. Glaswolle ist ungeeignet. Sie zerfällt nach kurzer Zeit durch die Vibrationen. Günstig sind bituminierte Weichfaser-Dämmplatten oder Weichschaumstoffplatten. Geschlossene Boxen werden vollständig ausgefüllt. Baßreflexboxen erhalten nur eine Schicht von ca. 5 cm an den Wänden. Die Baßreflexöffnung bleibt ohne Dämmaterial. Boxen für ausschließlich tiefe Frequenzen, wie Subwoofer, benötigen kein Dämmaterial. Einige Gehäuse werden zusätzlich in der Sandwich-Bauweise realisiert. Dabei wird um das eigentliche Gehäuse ein zweites gebaut. Der Zwischenraum von ca. 4 cm wird mit feinem Sand gefüllt. Von der *Funktion* her können folgende Gehäuse unterschieden werden:

- Die *rückseitig offene Box* zeigt ähnliches akustisches Verhalten wie eine Schallwand. Für die gleiche untere Grenzfrequenz ist sie jedoch deutlich kleiner. Das eingeschlossene Volumen bewirkt eine zusätzliche Resonanz.
- Die *geschlossene Kompaktbox* entspricht weitgehend einer unendlich großen Schallwand (s. o).
- Die *Baßreflexbox* besitzt bei einem geschlossenen Gehäuse eine Öffnung I ein Ausgleichsrohr (**Bild 9.28**l, nächste Seite). Dadurch verhält sie sich wie ein Helmholtzresonator. Das eingeschlossene Luftvolumen entspricht im elektrischen Ersatzschaltbild einer Kapazität. Länge und Durchmesser des Ausgleichsrohres (50 bis 100 mm) wirken induktiv. Beide zusammen ergeben eine Resonanzfrequenz, die durch den rückwärtigen Schall des Lautsprechers angeregt wird. Bei richtiger Dimensionierung kann so der Frequenzbereich zu tiefen Frequenzen erweitert werden (Bild 9.28f). Der Abgleich erfolgt meist über die Länge des Rohres. Das Ausgleichsrohr kann auch durch ein Labyrinth ersetzt werden (Bild 9.28m). Der vorteilhafte Tiefengewinn liegt bei 5 dB. Durch die Resonanz verschlechtert sich allerdings etwas das Impulsverhalten. Durch Druckausgleich können unterhalb der Resonanz (ohne wesentlichen Schalldruck) sehr große Schwingamplituden auftreten. Daher ist ein Hochpaß (Subsonicfilter) mit 18 dB/Oktave Flankensteilheit und etwa 20 Hz Grenzfrequenz wichtig.
- Beim *Bandpaßgehäuse* befindet sich der Lautsprecher in der Mitte. Die zugehörige Trennwand erzeugt zwei Volumina. Der Schallaustritt ist nur über das Ausgleichsrohr möglich (Bild 9.27j). Beide Volumen und das Ausgleichsrohr bilden ein Bandfilter. Die Schallabstrahlung erfolgt daher nur in einem Frequenzbereich bis zu maximal zwei Oktaven (Bild 9.27i). So entsteht, selbst bei einem relativ kleinem Chassis und I oder Gehäuse, ein ausgewogener Tiefbaß. Ferner entfallen die noch zu besprechenden elektrischen Weichen. Dieser Aufbau ist ideal für Subwoofer.
- Der *Rohrlautsprecher* (engl. transmission line) benutzt eine abgestimmte Luftsäule (Orgelpfeife) gemäß Bild 9.27h. Das Rohr hat etwa den gleichen Durchmesser wie die Lautsprechermembran. Die verstärkte Schallabstrahlung erfolgt bei $\lambda/4$ und allen ungeraden Vielfachen der zugehörigen Frequenz. Ein gewinkeltes Rohr ermöglicht auch die Nutzung der rückwärtigen Strahlung bei $\lambda/2$ und bei allen geradzahligen Vielfachen. Es lassen sich so sehr tiefe Frequenzen bei leider stark welligem Frequenzgang übertragen.

- Bei einem *Doppelbaßsystem* (Compoundgehäuse) werden zwei gleiche Lautsprecher „Rücken an Rücken" mit einem Rohr passenden Durchmessers verbunden und in eines der o. g. Gehäuse montiert. Durch die zwischen den Lautsprechern eingeschlossene Luft wird eine deutlich tiefere Grenzfrequenz erreicht. Die Lautsprecher müssen über eine Lautsprecherweiche betrieben werden.
- Die *Exponential-Reflex-Box* ermöglicht über Laufzeiteffekte eine vorteilhafte und phasenrichtige Verstärkung des rückwärtigen Schalls (Bild 9.28n). Der Baßreflexweg wird durch Mundöffnung und Weglänge so dimensioniert, daß sich eine optimale Anpassung zur Grenzfrequenz des Chassis ergibt. So kann eine gute Tiefbaßwiedergabe bei noch akzeptabler Größe erreicht werden.
- Auf die *Schallzeile* wurde bereits auf S. 249f. eingegangen.

Bezüglich der Anzahl verwendeter Lautsprecherchassis werden Breitband- und Mehrwegesysteme unterschieden. Für beide werden teilweise die zuvor besprochenen Möglichkeiten, z. B. Baßreflex, zusätzlich benutzt.

Ein **Breitbandsystem** benutzt nur ein Lautsprecherchassis. Dadurch ist es in vielen Punkten ein optimaler Kompromiß. Es ist einfach, besitzt nur einen Entstehungsort für den Schall, hat keine Phasenprobleme mit Frequenzweichen und ist meist preiswert. Ein wesentlicher Nachteil besteht darin, daß maximal ein Frequenzbereich von nur etwa 50 Hz bis 15 kHz erreichbar ist (Bild 9.28a). Ein weiterer Nachteil ist ein relativ starkes Auftreten des Dopplereffektes (vgl. S. 236). Bei tiefen Tönen entfernt und nähert sich die Membran dem Zuhörer mit beachtlicher Amplitude. Gleichzeitig abgestrahlte hohe Frequenzen kommen also mit der zugehörenden Geschwindigkeit auf den Zuhörer zu bzw. entfernen sich von ihm. Die Wirkung ist ähnlich wie bei einem „jaulenden" Tonband. Der hohe Ton wird rauh und verwaschen. Dieser Effekt nimmt mit der Lautstärke des tiefen Tones zu. Außerdem ist er bei kleinen Membranflächen stärker ausgeprägt. Sie benötigen ja für den gleichen Schalldruck eine größere Membranamplitude. Nichtlinearitäten, die bei großer Lautstärke auftreten können, erzeugen außerdem leicht nicht vorhandene Summen- und Differenzfrequenzen (Intermodulation).

Beim **Zweiwegesystem** kommen je ein Hoch- und ein Tieftonchassis zum Einsatz. So ergibt sich in etwa ein Frequenzbereich von 30 Hz bis 18 kHz (Bild 9.28b). Das elektrische Signal muß für beide Chassis über Weichen (s. u.) getrennt werden (Bild 9.28d). Dadurch kann es im Überlappungsbereich zu Phasenproblemen kommen. Die richtige Zusammenschaltung ist in Bild 9.28d durch die Punkte an den Lautsprechersymbolen angedeutet. Ein weiterer Nachteil sind mögliche Laufzeitdifferenzen im Überlappungsbereich (Bild 9.28q). Sie erzeugen eventuell eine ausgeprägte Kammfilterstruktur. Sie ist analog zu der, die beim Mikrophon in Bild 8.14b auf S. 170 gezeigt ist. Weitere Vorteile der Zweiwegesysteme sind neben dem größeren Frequenzbereich die höhere Belastbarkeit und das Auftreten von weniger Partialschwingungen, Intermodulations- und Dopplerverzerrungen.

Die **Frequenzweichen** bestehen hauptsächlich aus Spulen und Kondensatoren. Widerstände werden nur zum Pegelabgleich eingesetzt. Je nach Anwendung werden Selektivitäten von 6, 12, 18 oder 24 dB/Oktave benutzt. Mit zunehmender Selektivität ist zwar die Trennung besser, jedoch wird gleichzeitig das Impulsverhalten schlechter. Spulen besitzen immer einen ohmschen Widerstand, der sowohl Verluste bedingt, als auch die Dämpfung durch den kleinen Verstärkerinnenwiderstand vermindert. Als obere Grenze für ihren Widerstand gilt etwa 0,5 Ω. Das ist meist schon deutlich mehr als der Widerstand der Lautsprecherzuleitungen. Dennoch kann dieser Wert nur durch eine beachtliche Größe und mit dickem Draht erreicht werden. Prinzipiell lassen sich günstige Werte auch durch Wicklungen auf Ferritkernen realisieren. Infolge ihrer Hystereseeigenschaft entstehen aber leicht nichtlineare Verzerrungen. Außerdem ändert sich mit der Lautstärke (Aussteuerung) ihre Induktivität und verschiebt so die Grenzfrequenz. Bessere Eigenschaften sind durch einen Kern mit Luftspalt möglich. Allerdings ist dann wieder mehr Draht notwendig. Schwerwiegende Einflüsse treten unterhalb von 200 Hz auf. Hier kann es nämlich noch zu unerwünschten Wechselwirkungen mit der Lautsprecher-Resonanz kommen. Dann sind aktive Subwoofer (Aktivbox) vorteilhaft. Der dann zusätzliche Verstärker erhöht aber den Aufwand beträchtlich. Für die Kapazität sind Folienkondensatoren der Typen MKM, MKS, MKP oder MP günstig. Leider werden sie bei den erforderlichen Kapazitäten sehr groß. Preiswerter sind bipolare Elkos. Sie haben jedoch höhere Verluste und eine geringere Spannungsfestigkeit.

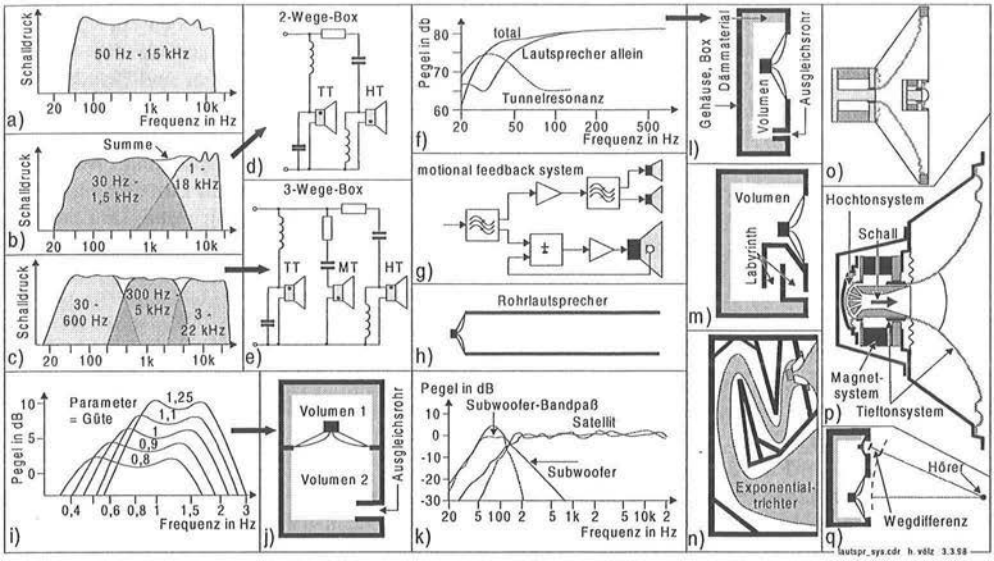


Bild 9.28 Eigenschaften und Aufbau von Lautsprechersystemen

Der Kammfiltereffekt von Zweiwegesystemen ist durch einen **Koaxstrahler** zu vermeiden. Hierbei werden beide Systeme axial ineinandergefügt. Eine relativ einfache Variante zeigt Bild 9.28o. Kompakter ist der *Eckmiller-Lautsprecher* von Bild 9.28p. Er besitzt hinten ein Hochtonsystem, das als Druckkammerlautsprecher durch den Magnetkern nach vorne strahlt. Dabei wird zugleich ein Exponentialtrichter erzeugt, der sich über die Nawimembran des Tieftontrichters fortsetzt. Auf diese Weise wird auch noch ein fast idealer Punktstrahler erreicht.

Eine **Dreiwegebox** verwendet je einen Hoch-, Mittel- und Tieftonlautsprecher (Bild 9.28c und e) und strahlt dadurch im gesamten Hörbereich von etwa 30 Hz bis über 20 kHz Schall ab. Der Aufwand wird aber auch deutlich höher als bei einer Zweiwegebox. Außerdem sind zwei überlappende Frequenzbereiche vorhanden, in denen Kammfiltereffekte und Phasenfehler auftreten können.

Da bei tiefen Frequenzen leicht nichtlineare Verzerrungen auftreten, entstand das **MFS** (motional feedback system) gemäß Bild 9.28g. Bei einer aktiven Lautsprecherbox befindet sich vor dem Tieftonlautsprecher ein Mikrophon. Seine Spannung wird zur *Gegenkopplung* benutzt. Hierdurch wird die Membranbewegung des Tieftonlautsprechers stark linearisiert, so daß selbst bei sehr großer Aussteuerung der Klirrfaktor vernachlässigbar klein bleibt.

In den letzen Jahren wird ein System aus getrennten **Satelliten und Subwoofer** immer häufiger angewendet. Dies beruht darauf, daß wir bei Frequenzen unterhalb von 200 Hz kaum noch Schallquellen lokalisieren können. Unsere Richtungswahrnehmung wird dann nur durch die kleinen Satelliten bei höherer Frequenz bestimmt (vgl. Bild 9.28k). Der Subwoofer kann also nahezu beliebig im Raum angeordnet werden. Selbst bei Stereosignalen genügt ein Subwoofer, dem das Summensignal zugeführt wird. Zu beachten ist jedoch, daß die Wellenlänge für 150 Hz bei rund 2 m liegt. Deshalb sollte er wegen der Überlappung des Frequenzbereiches mit den Satelliten höchstens 50 cm von ihrer Mitte entfernt sein. Außerdem ist bei der Aufstellung des Subwoofers auf Raumresonanzen zu achten (vgl. S. 235). Stehende Wellen bilden sich dann besonders stark aus, wenn er in einer Ecke steht. Eine günstige Position erreicht man z. B. über das Reziprozitätsgesetz. Dazu wird der Subwoofer am Hörort aufgestellt und man geht durch Raum. An der Stelle, wo sich der Baß besonders straff, kräftig und gut akzentuiert anhört, steht der Subwoofer günstig. Eventuell lassen sich auch durch mehrere Subwoofer Lücken stopfen.

Besondere Lautsprechersysteme verlangen **PA-Anlagen** (public address). Sie werden vorwiegend in der rauhen und ständig wechselnden Umgebung von Großveranstaltungen, also auch im Freien (open air) und bei ungünstiger Witterung, eingesetzt. Daher sind neben hoher Qualität und Schalleistung auch die Zuverlässigkeit und Robustheit entscheidend. Das erfordert gegenüber HiFi-Lautsprechern abweichende Konstruktionen. So besteht u. a. der Korb aus Stahl oder Aluguß. Die Membranen der Tieftonchassis reichen bis zu 50 cm. Das erfordert auch härtere Membraneinspannung. Wegen der hohen elektrischen Leitung und der dabei entstehenden Wärme ist fast immer im Luftspalt ein Ferrofluid vorhanden. Dennoch muß zur Begrenzung der Membranauslenkung ein richtig eingestellter Limiter verwendet werden. Im Mittel- und Hochtonbereich werden vor allem Druckkammerlautsprecher mit Hörnern eingesetzt. Generell werden die Empfehlungen der Ela-Technik (**E**lektroakustik), wie sie zur Beschallung in Kaufhäusern, Büros, Kirchen, Bahnhöfen usw. Anwendung finden, benutzt. Dazu gehört auch die 50-, 70- und 100-Volt-Technik.

Zur verbalen Beschreibung von mangelhafter Klangwahrnehmung haben sich spezielle Begriffe herausgebildet. So wird von *bumbsend* gesprochen, wenn eine deutliche Resonanz bei den tiefen Frequenzen vorliegt. Ein *mulmiger* Klang entsteht bei Überbetonung der Frequenzen um 150 Hz. *Aggressiv* wirkt ein Schall, der den Mittenbereich von 1 bis 5 kHz hervorhebt. *Hohl* klingt es dagegen, wenn hier ein Einbruch im Übertragungsbereich vorliegt. Ein *näselnder* Klang geht meist auf einen ungleichmäßigen Frequenzverlauf im Mittenbereich zurück. *Verwaschen* hört es sich an, wenn mehrere Resonanzen bei mittleren bis hohen Frequenzen vorliegen. Bei fehlenden Höhen wird von *dumpf* gesprochen. *Spitzer* und *schriller* Schall entsteht schließlich bei Überbetonung der Höhen. Ein gutes Klangbild soll ausgewogen, warm, gut lokalisierbar, samten und präzise sein.

9.3.8 Kopfhörervarianten

Die verschiedenen Varianten von Kopfhörern | Ohrhörern werden mit **Bild 9.29**a in zwei Richtungen klassifiziert. Einmal betrifft das die *Betriebsweise*. Sie kann sein:

- *geschlossen*, wobei der Kopfhörer über schallundurchlässige Materialien so fest mit dem Ohr verbunden wird, daß kein externer Schall das Ohr erreichen kann;
- *offen*, dann befindet sich zwischen dem Kopfhörer und dem Ohr ein Abstand, der auch anderen Schall nahezu ungehindert zum Ohr gelangen läßt;
- *halboffen, dies* stellt einen Mittelweg zwischen offen und geschlossen dar. Es gelangt nur etwas Außenschall ans Ohr.

Zum anderen lassen sich die Typen nach ihrer *Befestigung am Ohr* unterscheiden:

- Die *Kopfhörer* im engeren Sinn besitzen einen Bügel, mit dem die richtige Lage am Ohr fixiert werden kann. Sie sind relativ leicht aufzusetzen und abzunehmen. Infolge der dabei zulässigen, relativ großen Kapsel ist mit ihnen höchste Klangqualität zu erreichen. Dann werden vor allem elektrodynamische (Bild 9.29c) oder orthophone (vgl. Bild 9.25a, S. 243 und 9.26, S. 245) Systeme eingesetzt. Sie übertreffen teilweise deutlich die hochwertigen Lautsprechersysteme. Kopfhörer können auch mit einem Mikrophon zu einer Sprechgarnitur kombiniert werden.
- *Ohrhörer* werden ohne zusätzliche Hilfsmittel am Außenohr befestigt. Sie sind kleiner als Kopfhörer und erreichen daher auch nicht ihre Klangqualität. Sie sind dafür jedoch noch leichter zu handhaben und zu transportieren. Typisch sind hier elektromagnetische (Bild 9.29b) und z. T. elektrostatische Systeme (Bild 9.29d).
- *Inohrhörer* sind noch kleiner als die Ohrhörer. Sie verschwinden weitgehend im Gehörgang. Dadurch erreichen sie meist nur mittlere Klangqualität und sind schwieriger anzulegen und zu entfernen. Zumindest ermöglichen sie eine gute Sprachverständlichkeit. Deshalb werden sie fast nur für Hörgeräte eingesetzt.

Alle Kopfhörervarianten bereiten Schwierigkeiten bei der Schallokalisierung. Er wird nur selten von vorn, sondern meist oberhalb des Kopfes wahrgenommen. Eine Ausnahme bilden die speziellen kopfbezogenen Stereoübertragungen (s. S. 172ff., Bild 8.16h). Eine weitere Ausnahme ist unten beschrie-

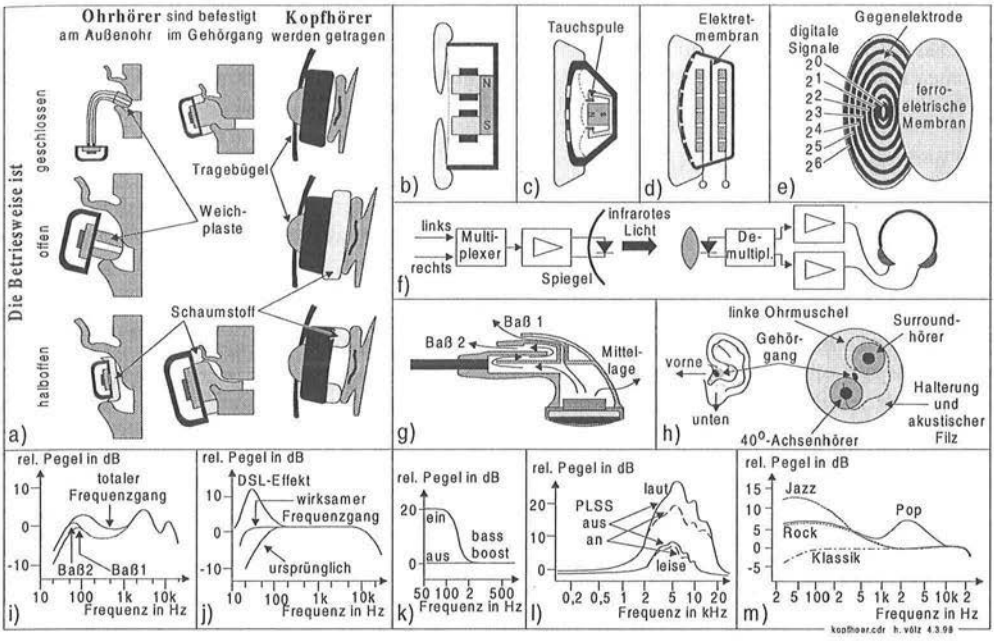


Bild 9.29 Verschiedene Varianten von Kopf- und Ohrhörern

ben (Surround-Kopfhörer). Bei vielen Ohrhörern ist es auch schwierig, eine gute Baßwiedergabe zu erreichen. Andererseits werden auch beim Walkman usw. gerade tiefe Frequenzen wegen ihrer stark emotionalen Wirkung gefordert. Deshalb entstanden hierzu mehrere Lösungen. Beim „Duo bass boost pipe phone" werden die tiefen Frequenzen ähnlich wie bei einer Baßreflexbox (s. S. 251ff., z. B. Bild 9.28f, l und m) durch Resonanzanhebung – hier sogar auf zwei Wegen – verstärkt (Bild 9.29g und i). Meist werden jedoch die tiefen Frequenzen nur zusätzlich elektronisch verstärkt. Ein Beispiel ist das DSL (dynamic super linear bass; Bild 9.29j). Recht ähnlich arbeitet das ein- und ausschaltbare bass boost, das zuweilen sogar bei Hifi-Verstärkern existiert (Bild 9.29k). Es hebt Frequenzen unter 100 Hz um etwa 20 dB an. In etwa das Gegenteil bewirkt das PLSS (private listening sound system). Hier wird der Frequenzgang so verändert, daß bei einer Ohrhörerwiedergabe die Nachbarn (z. B. in öffentlichen Verkehrsmitteln) weniger gestört werden (Bild 9.29l). Auch wird zuweilen eine individuelle Umschaltung zwischen Musikgenres ermöglicht (Bild 9.29m).

Bei der sehr hochwertigen Kopfhörerübertragung stört oft das Kabel. Daher entstanden die Kopfhörer mit Infrarotübertragung (drahtloser bzw. *Infrarot-Kopfhörer*, Bild 9.29f). An die Hifi-Anlage oder den Fernseher wird ein „Umsetzer" angeschlossen. Er multiplext die RL-Signale und strahlt sie dann mit moduliertem Infrarotlicht ab. Sie werden im batteriebetriebenen Kopfhörer von einer Photodiode empfangen, demultiplext und über zwei Leistungsverstärker den Kapseln zugeführt. Hierdurch kann man sich beim Hören auch frei im Raum bewegen.

Sehr ungewöhnlich ist der echt *digitale Kopfhörer* (Bild 9.29e). Er nutzt das elektrostatische Prinzip. Der ferroelektrischen Membran steht eine feste Platte mit mehreren radialen Leitern gegenüber. Ihre Flächen verhalten sich wie $1:2^n$. Daher sind mit den gezeigten 7 Elektroden bereits $2^8 = 256$ Stellungen der Membran, also ± 128 Amplitudenstufen, d. h. reichlich 40 dB möglich. Mehr Stufen bereiten keine technischen Probleme. Zur Ansteuerung ist ein spezieller Schaltkreis erforderlich.

Ähnlich ungewöhnlich ist der *Surround-Kopfhörer* (Bild 9.29h). Für jedes Ohr besitzt er zwei Schallsender. Sie sind so angeordnet, daß der Klangeindruck u.a. nach vorn verlegt erscheint und annähernd ein Surround-Klang möglich ist (vgl. S. 257f.).

Bei Arbeiten unter Lärmeinfluß verlangt der Arbeitsschutz das Tragen von Schallschutz. Doch auch in Diskos, Tanzbars, Open-Air-Veranstaltungen werden bewußt ähnliche Schallpegel erzeugt. Sie können schnell zu Hörschäden führen. Leider ermöglichen auch bereits Walkman und ähnliche Geräte solche Lautstärken. Zuweilen wird daher schon ein (abschaltbarer!) Limiter eingebaut.

9.3.9 Schallfeldnachbildungen

Schall hören wir aus verschiedenen Richtungen und als Ereignis im Raum. Folglich muß Schall über Lautsprecher | Kopfhörer auch so erzeugt werden, daß bestimmte Raumerwartungen erfüllt und | oder Raumvorstellungen erweckt werden. Dies legt einen Vergleich mit optischen Methoden nahe. Dabei ist aber auf erhebliche Unterschiede zwischen Licht und Schall (vgl. Tabelle S. 236) einerseits und unsere Wahrnehmungsmöglichkeiten (obige Tabelle) anderseits zu achten. Die Prozesse des Sehens können wir sehr gut mit der geometrischen Optik beschreiben. Offensichtlich reicht sie aber nicht für das Hören aus. Ein typisches Beispiel ist der „Cocktail-Party-Effekt". Im lauten Stimmengewirr können wir uns dennoch recht gut und vergleichsweise leise mit einem entfernten Partner unterhalten. Selbst bei einer sehr hochwertigen, stereophonen, z. T. sogar vielkanaligen Aufzeichnung des Geschehens ist die Verständlichkeit jedoch zumindest stark verringert. Offensichtlich sind u. a. unwillkürliche Kopfbewegungen und „Ergänzungen" durch das Sehen erforderlich. Im originalen Schallfeld können wir aber auch mit geschlossenen Augen relativ gut – wenn auch längst nicht so gut wie beim Sehen – die räumliche Anordnung aller Schallquellen, ihre Entfernung und die Größe des Raumes wahrnehmen. Wir können meist sogar jede einzelne Schallquelle isoliert hören. Dies ist bei einer technischen Wiedergabe bestenfalls näherungsweise zu erreichen. Es fehlen uns vielleicht (noch) wichtige Grundlagenerkenntnisse. Wahrscheinlich hat unsere evolutionäre und individuelle Erfahrung im Umgang mit Schall in uns recht komplizierte Mechanismen entstehen lassen, die wir (noch) nicht verstehen. Im Kapitel zum Hören ab S. 45 sind hierzu mehrere Details erwähnt. Es sind eben viele Schallmodifikationen, die es uns ermöglichen, die komplexen Hörleistungen zu vollbringen. U. a. gehören dazu

Verhältnis	Auge	Ohr
Unterscheidbare Richtungen	10^6	100
Zeitliche Auflösung	100 ms	25 µs (bei 20 kHz)
Unterscheidbare Frequenzen	ca. 10 gesättigte Farben	ca. 100 Halbtöne
Wiederholrate	≥ 50 Hz; ≤ 20 ms	≥ 20 Hz; ≤ 50 ms

- die zeitliche Differenz eintreffender Signale zwischen beiden Ohren (IDT = interaural time difference),
- die frequenzabhängige Pegeldifferenz zwischen beiden Ohren (IAD = interaural amplitude difference),
- Einflüsse der Ohrmuschel, insbesondere der beiden Falten, wobei zuweilen nur eine Falte vorhanden ist (HRTF = head related transfer function),
- die individuelle Kopfform,
- der über den Nasenraum zum Gehör gelangende Schall (s. S. 56f) und
- Eigenschaften des Raumes, wie z. B. Echos und Hall.

Daher erreicht auch die Kunstkopf-Stereophonie (s. S. 173; Bild 8.16h) keine perfekte Wiedergabe. Hoffnung wird auf künftige Digitaltechnik mit höherer Rechenleistung gesetzt. Die Aufnahme soll mit vielen Mikrophonen in einem quasi schalltoten Raum erfolgen. Bei der Wiedergabe bereiten adaptive und einstellbare Filter-, Hall- und Mischprogramme die Signale optimal und individuell für beide Ohren auf. Wie jetzt beim Datenhelm sind dann auch „Nachführungen" der Quellen beim Bewegen des Kopfes und beim Bewegen im Raum möglich. Voll wirksam dürfte das wahrscheinlich nur bei einer Kopfhörerwiedergabe sein. Bei Lautsprechern kann es bestenfalls für eine Person funktionieren. Es wiederholen sich also, wenn auch auf andere Weise, die Einteilungen der Bildausgabe (s. S. 202 und S. 223). Heute wird mit wesentlich einfacheren Methoden gearbeitet. Zunächst sind jedoch einige historische Betrachtungen zu machen.

Die wohl ersten brauchbaren Stereoaufzeichnungen wurden 1943 mit der Magnetbandtechnik im Deutschen Rundfunk unter der Leitung des Toningenieurs Helmut Krüger gemacht. Nur wenige davon konnten den Krieg überstehen. 1951 entwickelte Bluemlein bei der DECCA die Stereo-Schallplatte. Doch erst 1958 kamen die ersten Stereo-Platten auf den Markt. Im Kinotheater gab es bereits ab 1953 das Breitwandverfahren Cinemascope mit 6-spuriger Magnetfilmaufzeichnung. Hierfür wurden in den 70er Jahren eine größere Anzahl von Theatern ausgerüstet. Ab 1972 erfolgten die Aufnahmen mit der 2-Zoll-Magnetbandtechnik auf 16, 24 oder 32 Spuren. Sie war die Weiterentwicklung der bereits ab Ende der 50er Jahre in den Studios als Standard verwendeten zweikanaligen Stereoaufzeichnung. Erste Rundfunksendungen in Stereo erfolgten 1961 in den USA. Am 15.9. 1963 beginnt die Berliner Welle vom Sender Freies Berlin mit den offiziellen Stereo-Sendungen. In der Folgezeit wurde immer wieder versucht, auch im Heimbereich Weiterentwicklungen einzuführen. Ein Beispiel ist die Quadrophonie mit vier Kanälen und vier Lautsprechern. Mit ihr kann Schall von vorne und hinten einschließlich von Raumeigenschaften wiedergegeben werden. Es wurde auch versucht, dies indirekt und einfacher zu realisieren. Das Summensignal wird zusätzlich gegenphasig rückwärtig abgestrahlt (**Bild 9.30**c, umseitig). Hierbei verschärften sich jedoch noch mehr die Probleme mit unsymmetrischen Abständen, wie sie z. B. die Bilder 9.30a und b bezüglich der Laufzeit der Reflexionen andeuten. Insgesamt konnte jedoch keines der mehr als zweikanaligen Verfahren eine Breitenwirkung erreichen. Selbst die CD (Compact Disc) wurde 1972 nur mit dem Zweispurverfahren entwickelt. Offensichtlich waren es jedoch keine technischen Probleme, die den Übergang zu leistungsfähigeren Verfahren verhinderten. Seit wenigen Jahren ist nun eine „euphoristische" Einführung erweiterter Systeme zu beobachten. Erfolgt also endlich ein Durchbruch oder ist es nur eine vorübergehende Mode? Die Frage soll hier unbeantwortet bleiben. Allein die Anzahl der konkurrierenden Systeme läßt Bedenken aufkommen. So gibt es u. a. Dolby Surround in mehreren Varianten, AC-3, THX und 5.1. Natürlich besitzen alle Systeme ein Logo. Seine Verwendung ist mit technischen Bedingungen und Lizenzgebühren gekoppelt. Ferner besteht ein beachtlicher Normenstreit bezüglich der Audiosignale auf der DVD als Nachfolge der CD. Hinzu kommen noch die verschiedenen Möglichkeiten im PC-Bereich, insbesondere zur virtuellen Realität. Eine kurze Beschreibung des aktuellen Standes ist jedoch angebracht. Auf einige elektronische Lösungen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Bei dem vom Kino abgeleiteten *Dolby-Surround-System* kommen zu den üblichen Stereoboxen (L und R) drei weitere hinzu (Bild 9.30d). Zwei rückseitige Lautsprecher (SR und SL) strahlen gemeinsam ein „Surround"-Signal gegenphasig ab. Es wird fast nur für Hintergrundgeräusche, Klangeffekte und über den Kopf des Hörers hinweg fliegende Objekte verwendet. Als Lautsprecher sind Dipolstrahler bevorzugt. Sie bestehen aus je zwei zusammengefügten Lautsprechern, die gegenphasig in die entgegengesetzten Richtungen strahlen. Ihr Schall soll nämlich nicht direkt lokalisierbar sein. Deshalb wird das Surroundsignal gegenüber den Frontlautsprechern auch etwas verzögert. Zusätzlich wird meist noch der Frequenzbereich eingeengt. Der dritte Zusatzlautsprecher (C von center, auch Frontlautsprecher) befindet sich in der Mitte. Er soll hauptsächlich ein Zerfallen der vorderen Signale und damit ein „Loch" in der Mitte verhindern. Um Boden- und Deckenreflexionen zu vermeiden und um die Verständlichkeit zu erhöhen, soll er in der vertikalen Ebene eine möglichst schmale Charakteristik besitzen. Zuweilen wird er auch mit einem Subwoofer gekoppelt. Für die Anordnung der fünf Lautsprecher müssen mehrere Bedingungen eingehalten werden. Um z. B. Laufzeitunterschiede bei Wandreflexionen zu verhindern (vgl. Bild 9.30a und b), ist einmal eine symmetrische Aufstellung erforderlich. Weitere Empfehlungen enthält Bild 9.30e. Die rückwärtigen Surroundlautsprecher sollen möglichst hoch, also dicht unter der Decke, angebracht werden. Für die drei frontalen Lautsprecher wird die gleiche Höhe, etwa in der Augenhöhe, empfohlen. Eventuell darf der Mittenlautsprecher C sich etwas höher (zur Not auch etwas tiefer) befinden. Das ist z. B. im Zusammenhang mit dem Fernseher angebracht. Dann sollen aber der linke und rechte Lautsprecher nicht zu weit vom Fernseher entfernt sein. Sonst gibt es Diskrepanzen zum filmischen Geschehen. Als Maximalwert wird etwa die 2,5fache Bilddiagonale genannt. Wird schließlich noch ein Subwoofer für die tiefen Frequenzen verwendet, so können sich recht unangenehme Raumresonanzen ausbilden. Auch das erzwingt eine genaue Aufstellung (vgl. S. 235 und 253). Schließlich müssen alle Lautsprecher zueinander phasenrichtig betrieben werden. Der richtige Aufbau einer solchen Anlage ist also durchaus nicht einfach. Deshalb wird es allgemein empfohlen, die Einmessung von einem Fachmann im wirklichen Wohn-

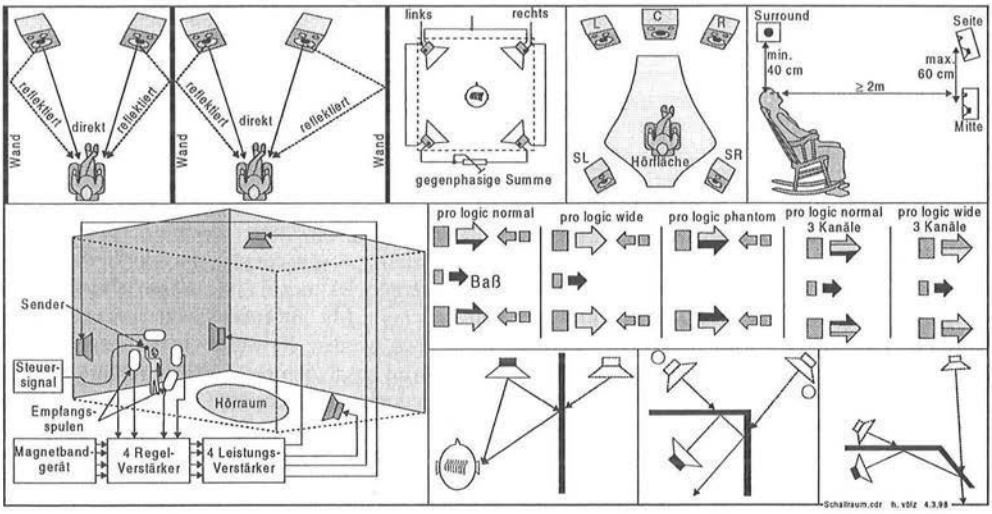


Bild 9.30 Schallwiedergabe und -modelle, welche den Raum berücksichtigen

raum vornehmen zu lassen. Neben speziellen Meßmitteln gibt es dafür u. a. auch eine spezielle CD mit Sondersignalen.

Der hohe Aufwand für Dolby Surround hat zwangsläufig zu verschiedenen Varianten und Vereinfachungen, auch unter anderen Namen, geführt. Relativ bekannt ist das in den USA entwickelte *Dolby-ProLogic*-System, was auch einfacher als *pro logic* bezeichnet wird. Neben der Standardvariante mit fünf Lautsprechern gibt es mehrere Leistungsstufen (Bild 9.30g). Die auch mit *3D-Stereo* bezeichnete ProLogic-Variante verzichtet sogar ganz auf die rückwärtigen Surround-Lautsprecher. Die zugehörigen räumlichen Klanginformationen werden indirekt über die Mitten- und die Frontlautsprecher wiedergegeben (Bild 9.30g rechts). Dies dürfte ein Grund sein, weshalb es nun auch ein *Virtual-Dolby-Surround* – natürlich mit genehmigungspflichtigem Logo gibt. Bei all diesen „Virtualisierungen" mit 2 oder 3 Lautsprechern ist die nutzbare Hörfläche sehr klein. Dennoch gibt es hierzu viele abgewandelte Systeme: *3D-Phonic* (JVC), *Virtual Sonic* (Panasonic, Technics), *A3D* (Aureal), *Qsurround* (QSound) und *Vimax* (Harman), sowie die digitale Variante *Virtual Dolby Digital*. Eine technische Weiterentwicklung ist das ProLogic-kompatible *THX*-Verfahren (Thomlinson Holman's Experiments) der amerikanischen Lucas Filmgesellschaft. Hierbei werden u. a. die tiefen Bässe separaten Subwoofern zugeführt. Für den Surround-Kanal kommen zwangläufig die o. g. Dipol-Lautsprecher zur Anwendung. Außerdem erfolgt eine leichte Dämpfung der Höhenwiedergabe, weil die Original-Dolby-Soundtracks wegen der Kinovorhänge meist etwas zu hell abgemischt werden. An die Vergabe des THX-Logos stellt Lucas Film natürlich Forderungen. Das *AC-3* von Dolby nutzt schließlich *komprimierte digitale* Signale in fünf getrennten Audiokanälen und einen zusätzlichen Baßkanal. Es wird daher auch als *5.1* bezeichnet. Diese Kodierung wird zum Beispiel auf den amerikanischen DVDs benutzt.

Bei den *Soundkarten* und in der *virtuellen Realität* werden wieder andere Wege beschritten. Hier steht nämlich die Schaffung neuer Werke an erster Stelle. Die Wiedergabe von Sound zu „Spiel-„ Filmen oder von gespeicherten Audiowerken in Musik, Sprache usw. ist zweitrangig. Daher müssen Mittel bereitgestellt werden, die es ermöglichen, virtuelle Schallquellen und Schallräume zu generieren. Im Prinzip gab es hierzu schon Versuche mit der rein analogen Technik in den 50er Jahren. Ein Beispiel ist die Schallsteuerung, wie sie Pierre Schaeffer durchführte (Bild 9.30f; [WIN] S. 126ff.). Heute wird von Modellen ausgegangen, die ähnliches leisten, wie das 3D-Modelling und Rendering (Raytracing) im graphischen Bereich. Dabei sind hauptsächlich die folgenden Varianten zu unterscheiden:

- *Geometrische* Modelle verwenden analog zur Lichtoptik Schallstrahlen. Es wird auch von Spiegelschallquellen oder vom cone tracing (Verfolgung des sich ausbreitenden Schallkegels) gesprochen. Sie sind dann brauchbar, wenn die Schallwellenlänge klein gegenüber den Abmessungen des Raumes, der Hindernisse, der Absorber usw. ist. Für eine Wand bzw. zwei verschiedene Ecken zeigen das die Bilder 9.30 h bis j. Es entstehen also zusätzlich mehrere virtuelle Schallquellen (weitere Details s. u.).
- *Statistische* Modelle (particle tracing, s. u.) fassen mehrfache Schallreflexionen als eine Diffussivität (Durchmischung) des Schalles auf. Als Grenzfall folgt dabei u. a. die Sabine'sche Formel (s. S. 57f). Die Nachhallzeit ist dabei nahezu unabhängig von der Lage der Schallquellen sowie von der Anordnung der reflektierenden und absorbierenden Wände.
- *Wellentheoretische* Modelle sind extrem aufwendig. Sie müssen eine große Anzahl von Interferenzen, die durch viele Wellen gegeben sind, berechnen.
- *Physiologische* Modelle orientieren sich mehr an dem, wie Schall auf uns wirkt.

Weil die Wellenlänge des Schalls meist groß gegenüber den Unebenheiten der Wände ist, wirkt ein Raum akustisch wie ein Spiegelkabinett. Solche akustischen Spiegelungen sind also ähnlich wie beim Ray Tracing nachzubilden. Wegen der meist geringeren Absorption und weiterer Einflüsse sind aber viel mehr Reflexionen zu berücksichtigen. Während in der Optik meist fünf Reflexionen genügen, muß akustisch häufig bis zur fünfzigsten Ordnung gerechnet werden. Bei n Wänden und m Reflexionen folgt so ein Rechenaufwand, der mit n^m exponentiell ansteigt. Dieser schon hohe Rechenaufwand genügt aber noch nicht. Der *Schall* breitet sich nämlich relativ langsam aus. So tritt die Zeit als zusätzlicher Parameter auf. Durch die hohe *zeitliche Auflösung des Ohres* wird dieser Einfluß noch verschärft. Die einzelnen Reflexionen wirken also nicht mehr als statische, farbige Bildpunkte, sondern müssen auch in ihrer zeitlichen Abfolge Berücksichtigung finden. Daher erfolgt die Simulation meist in zwei Schritten:

- Bei der *Schallfeldsimulation* wird die räumliche Ausbreitung des Schalles über mehrfache Reflexionen an den Wänden des Raumes erfaßt. Mit jeder Reflexion ändern sich Laufzeit, Richtung und Spektrum der Schallwelle. Nach der Berechnung ist jeder mögliche Ort durch eine Vielzahl von Schallen (Echogrammen) aus unterschiedlichen Richtungen mit spezifischen Verzögerungen und Spektren gekennzeichnet.
- Die *Auralisierung* überlagert die Echogramme mit den Eigenschaften des Ohres (HRTF; s. S. 256). So entsteht eine richtungsabhängige binaurale Raumimpulsantwort. Sie wird auf das eigentliche, unverhallte Signal der Schallquelle angewendet. So entstehen zwei Signale, die dem Kopfhörer zugeführt werden und das akustische Verhalten des Raumes berücksichtigen.

Die Berechnungen müssen gleichzeitig für die etwa hundert vom Ohr unterscheidbaren Raumrichtungen durchgeführt werden. Bei Veränderungen im Raum (Wandern von Schallquellen) oder bei Bewegungen der Person müssen außerdem noch alle 50 ms neue Werte bereitgestellt werden. Andernfalls erscheint das System träge. Der Aufwand ist so hoch, daß beim Stand der heutigen Rechentechnik deutliche Abstriche zu machen sind. Näherungsweise ist jedoch eine brauchbare Online-Berechnung möglich.

Beim *Particle Tracing* werden von der Schallquelle (einige 10000) *Schallpartikel* räumlich ausgesendet. Sie werden an den Wänden reflektiert. Je nach dem zurückgelegten Weg und der Wandabsorption verliert jedes Teilchen fortlaufend Energie. Wird eine vorgegebene Schwelle unterschritten, so ist das Teilchen nicht mehr vorhanden. Weiter werden an allen möglichen Hörpositionen *Detektoren* angenommen. Sie erfassen Richtung und Energie der eintreffenden Partikel und bilden daraus eine Statistik. Sie ordnet den Einfallswinkeln zeitabhängige Energien zu. Die Detektoren müssen so dicht beieinander liegen, daß die Statistiken eine zuverlässige Interpolation ermöglichen. Rechenintensiv sind hierbei u. a. Kollisionserkennungsalgorithmen. Sie ermitteln, wo ein Schallteilchen auf eine Wand oder einen Detektor trifft. Der Rechenaufwand ist jedoch nicht durch die Reflexionstiefe, sondern durch die Anzahl der Schallpartikel und Detektoren begrenzt. Z. Z. ist mit dieser Methode keine brauchbare Echtzeitverarbeitung möglich.

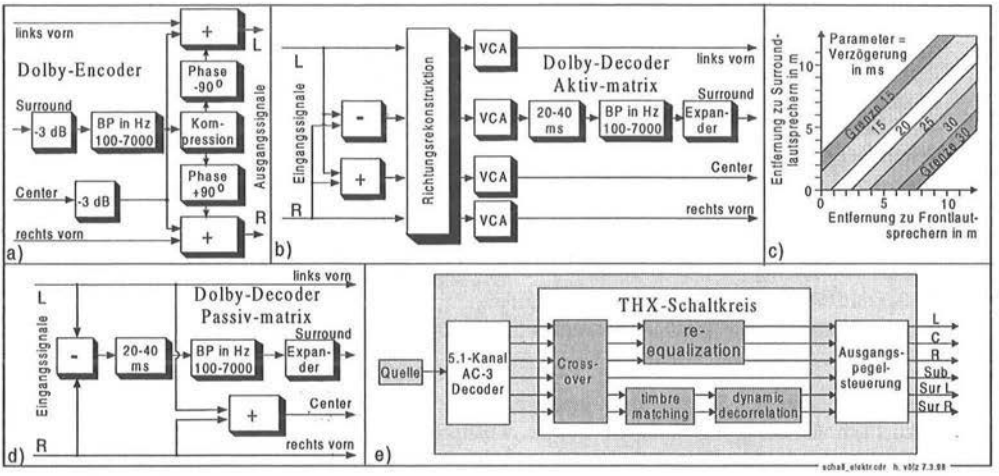


Bild 9.31 Dolby-Surround- und THX-Technik

Schließlich sei noch erwähnt, daß diese Methoden auch recht praktische Bedeutung erlangen. Durch sie ist es z. B. möglich, ähnlich wie bei optischen 3D-Modellen, in die Akustik eines noch nicht erbauten Raumes hineinzuhören und sich darin zu bewegen. Ähnliches ist beim Entwurf komplizierter Beschallungsanlagen möglich.

9.3.10 Etwas Elektronik

Es gibt viele elektronische Methoden, die bei der Schallspeicherung und -wiedergabe angewendet werden. Dazu gehören u. a. die analogen und digitalen Kompressionsmethoden. Entsprechend dem Ziel dieses Buches werden sie jedoch hier nicht behandelt. Erforderlich ist es jedoch, auf jene Verfahren etwas einzugehen, die mit der räumlichen Schallwiedergabe zusammenhängen und bereits zuvor mehr funktionell beschrieben wurden.

Ein großer Vorteil von **Dolby surround** besteht darin, daß es zum üblichen Zweikanal-Stereo abwärts kompatibel ist. Die eigentlichen vier Audiokanäle (L, R, Center, Surround) werden zur Übertragung und Speicherung *analog* in die zwei üblichen Stereokanäle eingebunden und bei der Wiedergabe wieder herausgefiltert. Hierbei wird meist von *Kodieren* gesprochen, obwohl dieser Begriff eigentlich nur für digitale Signale Sinn macht. Diese entsprechenden Verfahren sind relativ einfach (**Bild 9.32**a). Der Encoder (Kodierer) addiert das Center-Signal um 3 dB geschwächt direkt zu den beiden Stereokanälen. Bei der zweikanaligen Stereophonie wird dadurch nur der Mitteeindruck etwas verstärkt. Das Surround-Signal wird ebenfalls um 3 dB geschwächt, zusätzlich aber noch mit einem Bandpaß im Frequenzumfang beschnitten. Erst nach einer zusätzlichen Kompression wird es dann um +90° beziehungsweise -90° – als insgesamt gegenphasig – den beiden Kanälen hinzugefügt. Bei der zweikanaligen Stereophonie ist es daher nicht lokalisierbar, sondern erklingt recht diffus mit.

Für die Dolby-Surround-Decodierung werden der passive und der aktive Decoder – auch Matrix genannt – unterschieden. Den *Passiv-matrix-Decoder* zeigt **Bild 9.31**d. Mittels Addition von links und rechts entsteht das Signal des Mittelautsprechers (Center). Die Subtraktion beider Signale extrahiert ein Signal, das über Verzögerung, Bandpaß (100-7000 Hz) und einer Expanderschaltung zum Surround-Signal aufbereitet wird. Die Verzögerung ist meist einstellbar und kann u. a. zur subjektiven Vergrößerung des Abhörraumes genutzt werden. Die optimale Verzögerung hängt vom Hörabstand zu den Surroundlautsprechern einerseits und zum Abstand zu den 3 vorderen Lautsprechern andererseits ab. Bild 9.31c zeigt hierzu die empfohlenen Werte. Die nochmalige Bandbegrenzung des Surround-Kanals bei der Wiedergabe erfolgt nur, um eventuelle Phasenfehler zu unterdrücken. Sie kön-

nen u. a. bei der Übertragung und Speicherung der hohen Frequenzen zwischen den beiden Stereokanälen auftreten. Der Expander stellt wieder die Originaldynamik des Surroundsignals her.

Ein *aktiver Decoder* enthält zusätzliche Elektronik und verbessert damit die Signalaufbereitung (Bild 9.31b). Von einer komplexen Schaltung werden dadurch zunächst das rechte, das linke, das Summen- und das Differenzsignal analysiert. Das Ergebnis steuert die vier Regelverstärker VCA (voltage controlled amplifier). Erst daran schließt sich die Aufbereitung entsprechend dem Passivmatrix-Verfahren an.

Bei vielen Surround-Decodern sind zusätzliche Einstellmöglichkeiten vorhanden. So lassen sich bestimmte Räume simulieren. Dies erfolgt u. a. durch Änderung des Nachhalls und des Frequenzganges. Diese Verfahren sind dann sogar bei der Wiedergabe üblicher Zweikanal-Stereo-Aufzeichnungen wirksam.

Die relativ einfache Kodierung beim Dolby-Surround bringt u. a. Probleme bei der Kanaltrennung. Durch geringe Phasenfehler kann das Surround-Signal leicht in die L- und R-Kanäle übersprechen. Neben der Aktiv-matrix ist hierbei auch das Pro-Logic-System vorteilhaft. Ist dieses Signal nach der Dekodierung deutlich in einem der anderen Kanäle vorhanden, so regelt der Pro-Logic-Chip die übrigen etwas lauter.

Den vereinfachten Aufbau einer THX-Decodierung zeigt Bild 9.31e. Zunächst werden aus dem Quellensignal die Vorstufen der sechs Signale herausgefiltert. Das Signal für den Subwoofer wird direkt weitergeleitet. Die sonstigen Frontsignale müssen jedoch im Frequenzgang und in der Dynamik aufbereitet werden. Auch die beiden Surroundsignale benötigen eine Frequenzgangkorrektur. Außerdem werden sie noch dynamisch weitgehend unabhängig gemacht. Alle sechs Signale werden schließlich noch einer gesonderten Pegelsteuerung unterzogen.

In der Computertechnik stehen vor allem – wie bereits auf S. 258ff. geschildert – wieder Verfahren zur Raumsimulation von Schall im Vordergrund. Dafür stehen sogar schon die Programmierschnittstellen fest. Bei Windows 95 wird sie „DirectSound" und bei MacOS „SoundSprocket" genannt. Sie erlauben es, für einen Zuhörer mehrere Schallquellen im virtuellen 3D-Raum zu positionieren und zu bewegen. Auch eine gerichtete Schallabstrahlung und die automatische Berechnung des Dopplereffekts sind integriert. Für Reflexionen kommt die Methode der Spiegelschallquellen zur Anwendung. Weiter gibt es VRML (virtual reality modeling language) zur Beschreibung virtueller Umgebungen. Sie könnte sich als plattformübergreifender 3D-Sound-Standard etablieren. Es ist damit aber kein akustisches Rendering möglich. Teile dieser Methoden sind bereits in leistungsfähige Soundkarten neben Dolby pro logic usw. hardwaremäßig integriert. Schließlich seien auch noch Methoden erwähnt, welche eine Verbreiterung der Stereobasis über den R- und L-Lautsprecher hinaus ermöglichen. Hierfür existieren z. B. das SRS (sound retrieval system) von Sony und das SGS von Thomson auch als Schaltkreise. Beim SRS wird für die Signale auch eine Außenohrübertragungsfunktion mit seitlicher Richtung einbezogen. Das Verfahren gilt als relativ unempfindlich bezüglich der Hörposition. Z. T. werden sie sogar bereits beim Fernsehern eingesetzt.

9.3.11 Verwertbare Dynamik

Die vorangegangenen Betrachtungen machten keine Aussage dazu, in welchem Umfang akustische Signale überhaupt zu übertragen bzw. zu nutzen sind. Hierfür ist der Begriff der Dynamik wesentlich. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis vom größt- zum kleinstmöglichen Signalwert (Lautstärke). Da der kleinste Wert überwiegend durch Geräusche und Störungen gegeben ist, wird bei der Dynamik oft der Geräuschspannungsabstand benutzt. Insgesamt sind folgende Dynamikarten zu unterscheiden:

- Die *Originaldynamik* existiert bei den eigentlichen Schallquellen, z. B. im Konzertsaal. Sie ist oft so groß, daß sie alle folgenden Dynamikarten erheblich übertrifft. Im Wohnraum (s. u.) ist sie kaum nutzbar, meist nicht einmal wünschenswert. Deshalb wird sie fast immer bewußt eingeengt.

Alle folgenden Dynamikarten sind technischer Natur und betreffen u. a. Verstärker, Speicher, Mikrophone und Lautsprecher.

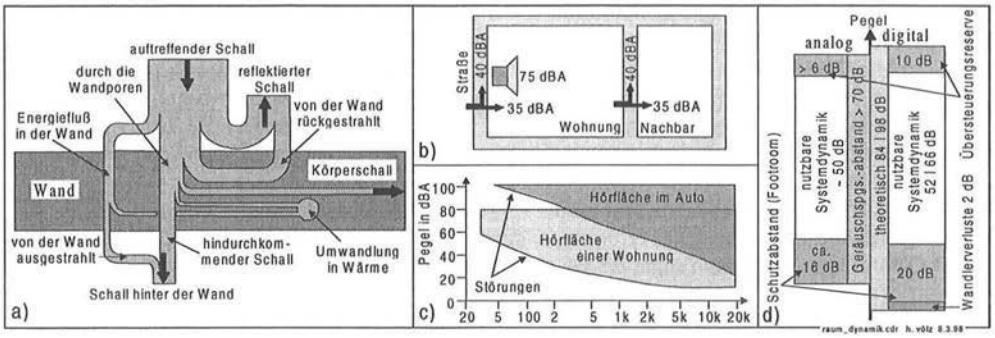


Bild 9.32 Einflüsse auf die Dynamikwerte bei der Schallübertragung und -speicherung

- Die *Systemdynamik* ist das (logarithmische) Verhältnis aus dem maximalen, gerade noch unverzerrt verarbeitbarem Pegel und den Störgeräuschen.
- Die *nutzbare* Systemdynamik ist immer etwas kleiner, da stets Reserven (s. u.) erforderlich sind.
- Die *Aufnahmedynamik* ist noch etwas kleiner. Sie wird nämlich u. a. durch Mikrophonrauschen und akustische Störgeräusche bei der Aufnahme (z. B. Klimaanlage im Studio) zusätzlich eingeengt.
- Nochmals kleiner ist die *Programmdynamik*. Selbst die leisesten Passagen der Musik müssen nämlich noch deutlich über allen Störungen liegen.

In diesen Zusammenhängen wird oft die Leistungsfähigkeit digitaler Verfahren, insbesondere bei der Speicherung, überschätzt. Der Vergleich in **Bild 9.32**d kann das verdeutlichen. Mit guten analogen Studiomaschinen ist ein Geräuschspannungsabstand von reichlich 70 dB erreichbar. Um auch die leisen Stellen brauchbar wiederzugeben, wird meist ein Footroom (Schutzabstand) von etwa 16 dB gewählt. Als Übersteuerungsreserve (Headroom) werden mindestens 6 dB festgelegt. So existiert eine nutzbare Systemdynamik von etwa 50 dB. In der digitalen Technik sind nur nominal deutlich größere Werte zu erreichen. Infolge ihrer typischen Eigenschaften müssen nämlich immer größere Reserven eingehalten werden. Da selbst die kleinste Übersteuerung sofort starke Verzerrungen hervorruft, muß der Headroom deutlich größer sein. Weil auch das Quantisierungsrauschen weitaus störender ist, muß auch der Footroom größer gewählt werden. Schließlich sind wegen der nominell höheren Pegelverhältnisse auch noch Wandlerverluste zu berücksichtigen. So erreicht daher sogar die nutzbare Systemdynamik einer CD nur einen wenig größeren Wert. Bei der digitalen Technik ist aber immer von Vorteil, daß durch mehrfaches Bearbeiten|Kopieren *keine* Verluste auftreten.

Wird Schall in Räumen benutzt, so kommen zu den o. g. technischen Störungen auch noch echte akustische Störungen hinzu. Sie sind wesentlich durch typische Wandeigenschaften bestimmt. Das Schallverhalten an, in und hinter einer Wand faßt Bild 9.32a zusammen. Es dürfte unmittelbar einsichtig sein. Schwieriger ist es jedoch, konkrete Zahlenwerte zu erhalten. Für eine typische Wohnung zeigt dies Bild 9.32b. Die Angaben in dBA betreffen den absoluten Schallpegel, der die Frequenzen der Störsignale zusätzlich nach Filterkurven bewertet (s. S. 52, Bild 4.7b). Hört man also mit 75 dBA, so gelangen bei üblichen Wänden 35 dBA zum Nachbarn. Aber auch von außerhalb der eigenen Wohnung muß man mit Störungen dieser Größenordnung rechnen. Zusammenhänge für die einzelnen Frequenzen zeigt Bild 9.32c. Dabei sind als Beispiele ein Auto im hohen Verkehrslärm und eine übliche Wohnung gewählt. Auch hieraus folgt, warum Bässe so gern überbetont wiedergegeben werden.

9.4 Hardausgabe

9.4.1 Überblick

Schon in Goethes Faust steht: „Denn, was man schwarz auf weiß besitzt, kann man getrost nach Hause tragen". Es ist eben ein deutlicher Unterschied, ob wir etwas einmal hören bzw. kurz – wie im Leben oder am Bildschirm – an uns vorüber ziehen lassen oder ob wir es immer wieder erneut lesen und betrachten können. So erfand die Menschheit das Festhalten|Speichern von Informationen. Zum tieferen Inhalt dieser Aussage wird etwas mehr im 10. Kapitel gesagt. Hier sei zunächst das allgemeine Prinzip mittels **Bild 9.33** gezeigt. Damit Information beständig erhalten bleibt, muß sie einen stofflichen|materiellen Träger verändern. Dies kann unterschiedlich erfolgen. Es kann Material (Druckerschwärze) fest aufgetragen oder eine Inschrift in einen Stein gemeißelt werden. Das Material kann auch verformt oder in seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften lokal verändert werden. Diese Prozesse können sowohl rein manuell – wie es heute zumindest noch bei vielen Künstlern geschieht – oder auch betont technisch gesteuert erfolgen. In jedem Fall liegt dann eine Speicherung vor. Als Besonderheit für diesen Abschnitt gilt, das Ergebnis muß für den Menschen unmittelbar sichtbar | lesbar sein. Für die entsprechenden Prozesse – insbesondere im Sinne der weiteren Betrachtungen – können dann die folgenden Möglichkeiten unterschieden werden:

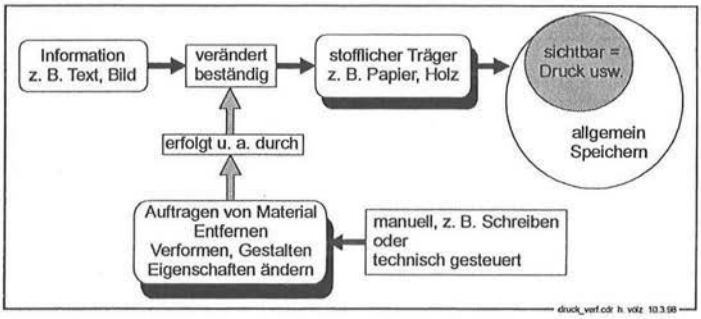


Bild 9.33 Grundprozesse beim Druck

- *manuelles* Schreiben, Zeichnen und Gestalten (wird nicht weiter behandelt),
- *Massendruck* (auch Buchdruck genannt. Er ist bestimmt durch große Auflage und erzeugt Büchern, Zeitschriften, Zeitungen usw.),
- *Photographie* und Filmtechnik (als Beispiele sind auf S. 185ff. die digitale Kamera und Photographie behandelt worden),
- Benutzung der *Schreibmaschine* (wird hier im Buch nicht behandelt),
- *Bürokopiertechnik* (wird hier auch nicht weiter behandelt),
- Netzwerk- und *Großdrucker*,
- Einzelplatz- bzw. *persönliche Drucker* und
- *Plotter*.

Wie wichtig der Menschheit solche Verfahren schon immer waren, zeigt auch die lange geschichtliche Entwicklung. Schon vor 50 000 Jahren schufen Menschen in Höhlen beeindruckende Zeichnungen. Erst viel später kam die Schrift hinzu. Schon im Mittelalter gab es „einfache" Druckverfahren. Der um 1440 von Gutenberg entwickelte Druck mit beweglichen Lettern wird dann allgemein als völlig neue Epoche der Zivilisation gepriesen. Von hier ab soll die Geschichte nun etwas detaillierter betrachtet werden. **Bild 9.34** (nächste Seite) zeigt dazu die relative Anwendungsbreite von vier wichtigen, o. g. Verfahren. Beide Achsen sind logarithmisch geteilt, die Zeitachse rückwärts zählend. Die nächste größere Etappe beginnt um 1850 mit der Einführung der Schreibmaschine und zwar etwa gleichzeitig mit der Photographie. Durch beide konnte erstmals gespeicherte Information in größerer

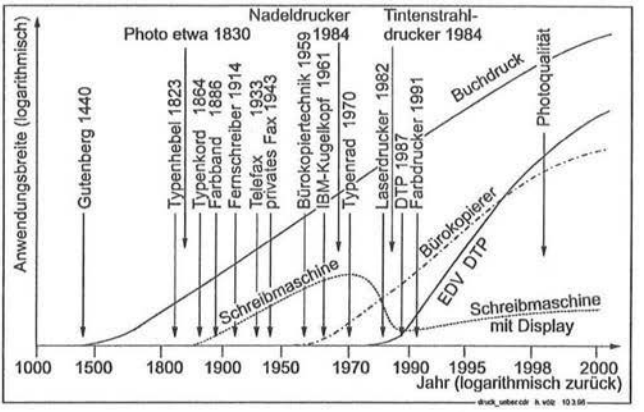


Bild 9.34 Verlauf der Entwicklung bei der Hardausgabe

Anzahl individuell erzeugt werden. Im Höhepunkt ihrer Anwendungen entstehen der Kugelkopf von IBM und das Typenrad (s. S. 278ff.). Eine völlig neue und vom vorangegangenem unabhängige Technologie ist die Bürokopiertechnik (Xeropraphie). Sie wird ab 1959 und etwa ab 1975 in sehr großen Stückzahlen produziert. Sie ermöglicht erstmals eine schnelle und effektive Vervielfältigung beliebiger, vorhandener Dokumente. Sie beeinflußt kaum die weiter zunehmende Anwendungsbreite der Schreibmaschine. Dies ändert sich erst mit der Rechentechnik und insbesondere mit dem DTP (desk top publishing). Die Voraussetzungen hierfür waren einerseits eine relativ leistungsfähige Rechentechnik und andererseits die Verfügbarkeit von elektronisch steuerbaren Druckern mit hoher Qualität und Geschwindigkeit. Einfache Formen elektrisch steuerbarer Drucker (abgewandelte Schreibmaschinen) gab es allerdings schon ab den 20er Jahren für das Fernschreiben und später für Telex und Fax. Doch für das DTP, das von Beginn an als Alternative zum Massendruck konzipiert war, sind andere Qualitäten erforderlich. So gab es bereits klägliche Versuche mit Nadeldruckern. Doch den Anfang bestimmen die Laserdrucker. Später kamen andere Varianten, wie die Tintenstrahldrucker hinzu. Diese Technikentwicklung bewirkte zunächst einen Riesenverfall für die Schreibmaschine. Für einige Personen bzw. Aufgaben ist der Rechner zu kompliziert. Dazu zählt u. a. auch das Ausfüllen von vorgedruckten Formularen. So erholte sich die Produktion von Schreibmaschinen in etwas abgewandelter Form. Neue Möglichkeiten sind z. B. Speicherung auf Disketten und anzeigendes Display für mehrere Zeilen. Wie schon mehrfach hingewiesen, geht eine breit eingeführte Technik eben nie ganz ein. Sie bleibt, wie hier die Schreibmaschine, in Spezialgebieten bestehen. Eine wiederum neue Technik erreicht Photoqualität auch mit privaten Druckern. Ob dies wesentlich die klassische Photographie beeinflußt, ist noch nicht abzusehen. Die Aufnahmetechnik ist im Prinzip ja schon vorhanden.

Heute liegt eine so große Vielfalt von Hardausgabeverfahren vor, daß es selbst für Spezialisten schwierig ist, einen vollständigen Überblick zu besitzen. Daher ist keine allgemein gültige Systematik vorhanden. Das **Bild 9.35** ist folglich als ein Versuch anzusehen. Es berücksichtigt drei wichtige Funktionen bzw. Eigenschaften. Die *Struktur der Veränderung* betrifft den Aufbau bzw. die Erzeugung einer Druckseite. Einmal kann sie komplett in ihrer Ganzheit auf das Grundmaterial übertragen werden. Buchdruck, Kopiertechnik und Photographie seien als wichtige Beispiele genannt.

Weiter kann der Aufbau der Seite aus einzelnen (bis zu etwa hundert) *ausgeformten* (ganzheitlichen) *Zeichen* erfolgen. Das geschieht z. B. mit der Schreibmaschine über die Zeichen auf den Typenhebeln. Hierfür wird oft die Abkürzung FFC (fully formed character) benutzt. Durch den auswechselbaren Kugelkopf von IBM und dem späteren Typenrad wurde ein zusätzlicher manueller Wechsel zwischen einigen Varianten möglich. Mit dieser Methode lassen sich auch (einfache) Graphiken erzeugen. Dies geschah vor allem in der Anfangszeit der Rechentechnik. Dabei entstanden auch ernst zu nehmende (künstlerische) Techniken, die vielfach der Kreuzstichtechnik (Sticken) ähneln. Sie wurden u. a. für individuelle Glückwünsche benutzt und finden auch heute noch hin und wieder Anwendung. **Bild 9.36**a (übernächste Seite) zeigt das stark vereinfacht am Beispiel des Buchstaben „A". Für alle Zeilen wird also die gleiche, aber frei definierbare Textkette verwendet. Davon werden zur Bilderzeugung einzelne Zeichen ausgeblendet. Für die Buchstaben ist entweder ein fixer Font (hier Courier) notwendig oder es müssen die Buchstaben mit Sondermaßnahmen genau positio-

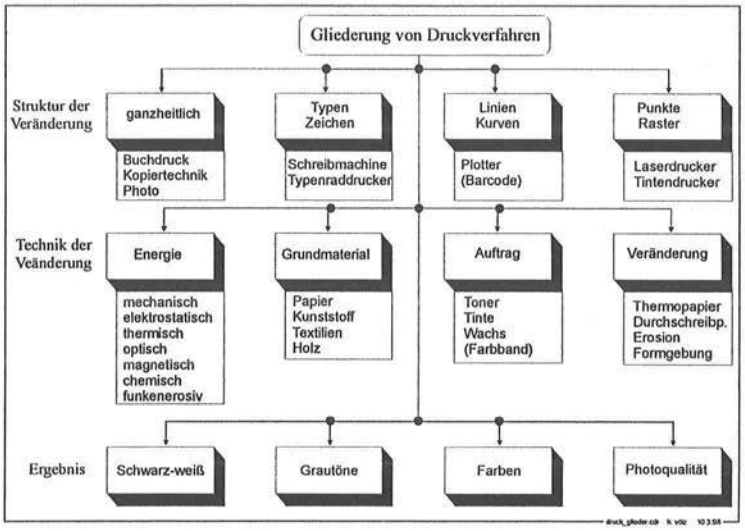


Bild 9.35 Einteilung von Druckverfahren

niert werden (z. B. per Postskript). Das Bild 9.36b zeigt das Beispiel einer so generierten Textgrafik. Der Größe wegen sind hier die Buchstaben durch ein schwarzes Raster ersetzt [VÖLC].

Eine variablere Ausgabe ist mit Plottern möglich. Sie zeichnen *Linien* und füllen Flächen mit *Schraffur*. Diese Technik ist heute vor allem noch im CAD-Bereich üblich, ja notwendig (s. S. 281f.). Hierzu gibt es z. B. die Sprache HPGL (Hewlett Packard Graphic Language). Teilweise basieren hierauf fast alle Vektorgraphiken. Diese Technik ermöglicht es nämlich, sehr große Formate mit vielen Details auszugeben. Deswegen ist sie auch heute bei einigen Anwendungen, z. B. Layout von Schaltkreisen der Mikroelektronik und bei Leiterplatten unentbehrlich. Der Barcode ist schließlich eine stark vereinfachte Variante.

Die heute am meisten benutzte Technik gibt *einzelne Punkte* aus, die so fein sind, daß sie das Auge nicht mehr einzeln erkennt. Ihre Verteilung und Größe verschmelzen daher zum Bild|Text. Auf sie wird noch genauer eingegangen (s. S. 269ff.).

Der zweite Klassifizierungspunkt in Bild 9.35 betrifft die verschiedenen *Techniken*. Dabei sind vier Teilaspekte zu betrachten (vgl. auch oben Bild 9.33):

- Für die Veränderung ist *Energie* erforderlich. Damit hängt auch das angewendete *Handwerkszeug* zusammen. Ging man ursprünglich vor allem mechanisch mit Meißel, Pinsel, Feder (ursprünglich Gänsekiel) oder Bleistift vor, so zählen heute die betont elektronisch steuerbaren Verfahren.
- Es muß ein *Medium* (Grund- oder Basismaterial) existieren, auf dem die schriftliche oder bildliche Aufzeichnung erfolgt. Anfangs war es Stein. Die Ägypter verwendeten Papyrus, das aus der gleichnamigen Pflanze erzeugt wurde. Auch auf Tierhäuten wurde geschrieben. Erst relativ spät setzte sich das Papier durch. Heute sind vor allem noch Kunststoffe hinzugekommen.
- Es muß ein *Farbstoff* (Tinte, Toner usw.) zum Aufbringen benutzt werden.
- In Sonderfällen kann auch das Medium verändert werden.

Die letzte Unterteilung in Bild 9.35 betrifft das *Ergebnis* in der Vielfalt der Farben. Hierzu sind schon recht umfangreiche Aussagen auf den Seiten 30ff. und 40 ff. gemacht worden. Sie betreffen vor allem die verschiedenen Farbmodelle, z. B. Bild 3.20 auf S. 40. Die Systematik der Bilder wird ergänzend auf Seite 178 behandelt.

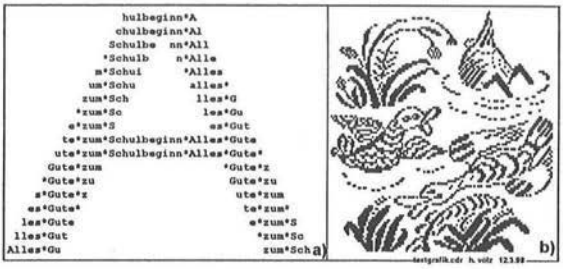


Bild 9.36 Beispiele für Textgrafik.
a) Erzeugung des Buchstaben A mit dem Text „`Alles*Gute*zum*Schulanfang*`"
b) Textgrafik „Enten" von Ruth Völz, hier nur als Raster gezeigt.

9.4.2 Bilderzeugung aus Punkten

Selbst im hier behandelten Fall der Hardausgaben mit einzelnen Punkten gibt es sehr viele Varianten zur Erzeugung von Bildern, Texten usw. Sie bedingen folglich auch recht unterschiedliche Eigenschaften, u. a. bezüglich der Auflösung und der Farbausgabe. Einige Unterschiede hierzu sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Technik / Eigenschaft	Film, Photo	Bildröhre, Farbdiffussion	klassischer Buchdruck	RET usw.; (nur als Zusatz)	Laser-, Tintenstrahldrucker
Steuerung der Intensität	Farbdichte	Farbdichte	Größe	Ergänzung	Dithering
Größe der Pixel	(variabel)	konstant	variabel	z.T. variabel	konstant
Pixel : Druxel	1	1	1	ohne	⇒Kontrast
Anordnung der Pixel	zufällig	konstant	konstant	zugeordnet	Druxel konstant

Beim Film und Photo sind die einzelnen Bildpunkte infolge der Herstellungsverfahren relativ zufällig verteilt. Für alle anderen technischen Verfahren liegt dagegen das Raster für die Druckerpunkte (dot, Pixel) genau fest. Hierdurch tritt wesentlicher leichter ein Moirè auf. Der Abstand der Druckerpunkte wird meist als Auflösung $A_{Drucker}$ in dpi (dot per inch) angegeben. Sie kann in horizontaler und vertikaler Richtung unterschiedlich sein. Eine deutsche Bezeichnung – etwa Punkte (dot) je mm – hat sich bisher, obwohl es für uns viel anschaulicher wäre, nicht durchsetzen können. Die Mehrzahl der elektrisch steuerbaren Drucker entsprechen der letzten Spalte: Bei ihnen können weder die typische Größe des einzelnen Druckpunktes noch dessen Helligkeit | (Prozeß-)Farbe geändert werden. Sollen Bilder mit örtlichen Helligkeits-|Farbstufungen gedruckt werden, so ist ein Dithern erforderlich (s. S. 42ff.). Die Ditherzelle besteht dabei aus n Pixel (Druckerpunkte). In Anlehnung an den Begriff Pixel (picture element) ist es daher sinnvoll, diese Zelle als Druxel (Drucker-Element = gedruckter „Punkt" eines Bildes aus mehreren Druckerpunkten) zu bezeichnen. So ein Druxel ermöglicht dann auch n Helligkeitsstufen. Für die Speicherung erhöht sich der Aufwand um den Faktor

$$s = \{\mathrm{ld}(n)\}.$$

Je Druxel sind also s Bit erforderlich. ld bedeutet den Logarithmus zur Basis 2. Die geschweiften Klammern weisen darauf hin, daß die nächstgrößere ganze Zahl zu wählen ist. Die Auflösung (Rastermaß R oder kurz auch Raster, z. B. 60er Druckraster) des *erzeugten* Bildes ist dann natürlich deutlich geringer als die Druckerangabe in dpi. Sie wird vielfach in lpi (lines per inch) angegeben. Sofern die n Pixel je Druxel in beide Richtungen gleich verteilt sind, gilt dann

$$R = \frac{A_{Drucker}}{\sqrt{n}}.$$

Diese Beziehung ist die Grundlage des Nomogramms von **Bild 9.37**a. Darin können zwei Werte dieser Gleichung durch eine Gerade verbunden werden. Ihr Schnittpunkt auf der dritten Leiter gibt dann die dritte zugehörige Größe an. Ein Beispiel ist im Bild durch die gestrichelte Linie eingetragen. Bei einer Farbausgabe gibt es für jede der drei (vier oder mehr) Prozeßfarben einen Kontrast. Deshalb wurden im Nomogramm zusätzlich die zugehörenden, größeren Bitwerte eingetragen. Entsprechend den gebräuchlichen Normen muß nicht immer genau der dreifache Wert für die Bit je Pixel (Druxel) genutzt werden. Darauf beziehen sich die Klammerwerte.

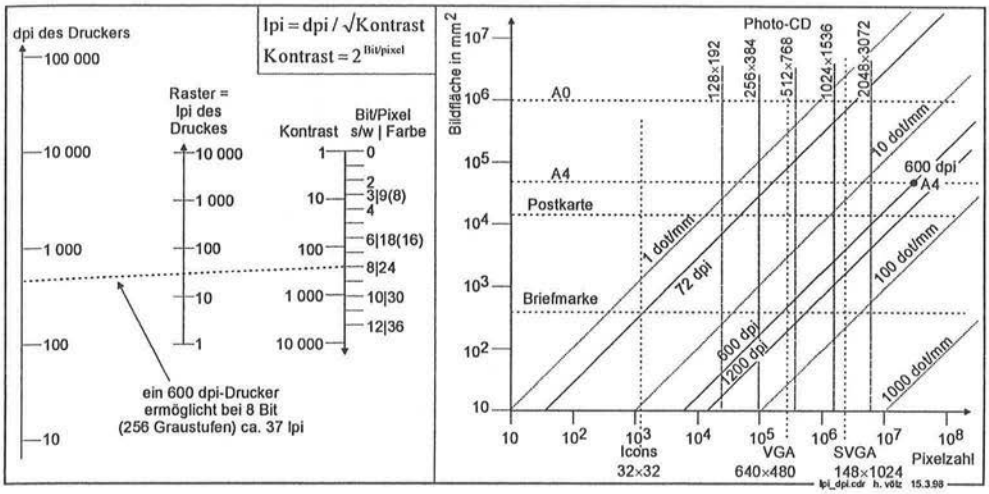


Bild 9.37 Zusammenhängen beim Dithern mit Druckern

Wie die Tabelle auf der linken Seite zeigt, ist Dithern für Film, Photo, Bildröhre, Farbdiffusionsverfahren (s. S. 276f.) und klassischem Buchdruck nicht erforderlich. Es stimmt die Größe der Bildpunkte (druxel) mit der Größe der (Drucker-)Punkte (dot, Pixel) überein. Beim Buchdruck wird hierzu die Größe des Bildpunktes geändert, bei den anderen ihre Helligkeit | Absorption. Daher ergeben sich für Ausgaben mit und ohne Dithern oft Umrechnungsschwierigkeiten. Sie betreffen meist die Zusammenhänge zwischen Dateigröße im Speicher, Pixelanzahl auf dem Bildschirm und den Druck auf einer Fläche mit bestimmter Auflösung in lpi bzw. dpi. Einen graphischen Überblick gibt hierzu das Bild 9.37b. Für die Dateigröße ist die angegebene Pixelzahl noch mit der Bittiefe zu multiplizieren.

Das in der Tabelle (links) erwähnte RET (resolution enhancement technology) betrifft nur mittelbar die Bildauflösung. Es dient vielmehr dazu, einige Störeffekte des Rasterns, wie die störende Treppenbildung bei schrägen Linien, zu reduzieren. Es wurde erstmals bei HP-Laser-Druckern angewendet. Ein spezieller Prozessor ermöglichte ursprünglich zwei und heute fünf Größen der Druckpunkte. (**Bild 9.38**). Sie werden aber nur zu diesem Glätten von Linien usw. angewendet. Andere Hersteller haben dieses Prinzip etwas verändert und dann mit eigenen Namen versehen. OKI und Sharp nennen es smoothing technology, NEC S.E.T. (sharp edge technology) und Epson RIT (resolution improvement technology).

Beim Farbdruck treten weitere Einflüsse auf. Für den Bildschirm gilt die additive Farbmischung (vgl. Bild 3.17, S. 37). Wie links oben im **Bild 9.39**a (umseitig) gezeigt, wirken dabei die drei Leucht-

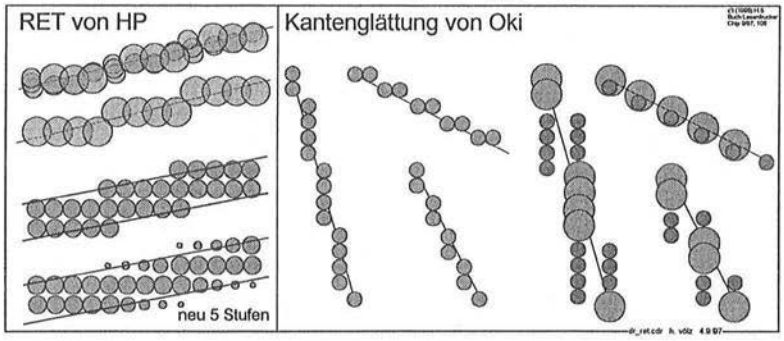


Bild 9.38 Beispiele für Kantenglättungsverfahren

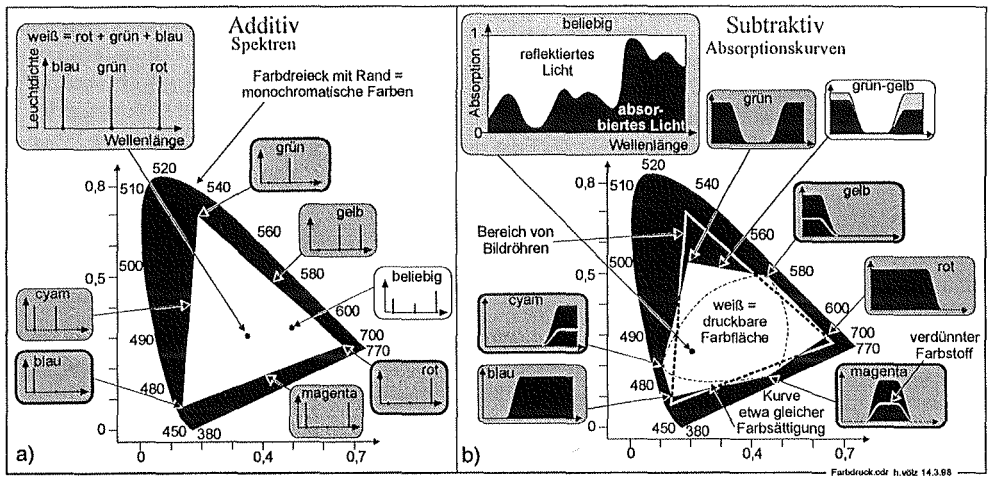


Bild 9.39 Zur Erklärung der Farben beim Druck

stoffe für rot, grün und blau zusammen. Sie erzeugen im hufeisenförmigen Farbbereich (vgl. S. 38 Bild 3.18) eine Dreiecksfläche aller so darstellbaren Farben. Die Ecken des Dreiecks entsprechen jenen Farben, die dann entstehen, wenn nur jeweils ein einziger Farbstoff angeregt wird. Zur besseren Erkennung sind die zugehörigen Spektren *dick* umrandet. Diese Punkte liegen immer etwas vom Rand der Hufeisenkurve entfernt. Die Leuchtstoffarben sind nämlich nie ganz monochromatisch (spektralrein). Leuchten zwei Farbstoffe, so befindet sich der Farbort auf den Verbindungslinie der zugehörigen beiden Dreickspunkte. Bei etwa gleicher Helligkeit liegt der Punkt in der Mitte. So ergeben sich die drei Mischfarben cyam, gelb und magenta. Bei gleicher Helligkeit aller drei Farben entsteht unbunt (weiß). Ein beliebiges Verhältnis der drei Leuchtstoffarben ergibt irgendeinen Punkt in der Fläche des Dreiecks.

Druckpigmente sind, wie generell Farbstoffe, nicht durch Spektren, sondern durch Absorptionskurven (vgl. S. 34ff., z. B. Bild 3.16 auf S. 36) gekennzeichnet. Aus dem „weißen Umgebungslicht" absorbieren sehr unterschiedlich einzelne Wellenlängen. Das Beispiel einer möglichen Kurve zeigt das Teilbild links oben im Bild 9.39b. Die Prozeßfarben, mit denen also der Druck erzeugt wird, besitzen spezielle Absorptionskurven (vgl. subtraktive Farbmischung Bild 3.17 auf S. 37). Den typischen Verlauf zeigen die wiederum dick umrandeten Kurven von gelb, cyam und magenta. Auch diese Farben entsprechen – bei weißer Beleuchtung – einem Punkt in der Hufeisenkurve. Sie liegen noch weiter als beim Bild 9.39a vom Rand der Hufeisenkurve entfernt. Das von der Absorption übrig gebliebene Licht enthält ja relativ viele Spektralanteile. Die verschiedenen Mischungen der Farbstoffe ermöglichen nur die weiß gezeichnete Fläche. Sie ist jetzt kein Dreieck mehr, sondern ein Sechseck (vgl. Bild 3.18, S. 38). Werden zwei Farben, z. B. gelb und cyam, gemeinsam aufgetragen, so entsteht grün. Das Spektrum des übrigbleibenden Lichtes ist dabei deutlich schmaler, als bei jeder Farbe allein. Durch die Mischung wird also die Farbsättigung größer. Zur Verdeutlichung wurde in Bild 9.39b eine strichpunktierte Linie für die Orte etwa gleicher Farbsättigung eingezeichnet. Für eine Mischung aus zwei Farben liegt der Farbort also immer näher an dem Rand der Hufeisenkurve. Grün befindet sich folglich „oberhalb" der Verbindungslinie von cyam und gelb und auch oberhalb der Kurve gleicher Farbsättigung. Jede mögliche Mischung der beiden Farbstoffe ergibt einen Farbort auf der geknickten Verbindungslinie von cyam und gelb. Ein Beispiel dieser Art – mit stärker Absorption durch den gelben Farbstoff – zeigt das Beispiel grün-gelb.

In den letzten Jahren wurden für höhere Farbqualität fünf bzw. sechs Prozeßfarben eingeführt. Die zusätzlichen Druckerfarben (Tinten) sind bezüglich der anderen Farben jedoch *nur* „verdünnt". Sie absorbieren also schwächer Licht. Bei den Absorptionskurven der Prozeßfarben ist dies durch die

zusätzlichen weißen Kurven angedeutet und bei magenta auch gekennzeichnet. Die Farborte der verdünnten Farben liegen näher bei unbunt (Zentrum des Sechsecks). Sie gewinnen besonders beim Dithern an Bedeutung. Dann ermöglichen sie für Flächen mit geringer Farbdichte mehr Druckerpunkte. Dadurch wird das Raster bei hellen (pastellnen) Farben weniger auffällig.

9.4.3 Laserdrucker

Laserdrucker sind besonders komplizierte Drucker. Sie benötigen eine sehr präzise, komplexe Mechanik und eine umfangreiche Elektronik. Ihr Prinzip geht aus **Bild 9.40**a (umseitig) hervor. Das Licht des Lasers kann über die Elektronik in weniger als einer µs ein- und ausgeschaltet werden. Eine Optik fokussiert den Strahl auf die Oberfläche der Photo-Trommel. Durch den gleichmäßig rotierenden Polygonspiegel wird das Licht mit konstanter Geschwindigkeit über die Breite der Photo-Trommel abgelenkt. Um dabei die Fokussierung auf der Trommel zu erhalten, erfolgen meist zwei Maßnahmen. Einmal wird der Weg vom Laser zur Trommel recht lang gemacht. Um dabei jedoch nicht die Abmessungen des Gerätes und seine mechanische Stabilität ungünstig zu beeinflussen, erfolgt eine zweimalige Umlenkung durch Spiegel. Ein Spiegel hiervon ist gekrümmt und gleicht so den Rest der Wegdifferenz aus. Damit nicht nur eine Linie geschrieben wird, muß auch noch die *Photo-Trommel* rotieren. Sie ist eine besonders wichtige Baueinheit jedes Laserdruckers. Ihr halbleitenden Material besitzt viele Haftstellen für elektrische Ladungen, also Elektronen und Löchern (dort fehlen Elektronen). Früher enthielt sie wenig umweltfreundliche Tellur-Selen-Schichten. Heute werden OPC-Trommeln (organic photo conductiv = organisches photoleitendes Material) verwendet. Sie sind ungiftig und biologisch abbaubar. Die Oberfläche dieser Trommeln muß sehr gleichmäßig und fehlerfrei sein. Während des Druckens speichert sie nämlich das „Bild" über elektrische Ladungen. Sie bestimmt also ganz wesentlich die Qualität. Mittlerweile kann sie recht preiswert produziert werden. Daher wird sie bei vielen Druckern als Einheit mit dem Toner – weit vor ihrer Unbrauchbarkeit – ausgetauscht. Natürlich entfällt dadurch auch der manuelle und unangenehme Umgang mit dem Toner. Der *vollständige Druckprozeß* besteht aus mehreren Teilschritten. Sie sind auch in den Bildern 9.39b bis g dargestellt und werden nachfolgend noch genauer erklärt.

- Mit dem Lade-Coroton wird die Photo-Trommel gleichmäßig aufgeladen.
- Über die Belichtungseinheit (Bild 9.40a) werden Punkte auf der Trommel entladen.
- Beim Entwickeln wird an den geladenen Stellen Toner auf die Trommel gebracht.
- Mittels des Transfer-Corotrons wird der Toner auf das Papier übertragen.
- Durch Druck und Temperatur wird der Toner auf dem Papier fixiert.
- Abschließend wird die Trommel von eventuellen Tonerresten gereinigt.

Das *Lade-Corotron* besteht aus einem dünnen Wolframdraht, der in der Längsachse der Trommel ausgespannt ist. Durch eine hohe Spannung von einigen kV entsteht eine stille Gasentladung. Sie überträgt Ladungsträger auf die Trommel. Sie verbleiben an den Haftstellen des Halbleitermaterials. Leider entsteht bei dieser Gasentladung auch immer etwas *Ozon*. Durch die zugeführte elektrische Energie werden die O_2-Moleküle der Luft zu O_3-Molekülen umgebaut. In der Stratosphäre ist Ozon für das irdische Leben notwendig (Ozonloch!). In sehr kleinen Mengen riecht das farblose Gas angenehm frisch. Die Schwelle hierfür liegt bei 0,01 ppm (parts per million, Volumenverhältnis zu einer Million). Bei höheren Konzentrationen riecht es stechend (elektrisch). Ab etwa 0,1 ppm reizt es die Schleimhäute des Rachens und der Nase. Ab etwa 0,5 ppm werden auch die Augen und Atemwege beeinflußt. Es treten Husten, Müdigkeit und Kopfschmerzen auf. Ozon ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 11 Minuten wieder zu Sauerstoff O_2. Nach einer Stunde ist also nur noch ein 50stel vorhanden. Für Arbeitsplätze ist im Mittel über einen achtstündigen Arbeitstag eine Konzentration von maximal 0,1 ppm zugelassen. Typische Werte für moderne Drucker liegen bei 0,003 ppm, für ältere bei 0,07. Außerdem wird die Corona-Enladung nur während des Druckens eingeschaltet. Zusätzlich kann der Ozonanteil durch Lüften des Arbeitsraumes und etwas feuchte Luft (rel. Feuchte ≥ 40 %) gesenkt werden. Da Ozon auch keimtötend wirkt, wurde er in 50er Jahren bewußt zur Luftverbesserung eingesetzt.

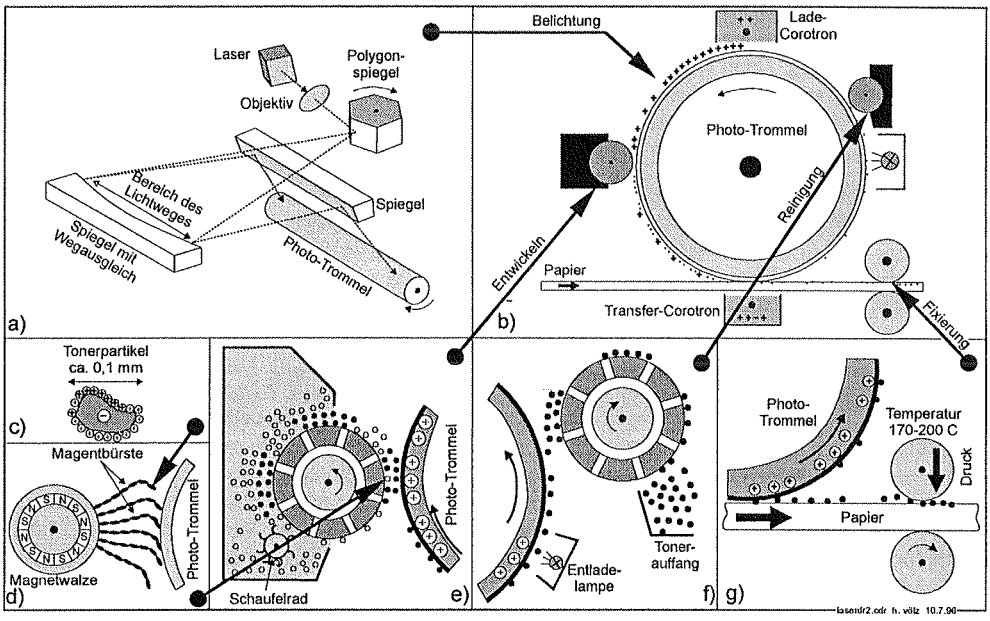


Bild 9.40 Funktionsweise und Aufbau eines Laserdruckers

Bei der *Belichtung* trifft der Laserstrahl auf die halbleitende Photo-Trommel. Dabei erzeugt seine Energie Ladungsträger, welche die vom Lade-Corotron vorhandene Ladung kompensieren.

Beim *Entwickeln* wird auf die noch geladenen Stellen der Phototrommel selektiv Toner übertragen. Dieser Prozeß ist in den Bildern 9.39 c bis e genauer dargestellt. Im Vorratsbehälter (Bild 9.40e) lockert das Schaufelrad den Toner auf. Dabei wird etwas Toner auf die sich gleichmäßig drehende Magnetwalze gebracht (Bild 9.40d). Da der Toner (Bild 9.40c) auch magnetische Eigenschaften besitzt, bildet sich durch die Magnetpole der Walze eine „Magnetbürste" aus. Sie reicht bis zur Photo-Trommel. Hier ist die elektrostatische Kraft höher als die magnetische der Magnetwalze. Daher gehen die Tonerpartikel zu den geladenen Stellen der Phototrommel über. Neben der Entwicklung mit der „Magnetbürste" ist auch die Entwicklung mit Hilfe einer Tonerkaskade gebräuchlich. Dabei wird der Toner zunächst an kugelförmige Trägerpartikel mit 0,1 bis 0,2 mm Durchmesser angelagert. Diese Mischung wird dann nach dem Prinzip des Schaufelradbaggers auf die Kopierwalze transportiert.

Diese Prozesse ergeben sich nur aus dem sehr spezifischen *Aufbau des Toners*. Er bestimmt außerdem auch wesentlich die Druckqualität und besteht meist aus einem Gemisch von feinstem Kohlenstaub und thermoplastischem Kunststoff. Zur Übertragung enthält er Trägerpartikel, z. B. etwa 0,1 mm große Eisenpartikel oder „Mikroträger" aus Kunstharz und ferromagnetischem Material. An ihnen haftet das Tonerpulver durch eine eletrostatische Ladung, die sich bei der gegenseitigen Reibung ausbildet. Daher sind die Trägerpartikel mit einer dünnen Tonerschicht bedeckt.

Beim *Übertragen* gelangt das Papier mit der Photo-Trommel in Kontakt. Das Tranfer-Corotron erzeugt eine Ladung und bewirkt so, daß der Toner auf das Papier überwechselt. Anschließend gelangt das Papier zur *Fixiereinheit* (Bild 9.40g). Die obere Fixierwalze ist auf etwa 170 bis 200 C aufgeheizt. Dabei schmelzen Kunststoffpartikel des Toners und fixieren ihn auf dem Papier. Der Druck gegen die zweite Walze bewirkt außerdem, daß die Partikel etwas in das Papier hineingedrückt werden. Daher erreichen Laserdrucker die Urkundenechtheit.

Nach der Übertragung des Toners auf das Papier verbleiben auf der Photo-Trommel Reste von Ladung und Toner. Für den erneuten Prozeß ist also eine *Reinigung* erforderlich (Bild 9.40f). Mit einer Halogenlampe wird die Trommel vollständig entladen. Eine zweite Magnetwalze oder ein

Kunststoffschaber entfernen die Tonerreste. Sie gelangen in den *Tonerauffangbehälter*, können aber wegen Verunreinigungen nicht wieder verwendet werden. Nach der Reinigung steht die Trommel für die weitere Aufzeichnung wieder zur Verfügung. Die heutigen Trommeln besitzen einen so kleinen Durchmesser, daß mehrere Umdrehungen für ein Bild erforderlich sind.

Die *Erzeugung des virtuellen Bildes* auf der Phototrommel erfolgt sowohl durch die Rotation des Polygonspiegels als auch der Phototrommel. Damit ein geometrisch korrektes Bild entsteht, müssen diese Vorgänge sehr präzise und genau aufeinander abgestimmt erfolgen. Hierzu ist das folgende notwendig:

- Der Polygonspiegel muß optisch möglichst exakt sein.
- Die Phototrommel und der Polygonspiegel müssen sehr gleichförmig rotieren.
- Es dürfen keine mechanischen Erschütterungen, unerwünschte Schwingungen oder thermische Verlagerungen auftreten, welche die optischen Einheiten beeinflussen.

Diese hohen Forderungen bedingen

- sehr enge Toleranzen bei der Fertigung und sehr hohe mechanische Stabilität (führt wesentlich zu der beachtlichen Masse und dem relativ großen Volumen),
- für eine vollständige Druckseite einen streng kontinuierlichen und nicht unterbrechbaren Ablauf aller Prozesse (jede Unterbrechung der Bewegungen würde Geometrieverzerrungen zur Folge haben) und
- eine umfangreiche Elektronik mit hoher Rechenleistung und großer Speicherkapazität. Sie hat u. a. die Daten für die Laserdiode kontinuierlich bereitzustellen (s. u.).

Deshalb existiert meist eine *Zweiteilung in der Produktion.* Nur wenige Hersteller, wie Canon, Konica, Kyocera und TEC beherrschen die optischen und mechanischen Fertigungstoleranzen. Sie produzieren die sogenannte, bisher beschriebene Engine (Druckwerk), die kaum Elektronik enthält. Die meisten Laserdruckerfirmen bauen dann dazu die Elektronik, das Gehäuse mit der Bedienung und weiteren Ergänzungen. Auch von ihr wird höchste Leistung verlangt. Die vom Rechner übertragenen Daten entsprechen fast nie der Pixelstruktur für die Trommel, d. h. dem endgültigen Druckerbild. Sie müssen vielmehr erst in einem meist rechenaufwendigen Prozeß dazu aufbereitet und dann im Speicher des Druckers abgelegt werden. Nur dann können sie beim Drucken schnell genug zur unterbrechungsfreien Steuerung des Laserstrahles benutzt werden. Daher sind eine Speicherkapazität von mehreren MByte und ein schneller RISC-Prozessor (RIP = raster image processor) erforderlich.

Die geschilderten Zusammenhänge erklären, warum nach dem *Start eines Druckvorganges* beim Laserdrucker zunächst scheinbar nichts geschieht. Auch wenn schon alle Daten übertragen sind, beginnt der Druck noch nicht. Sie müssen ja erst noch paßgerecht aufbereitet werden. Dann aber ist der Laserdrucker beachtlich schnell. Nur hierauf beziehen sich die Firmendaten der Druckerleistung im Bereich von 4 bis 15 Seiten je Minute. Sie gelten also nur für den Fall, daß eine Druckseite schon aufbereitet im Speicher des Druckers vorhanden ist und dann *unverändert* nacheinander mehrfach ausgegeben wird. Die Übertragung und Aufbereitung der Daten für eine einzelne, komplexe Grafikseite kann dagegen durchaus mehrere Minuten dauern.

Eine weitere Besonderheit des Laserdruckers ist bei seinem *Einschalten* zu beachten. Zunächst testet dann sein Prozessor die meisten Baueinheiten auf ihre Funktionsfähigkeit. Parallel wird die Fixiertrommel aufgeheizt. Dann wird der Toner mit dem Schaufelrad umgewälzt. Bis diese Vorgänge abgeschlossen sind, können durchaus mehrere Sekunden bis wenige Minuten vergehen. Erst dann kann der Drucker Daten übernehmen. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, einen Laserdrucker während der Arbeitszeit in Bereitschaft (Standby) laufen zu lassen bzw. nicht für den Druck weniger Seiten getrennt ein - und auszuschalten.

Laser-Drucker verbrauchen recht viel Energie. Beim Druck steigt dieser Verbrauch noch einmal stark an. Deshalb benötigen sie zur Kühlung ein *Ventilator*. Bei einigen Engines verursacht er leider ein beachtliches Geräusch, das vielfach die Lautstärke des Druckvorganges deutlich übertrifft.

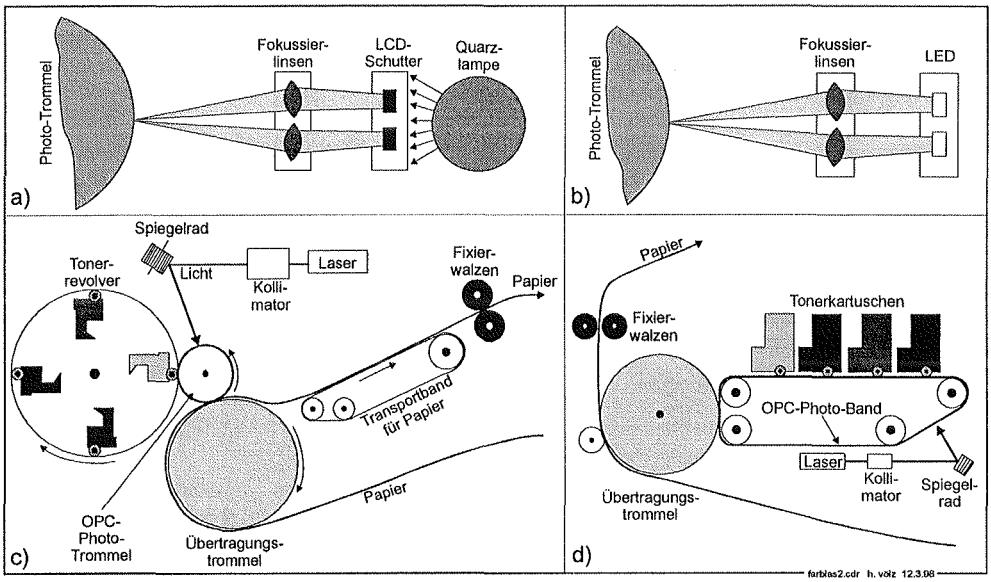


Bild 9.41 Varianten von Laserdruckern

9.4.4 Weitere Drucker mit Licht

In den letzten Jahren sind beachtliche und vielfältige Fortschritte bei den Laserdruckern erreicht worden. Während für viele Jahre die standardmäßige Auflösung bei 300 dpi lag, sind heute Werte von mindestens 600 dpi, aber auch oft deutlich darüber, erreicht. Außer der deutlich verbesserten Mechanik und Optik, war dafür auch ein erheblich feinerer Toner notwendig. Neben den verbreiteten Bürodruckern gibt es seit einigen Jahren spezielle Industrie-Laserdrucker. Sie erreichen Druckleistungen bis zu 200 Seiten je Minute. Bei ihnen kann | muß teilweise auch perforiertes Endlospapier benutzt werden. Weiter sind die *Laserfarbdrucker* hinzugekommen. Konica und Panasonic ordnen dabei z. B. die vier Farbeinheiten hintereinander auf der Phototrommel an (**Bild 9.41**c). Canon und Agfa verwenden dagegen ein photoleitendes Filmband. So haben sie mehr Platz für die Anordnung der vier Farbsysteme (Bild 9.41d).

Weiter sind zu den üblichen Laserdruckern zwei wichtige (oft besonders preiswerte und leichte) Modifikationen hinzugekommen. Sie umgehen vor allem die aufwendige Ablenktechnik des Laserstrahls. Beim *LED-Drucker* werden statt dessen einige tausend Halbleiter-Leuchtdioden (vgl. S. 140ff.) – meist in Zweierreihen angeordnet – verwendet. Das Wirkungsprinzip geht aus Bild 9.41b hervor. Natürlich muß auch hier die Trommel kontinuierlich rotieren. Die Aufbereitung der Daten und damit die gesamte Elektronik wird also nicht vereinfacht. Von der Vielzahl der LEDs wird eine hohe Betriebssicherheit gefordert. Denn selbst der Ausfall nur einer LED wird deutlich als Strich erkennbar. Ein ähnliches Prinzip verwendet der *LCS-Drucker* (liquid crystal shutter, vgl. S. 131ff.). Hierbei wird eine, meist zweireihige LCD-Zeile als „Lichtschalter" benutzt (Bild 9.41a). Je nach dem Zustand der einzelnen LCD-Pixel gelangt von der stabförmigen Halogen-Quarz-Lampe Licht oder kein Licht zur Photo-Trommel. Ansonsten entspricht dieser Drucker weitgehend dem LED-Drucker.

Für eine weitere Abart des Laserdruckers konnte keine genauere Beschreibung gefunden werden. Sie operiert mit Ionen und der Toner wird kalt fixiert.

Den Laserdruckern recht ähnlich sind die heutigen *Filmbelichter*. Sie werden auch Belichter oder Satzbelichter genannt. Sie entstanden um 1984 und dienen in der Druckindustrie zur Herstellung der Druckvorlagen (Filme) für den Offset-Druck. Dabei wird für jede Prozeßfarbe ein extra Film erzeugt.

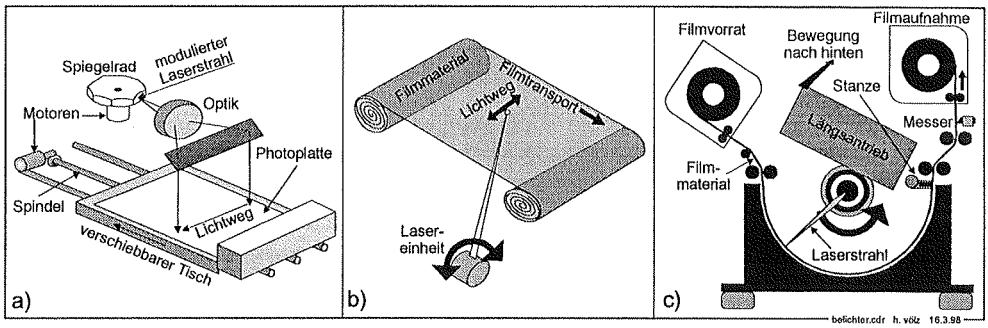


Bild 9.42 Typen von Filmbelichtern

Deshalb befindet sich an der Stelle der Photo-Trommel ein hochauflösender, meist sehr hart arbeitender Photofilm (d. h. mit sehr steiler Gradation). Liegt die typische Auflösung bei Druckern etwa zwischen 300 - 1200 dpi so werden hier 600 - 4000 verlangt. 10 µm pro Pixel entsprechen 2540 dpi. Es wird jedoch nicht nur die hohe absolute Genauigkeit verlangt, sondern eine präzise Wiederholgenauigkeit für die Farbauszüge. Typische Werte liegen bei 25 µm, erreicht werden aber bereits 5 µm. Die wichtigsten Gruppen dieser Belichter zeigt **Bild 9.42**. Der typische Flachbettbelichter (Bild 9.42a) verwendet Photoplatten, die auf einem Tisch gleichmäßig verschoben werden. Der Laserstrahl schreibt hierauf mit dem Spiegelrad die Zeilen. Übliche Filmbelichter verwenden Filmmaterial mit mehren Metern Länge auf Spulen. Bei der Anordnung von Bild 9.42 wird der Film kontinuierlich bewegt und der Laser schreibt wieder zeilenweise. Hierbei können im Gegensatz zum Trommelverfahren von Bild 9.42 sehr unterschiedliche Filmlängen genutzt werden. Dafür erreicht aber der Trommelbelichter die höhere Präzision. Jeder dieser Belichter hat ähnlich dem Laserdrucker drei wesentliche Baueinheiten:

- den elektronischen Teil mit dem Raster-Image-Prozessor (RIP),
- den eigentlichen photomechanischen Teil, gemäß der obigen Dreiteilung der Verfahren und
- die spezielle Entwicklungsmaschine für den belichteten Film.

Ein historisch berühmter Laserbelichter ist die Computersatzmaschine Linotronic. Der Beginn des photoelektrischen Lichtsatzes erfolgte 1965 durch die Firma Hell mit dem Digiset. Doch erfolgte der elektronische Satz noch deutlich anders. Dabei können die folgenden Klassen unterschieden werden:

- Beim optomechanischen Belichter wird jeweils ein Zeichen des Schriftbildnegativs durchleuchtet und auf ein Fotomaterial projiziert.
- Bei den CRT-Belichtern schreibt eine Kathodenstrahlröhre (cathode ray tube) linienweise die Gestalt jedes Zeichens einzeln auf den Film.
- Auch Laser-Belichter schreiben ähnlich den CRT-Belichtern die Zeichen einzeln auf den Film.

9.4.5 Tintenstrahldrucker

Der erste Tintenstrahldrucker „Mingograf" wurde 1952 von Siemens Elema (Schweden) für die Medizintechnik produziert. Er benutzte eine bewegliche Haarnadeldüse, spritz kontinuierlich Tintentropfen und ist in verbesserter Form noch heute auf dem Markt. Die Verbreitung der Technik erfolgte aber sehr zögerlich. 1965 bringt Hermes (Schweiz) ein Gerät heraus. Ein weiteres wird 1977 auf der NCC in Housten vorgestellt. Auch die erste Piezo-Variante von 1979 bewirkt keinen Durchbruch. Der beginnt ab 1984 mit dem thermischen Bubble-Jet von Hewlett Packard (HP). Im nächsten Jahr sind auch Epson und Canon auf dem Markt. 1987 folgt der legendäre Inkjet von HP. Eine neue Ära zieht 1991 mit dem farbtüchtigen Deskjet 550C von HP ein. Heute sind Tintenstrahldrucker der Standard

im Privatbereich und Büro. Sie sind äußerst preiswert und leicht zu pflegen. Die Betriebskosten sind nicht sehr hoch. Einige Modelle erreichen heute außerdem nahezu Photoqualität. Für die Klassifikation der Drucker sind vier Punkte wesentlich:

- Drucker mit *continous drop* erzeugen fortwährend Tintentropfen. Zum Papier gelangen aber nur speziell elektrisch aufgeladene bzw. abgelenkte Tropfen.
- Bei *drop on demand* werden nur dann Tintentropfen erzeugt, wenn sie auch für den Druck benötigt werden. Als Untergruppen existieren hier
  - die *piezoelektrischen* (z. B. HP) und
  - die *bubblejet*-Systeme (z. B. Canon und Epson).

  Die beiden Varianten behaupten sich z. Z. gleichberechtigt nebeneinander. Ihre Vor- Nachteile scheinen sich aufzuwiegen.

Die *continous-drop*-Systeme sind heute nur noch für sehr leistungsfähige Anwendungen im Einsatz. Ihren grundsätzlichen Aufbau zeigt **Bild 9.43**a. Mit einer Pumpe wird die Tinte zum Tintengenerator (meist Piezotechnik) gedrückt. Dort werden mit einer Frequenz bis zu ein MHz fortlaufend kleine Tropfen (20 µm für ca. 1200 dpi) erzeugt und mit einer Geschwindigkeit von um 50 m/s in Richtung Papier geschleudert. Auf dem Weg dorthin können sie elektrostatisch aufgeladen werden (Bild 942b). In den meisten Fällen folgt dann eine Ablenkung in beiden Richtungen senkrecht zur Strahlbewegung. Tropfen, die nicht auf das Papier gelangen sollen, werden weit nach unten abgelenkt. Sie gelangen dadurch in den Auffangbehälter, werden dort gefiltert und anschließend zum Tintenbehälter zurückgeführt. Mit der Ablenkung der Tintentropfen können auf dem Papier beliebige Zeichen erzeugt werden. Zum Grundprinzip sind inzwischen viele Teilverbesserungen entstanden. Das Microdot-Verfahren von Hitachi zerlegt die ursprünglichen Tropfen nochmals in feinere. Durch Ausblendung der großen Tropfen kann es noch höhere Auflösung erzielen. Zuweilen werden auch getrennte Düsen für Lösungsmittel und Pigmente angewendet. Derartige Verfahren erfordern allerdings einen recht hohen Aufwand. Sie kommen deshalb insbesondere für sehr große Formate, z. B. bei CAD zum Einsatz. Für Sonderanwendungen lassen sich auch spezielle Lacke verspritzen oder flüssige Wirkstoffe auf Tabletten übertragen. Die Hauptvorteile des *drop-on-demand* gegenüber dem continous-drop bestehen im folgenden:

- Sie sind relativ einfach und daher preiswert zu realisieren. Die Mechanik benutzt einen einfachen Papiertransport. Der Druck kann „zeilenweise" erfolgen. Dadurch wird kein großer Speicher benötigt.
- Sie arbeiten nahezu geräuschlos, weil sie keinen Lüfter zur Kühlung benötigen.
- Die Betriebskosten (Tinte) sind relativ gering. Sie sind also auch recht umweltfreundlich.
- Es lassen sich relativ einfache Farbdrucker realisieren.

Bei den *Piezo*-Druckern wird der piezoelektrische Effekt benutzt (vgl. auch S. 98f., Bilder 7.4i+j). Diese Eigenschaft dient u. a. bei Schwingquarzen zur Erzeugung sehr genauer Frequenzen. Im Quarzkristall (Bild 9.43i) sind die Moleküle des SiO_2 so angeordnet, daß nach außen kein elektrisches Potential erscheint. Durch Druck von oben und unten (Bild 9.43k) wird jedoch eine Verschiebung der Atome erzwungen. Dadurch nimmt die obere Elektrode negatives und die untere positives Potential an. Die entgegengesetzte Polarität erscheint bei seitlichem Druck. Angelegte Spannungen bewirken entsprechende Verformungen des Kristalls. Erheblich verstärkt treten diese Effekte bei speziellen Piezokeramiken auf. Sie besitzen meist das kubische Perowskit-Gitter (Bild 7.4j auf S. 98) und benutzen bevorzugt die Elemente Pb, Zr, und Ti. Die Mischkristalle genügen meist der chemischen Formel $PbZrO_3$-$PbTiO_3$. Bild 9.43c zeigt das damit aufgebaute Prinzip einer Tintenstrahldrüse. Links steht das Element mit dem Tintentank in Verbindung. Bei einer Spannung von 60 bis 100 V verformt sich das Piezoelement so, daß der Tintenkanal verkleinert wird. Dadurch wird ein Druck nach links und rechts ausgeübt. Da die Tinte nach links nicht ausweichen kann, erhöht sich der Druck nach rechts zusätzlich durch Reflexion. Dadurch wird ein Tintentropfen mit beachtlicher Geschwindigkeit herausgeschleudert. Dieser Vorgang dauert nur wenige µs. Nach dem Entspannen des Piezoschwin-

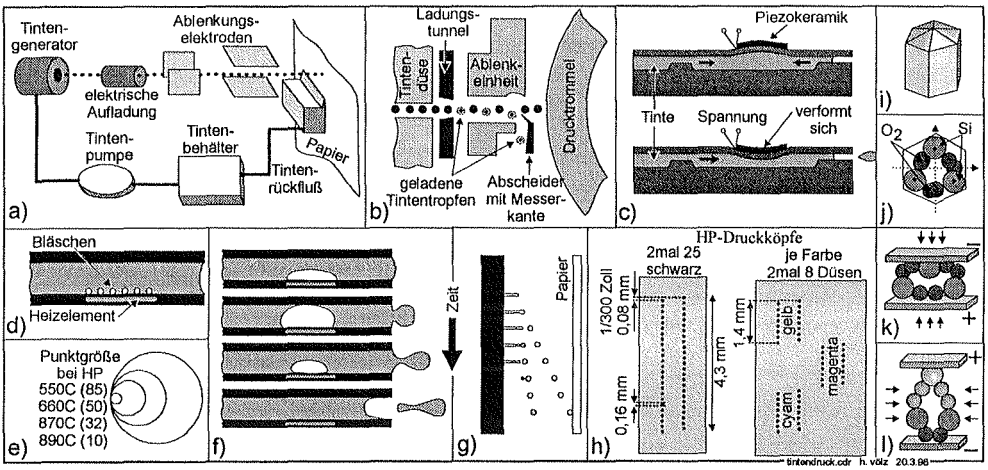


Bild 9.43 Varianten und Details zu Tintenstrahldruckern

gers werden jedoch Bruchteile einer ms benötigt, damit die Tinte von links nachfließen kann. Deshalb wird die Folgefrequenz für Tropfen auf wenige kHz begrenzt. Die Ausbildung und den Flug der Tintentropfen zeigt Bild 9.43g untereinander in einigen Phasen. Der Raumverbrauch derartiger Piezo-Elemente ist so klein, daß viele Elemente dicht beieinander angeordnet werden können. Dies hat Vorteile für die Positionierung der Tintentropfen und für das Verschließen des Systems in Ruhepausen. Druckköpfe existieren von 20 bis zu 256 Düsen. Zwei klassische Anordnungen von HP zeigt Bild 9.43h. Heute sind z. T. schon wesentlich verfeinerte Anordnungen in Gebrauch. Die Verkleinerung der Tintentropfen im Laufe der Zeit zeigt in relativen Maßeinheiten Bild 9.43e. HP empfiehlt beim Verbrauch der Tinte auch den Druckkopf auszutauschen. Doch weitgehend hat sich gegen den Willen des Produzenten ein Nachfüllen der Patronen durchgesetzt. Dies ist nach allgemeiner Erfahrung mehr als zehnmal möglich. Es hängt aber deutlich von der Behandlung des Kopfes und der Tintenqualität ab (s. S. 285f.). Es ist dabei erstaunlich, daß sogar teilweise mit guter Füllfederhaltertinte ein brauchbares Nachfüllen für wenige Male möglich ist. Dabei können aber Garantieansprüche erlöschen. Für eine photonahe Qualität kann bei neueren Druckern der schwarze und der dreifarbige Druckkopf durch zwei Patronen mit insgesamt sechs Farben ausgetauscht werden.

Beim *Bubblejet* (Canon) ist im Tintenkanal ein Heizelement angebracht (Bild 9.43d). Es wird kurzzeitig auf etwa 300 C erhitzt. Dadurch verdampft die Tinte in der unmittelbaren Umgebung. Zunächst bilden sich viele kleine Blasen (bubbles), die sich aber schnell zu einer größeren Blase vereinen. Der entstehende Dampfdruck treibt dann die rechts befindliche Tinte – analog wie beim verformten Piezoelement – heraus. In einigen Phasen zeigt dies Bild 9.43f von oben nach unten. Typische Werte der zugeführten Leistung liegen bei 10 bis 50 µJ. Auch hier erfolgt die Tropfenbildung in wenigen µs. Bis aber die Blase zusammenbricht, vergehen etwa 50 µs. Auch hier lassen sich viele Elemente dicht beieinander anordnen. Die erreichte Lebensdauer dieses Druckkopfes ist heute so groß, daß z. B. Canon sie mit der Lebensdauer des Druckers gleich setzt. Wahrscheinlich reinigt die hohe Temperatur des Dampfes die Düse besser. Es brauchen nur noch die Tintenkartuschen ausgetauscht zu werden. Dafür muß garantiert sein, daß der Druckkopf bei Nichtbenutzung immer gut abgeschlossen ist. Bevor der Drucker von der Stromversorgung getrennt wird, muß er erst den Druckkopf durch einen Dichteschieber verschließen können (ausschalten und warten!). Außerdem wird mittels eines Gummiblatts der Kopf von Papierabrieb, Staub, Tintenresten usw. gereinigt. Auch während des Drucks fährt der Kopf zuweilen hierüber. Für Druck mit Photoqualität kann der Kopf bei einigen Typen von Canon und Epson durch eine andere Variante mit 5 bis 6 statt 3 Farben ausge-

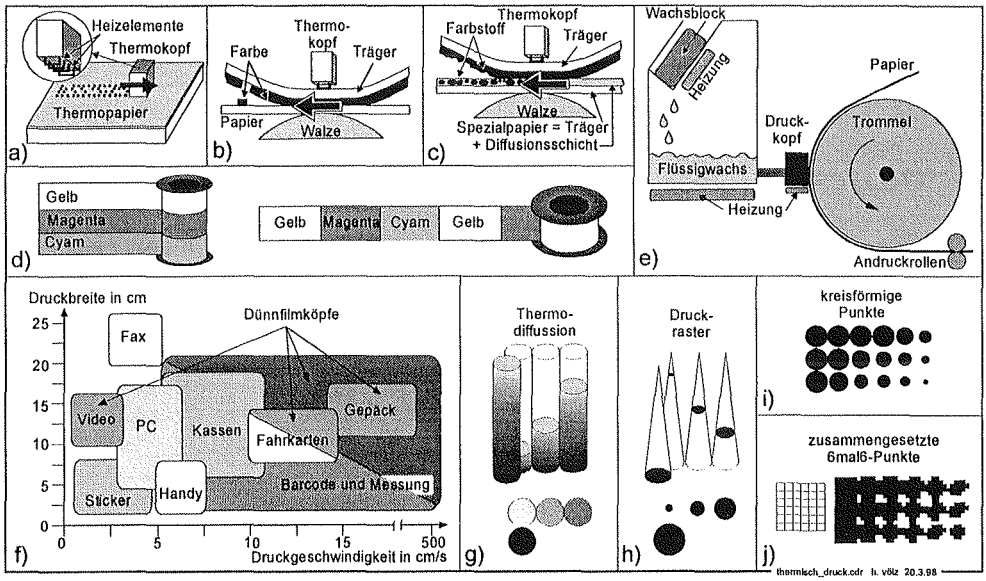


Bild 9.44 Zusammenstellung wichtiger thermischer Druckverfahren

tauscht werden. In neuesten Modellen verwendet Canon zwei Heizelemente, um zwei Tropfengrößen zu erzeugen.

Zur Qualität der Tintenstrahldrucker gibt es viele Untersuchungen. Sie hängt auch erheblich vom Papier und von der Tinte ab (vgl. S. 285f.). Weitere Größen betreffen Auflösung, Grauwerte, Gradationskurven, Druckraster, Druckerpunktverteilung, Farbsättigung, Farbübergänge und Farbfeinheit. Weitere Unterschiede betreffen die Druckgeschwindigkeit für Text- und Bilddruck sowie die Preise aus Tintenverbrauch und Papierkosten. Bei photoähnlicher Qualität lagen sie Mitte 1997 je A4-Seite zwischen 1,50 und 4 DM.

9.4.6 Sonstige thermische Drucker

Neben den Bubble-Druckern sind einige weitere thermische Verfahren in Benutzung. Sie sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Ein spezielles *Thermopapier* ermöglicht sehr einfache Drucker.
- Beim Thermo*transfer*drucker werden spezielle Wachse von einem Farbband thermisch auf das Papier übertragen
- Der Thermo*sublimations*- oder Thermo*diffussion*drucker überträgt wachsähnliche Farbstoffe mittels Verdampfen auf ein Spezialpapier und erreicht dabei nahezu Photoqualität.
- Der *Festtinten*- oder *Wachs*drucker verflüssigt ein Wachs zu „Tinte" und arbeitet dann wie ein Tintenstrahldrucker.

Für das Drucken mit Feststinte gab es einige Vorläufer in den 80er Jahren. Sie hießen Phase-Change- oder Hot-Melt-Drucker und bleiben bedeutungslos. 1991 machte Tektronix dieses Prinzip mit seinem Phaserjet als Wachsschmelzverfahren (Wachsdrucker) marktreif. Die Drucker sind immer noch sehr teuer, besitzen aber nahezu Photoqualität. Das Prinzip zeigt **Bild 9.44**e. Als Druckmaterial werden im Vakuum gut gesäuberte, eingefärbte Wachsklötze von etwa zwanzig cm^3 Volumen benutzt. Sie existieren für die vier Prozeßfarben Gelb, Magenta, Cyan und Schwarz. Durch unterschiedliche Formen können sie nicht in einen falschen Behälter gelegt werden. Die Heizung schmilzt eine gewisse Menge

Wachs in die vier Vorratsbehälter und hält es dort bei etwa 100 °C flüssig. Der sich anschließende Druckkopf arbeitet praktisch genauso wie bei üblichen Tintenstrahldruckern (Bubblejet). Sobald das Wachs auf | in das Papier gelangt ist, wird es wieder fest. Die gekühlten Andruckwalzen glätten schließlich noch die Oberfläche. Insgesamt entsteht so eine Art Seidenglanz. Die Geschwindigkeit ist mit rund zwei Minuten für eine komplexe A4-Farbgrafikseite erstaunlich hoch. Sie kostete um 1998 allerdings etwa fünf DM. Vorteilhaft werden sie aber immer wieder für die Herstellung von Proofs genutzt. Hierbei handelt es sich um einzelne, sehr hochwertige, farbige Test-Bilder, die zur Bestätigung |Abnahme für eine sich anschließende massenhafte Vervielfältigung auf Hochleistungsdruckern dienen. Weitere Alternativen für Proofs sind nur noch die Farblaser- und die Diffussionsdrucker.

Alle anderen thermischen Verfahren benutzen spezielle thermische *Druckköpfe*. Sie enthalten einige oder viele elektrisch heizbare Flächen. Das Spektrum derartiger Thermodrucker geht aus einer Übersicht zu den Druckköpfen hervor (Bild 9.44f). Sowohl die Druckbreite als auch die Druckgeschwindigkeit überdecken einen großen Bereich. Dabei werden für die einfachen Varianten Druckköpfe verwendet, die in der Dickschichttechnologie (Pastendruck und Brennen) hergestellt sind. Nur für leistungsfähigere Verfahren kommt die Dünnschichttechnologie (Vakuum und Masken) zur Anwendung. Alle Drucker dieser Art sind durch eine sehr *kompakte Bauweise*, einen *extrem leisen Betrieb* und einen *äußerst geringen Verschleiß* der Gerätetechnik gekennzeichnet.

Das einfache (direkte) Verfahren benutzt wärmeempfindliches Papier (Bild 9.44a). Dieses *Thermopapier* ist ein speziell beschichtetes Papier, das sich bei Wärmeeinwirkung durch physikalisch-chemische Änderungen verfärbt. Dadurch ist der Drucker extrem einfach aufgebaut. Er besitzt nur einen Antrieb und den Thermokopf. Allerdings sind die Drucke nicht sehr lange haltbar. Durch Licht und Wärme verbleichen sie. Dennoch wurde diese Variante bis vor kurzem fast ausschließlich bei Fax-Geräten benutzt. Ihre Anwendungsbreite ist aber immer (noch) hoch. Sie kommt bei allen einfachen Druckern, z. B. in Registrierkassen, bei Geldautomaten, für einfache Belege, bei Tisch- und Taschenrechnern usw. zur Anwendung.

Die beiden *indirekten* Verfahren verwenden ein spezielles Farbband. Es enthält die entsprechenden Druckfarben. Sie werden durch Wärme selektiv auf das Papier übertragen. Das Farbband ist daher nach einmaliger Benutzung unbrauchbar. Dadurch entsteht ein beträchtlich großer *Abfall*. Für Farbdrucke sind dann Bänder erforderlich, die neben- oder nacheinander alle Prozeßfarben tragen (Bild 9.44d). Sie verlangen eine aufwendige Fertigung. Allerdings wird so eine deutlich höhere Qualität als bei den direkten thermischen Druckern erreicht.

Beim heute weitgehend veralteten *Farbtransfer* (Bild 9.44b) wird der Farbstoff von dem Farbband durch die Wärme abgeschmolzen und auf das Papier übertragen (Bild 9.44b). Mit diesem Verfahren können kaum mehr als die Grundfarben erreicht werden. Feinere Abstufungen sind nur durch Dithern möglich, was aber die Auflösung deutlich sinken läßt. Für leistungsfähige Drucker werden ihre Druckköpfe in Papierbreite mit entsprechend vielen Heizelementen angefertigt. Dadurch entfällt der Transport des Druckkopfes. So kann die ansonsten etwas geringe Druckgeschwindigkeit von etwa 100 Zeichen/s mehr als ausgeglichen werden.

Wesentlich besser arbeitet das *Farbdiffusions-* bzw. Farb*sublimations*verfahren (Bild 9.44c). Beim Sublimieren wird der flüssige Zustand übersprungen. Der Farbstoff wird verdampft und schlägt sich danach als feste Substanz auf dem Papier nieder. Diffusion ist durch die immer etwas vorhandene Wärmebewegung der Moleküle vorhanden. Hierdurch wandert im Laufe der Zeit ein Stoff (hier der Farbstoff) in einen anderen Stoff (hier das Spezialpapier) hinein. Dieser Effekt wird durch hohe Temperatur enorm beschleunigt. Für optimale Ergebnisse ist in beiden Fällen eine genaue Abstimmung zwischen den Eigenschaften des Farbstoffes und des Spezialpapiers notwendig. In der Regel wird durch den Druckkopf der Farbstoff vom Farbband verdampft. Er schlägt sich dann in der speziellen Schicht des Papiers nieder. Je nach der Anzahl der kurzen Stromimpulse bzw. der Stromflußdauer im Thermokopf kann so unterschiedlich viel Farbstoff auf| in das Spezialpapier transportiert werden. Für jeden einzelnen Bildpunkt sind also sehr feine Farbabstufungen möglich. Außerdem können auf einen Papierort gleichzeitig alle Prozeßfarben übertragen werden. Neben den feinen Farbabstufungen wird daher auch die Auflösung des Druckkopfes voll ausgenutzt. Die Folge ist, daß die Drucke oft nicht

von echten Photoabzügen zu unterscheiden sind. Hierzu trägt noch bei, daß mehrfach abschließend eine durchsichtige, Glanz bewirkende Folie über die Farbschicht kaschiert wird. Sie schützt zusätzlich vor dem Verwischen und dem Ausbleichen der Farben. Bis vor wenigen Jahren waren derartige Drucker wegen der Kosten nur bei höchsten Ansprüchen gerechtfertigt. Mit der Entwicklung der elektronischen Photographie sind sie jetzt auch für kleinere Formate relativ preiswert erhältlich. Sie werden auch zuweilen als *Videoprinter* bezeichnet.

Die hohe Qualität des letzten Druckprinzips läßt sich recht gut mittels Bild 9.44g erklären. Für jeden Bildpunkt dringen die Farbstoffe in unterschiedlicher Menge und verschieden tief in die Spezialschicht des Papiers ein. Dies ist durch die Höhe und Dichte der einzelnen „Pixel-Säulen" angedeutet. Das ist sogar noch günstiger als die Steuerung der Bildpunktgröße, wie sie z. B. beim Rasterbuchdruck (Bild 9.44h und j) angewendet wird. Allerdings werden dabei meist keine kreisförmigen Strukturen, sondern eher Rauten erzeugt. Wesentlich ungünstiger ist es, wenn die unterschiedlichen Farben und Grauwerte durch Dithern gemäß Bild 9.44j erzeugt werden müssen. Dann sind nämlich nur wenige gequantelte Stufen erreichbar und zusätzlich verringert sich die Auflösung.

In den letzten Jahren ist das *Micro-Dry*-Verfahren von *Alps* entstanden. Es benutzt kunstharzartige Farben in Farbbändern. Auch diese spezielle Trockentinte wird thermisch von den Farbkassetten auf das Papier übertragen. Die Punktgröße ist dabei konstant. Es ist kein spezielles Papier erforderlich. Leider sind z. Z. nicht mehr technische Details bekannt. Dies gilt auch für ein cytholithographisches Druckverfahren von *Aztech*, bei dem die Farben optisch-thermisch auf ein Spezialpapier übertragen werden. Sie sind wasser- und kratzfest. Es wird aber erwähnt, daß die Farbstoffe an der Rückseite eines darüberliegenden Blattes oder an einer Kunststoffhülle kleben bleiben können. Sinnvoll ist es daher, wie bei Photos Seidenpapier dazwischen zu legen. Allerdings ist wohl alles Gedruckte gegenüber Fingerabdrücken, schmutzigem Papier usw. empfindlich.

9.4.7 Impact-Drucker

Aus früherer Zeit stammt der Unterschied zwischen *Impact-* und Non-Impact-Druckern. Ursprünglich wurde so unterschieden, ob der Druckmechanismus im direkten Kontakt (Impact) mit dem Papier erfolgte oder nicht. Im Laufe der Zeit trat ein gewisser Bedeutungswandel ein, der immer mehr den *Lärm* beim Drucken betraf. So wurden die rein mechanischen Drucker von den anderen „leisen" unterschieden. Inzwischen sind die Ansprüche weiter gewachsen. Bereits ein nicht besonders leiser Lüfter (Laserdrucker) wird als störend empfunden. Daher ist es verständlich, daß heute oft rein mechanische Drucker zumindest als völlig veraltet eingestuft werden. Jedoch sind sie für einige Anwendungen unentbehrlich. Ihre Vorteile liegen nämlich in den folgenden Besonderheiten:

- Sie ermöglichen es, direkt bis zu etwa 10 *Durchschläge* zu erzeugen. Das ist z. B. beim betrieblichen Rechnungswesen usw. dringend erforderlich.
- Sie besitzen fast als einzige Drucker einen *Traktor*. Daher bieten sie die Möglichkeit, Endlospapiere zu benutzen sowie *Formulare* und *Etiketten* genau positioniert zu bedrucken.
- Ferner sind der *Anschaffungspreis* und die *Betriebskosten* – typisch 4 bis 10 Pfennig/Seite – besonders gering.

Diese Vorteile und der historische Hintergrund machen es notwendig, etwas auf die rein mechanischen Drucker einzugehen. Eigentlich begann alles mit der Schreibmaschine. Die vermutlich erste baute 1823 Freiherr Drais von Sauerbronn. Sie enthielt Typenhebel. Einen, wenn auch hölzernen Typenkorb setzte dann 1864 P. Mitterhofer ein. 1874 baute Remmington die von Carlos Gliddon entwickelte Maschine mit der ersten QWERTY-Tastatur. 1902 machte George Blickensderfer die Schreibmaschine elektrisch. Doch bereits zuvor versuchte die Telegraphie Lösungen zur elektrischen Übertragung. So schuf 1854 David Edard Huges einen Drucktelegraphen mit synchronumlaufenden Typenrädern. Doch später setzte sich der elektrisch gesteuerte Typenhebeldrucker durch. Auf ihn geht die heute noch übliche Bezeichnung TTY (teletype = Fernschreiber) zurück. Es ist erstaunlich, daß dann über lange Zeit keine wesentliche Weiterentwicklung mehr erfolgte. Die nächsten großen Innovationen sind der IBM-Kugelkopf (selectric typewriter) von 1971, das Typenrad (Daisy wheel = Gänseblümchen-Rad) von 1972 und schließlich der Nadeldrucker von Nixdorf um 1975, der etwa ab 1978

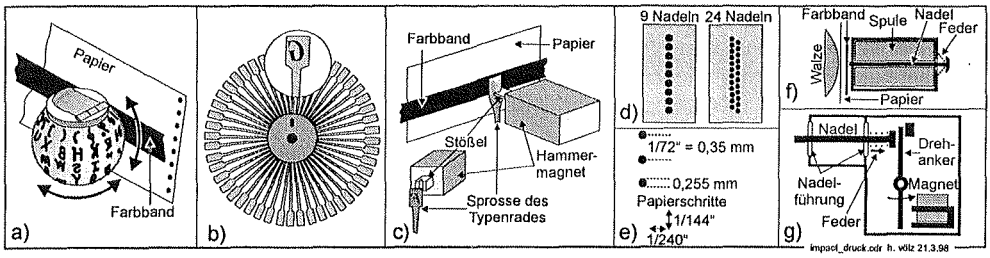


Bild 9.45 Die wichtigsten Impact-Druckern

beginnend mit dem MX-80 von Epson langsam zum Standard wird. Den nächsten weniger großen Schritt mit 24 Nadeln leitet NEC mit seinem P6 ein. Neben dieser Entwicklung gab es in Rechenzentren auch spezielle Hochleistungsdrucker. Sie waren u. a. als Umlauf-, Ketten-, Typentrommel- und Stahlband-Drucker vorhanden. Sie waren sehr schnell und laut. Meist erzeugten sie gleich voll parallel eine ganze Druckzeile. Da sie schwer zu warten waren, tanzten oft die Zeichen in einer Zeile. Historisch Interessierte können Details u. a. in [KAI] und [SEN] nachlesen. Heute existieren z. T. noch Zeilendrucker mit umfangreichen Nadelbänken (s. u). Von all diesen Techniken haben heute – wenn man von den rein mechanischen Typenhebelschreibmaschinen absieht – nur noch das Typenrad und der Nadeldrucker Bedeutung. Dennoch sei zusätzlich kurz auf den Kugelkopf von IBM hingewiesen (**Bild 9.45**a). Er enthält auf seiner Oberfläche die einzelnen, zu druckenden Zeichen. Ein Zeichen wird durch Drehen und Kippen des Kopfes ausgewählt. Dann wird der Kopf gegen das Farbband und damit gegen das Papier geschlagen. Die neue Qualität bestand darin, daß der Kopf durch Hochheben der kleiner Klappe leicht ausgewechselt werden konnte. So ließen sich erstmalig mit einer Schreibmaschine mehrere Zeichensätze – z. B. für mathematische Sonderzeichen – nutzen.

Das noch leichter auswechselbare Typenrad besteht mit Ausnahmen seines zentralen Kernes aus einem gehärteten Kunststoff mit 96 Zungen (Bild 9.45b) Am Ende jeder Zunge befindet sich erhaben jeweils ein Buchstabe, eine Zahl oder ein Sonderzeichen. Dies wird im Bild durch die lupenhafte Vergrößerung deutlich. Vielfach befindet sich dieses Typenrad zur leichteren Auswechselbarkeit in einer Kassette. Im Betrieb wird das Typenrad durch einen schnellen Schrittmotor in jene Position gedreht, bei der das gewünschte Zeichen oben vor dem Farbband steht. Dann schlägt ein elektromagnetischer Hammer (Stößel in Bild 9.45c) dieses Zeichen gegen das Farbband. Er überträgt so dessen Kontur auf das Papier. Anschließend wird der Schlitten mit dem Typenrad, Schrittmotor und Hammer um ein Zeichen weiter bewegt. Auch das Farbband wird in die nächste Position gebracht. Die Geschwindigkeit solcher Drucker liegt bei etwa 10 bis 40 Zeichen je Sekunde. Auch die heutigen elektronischen Schreibmaschinen arbeiten fast ausschließlich nach diesem Prinzip. Vielfach besitzen auch sie ein Interface zum Rechneranschluß und können dann zusätzlich als Drucker verwendet werden.

Die beiden bisher geschilderten Drucker werden auch als FFC-Drucker (fully formed character) bezeichnet. Sie erzeugen dadurch eine sehr hohe Zeichenqualität. Noch vor einigen Jahren wurden so mit speziellen „Carbon"-Bändern hochwertige Druckvorlagen erzeugt. Andererseits erzeugen diese Drucker durch die relativ große, anschlagende Zeichenfläche und die geringe Zeichenzahl je Sekunde einen maschinengewehr-ähnlichen Lärm. Im Gegensatz dazu stehen die Nadeldrucker. Sie setzen ihre Zeichen aus wenigen Punkten zusammen. Dazu werden mehrere dünne Nadeln (0,2 bis 0,3 mm ∅) gegen das Farbband geschossen. Infolge der raschen Folge und der Parallelität klingen sie eher kreissägen-ähnlich. Sie werden auch als SIDM-Drucker (serial impact dot matrix) bezeichnet. Anfangs ermöglichten sie nur eine so geringe Zeichenqualität, daß sogar das Lesen etwas erschwert war. Das ursprüngliche Druckprinzip zeigt Bild 9.45f. Eine rückwärtige Feder hält die Nadel in ihrer Ruhelage. Bei der Erregung der Spule zieht der Magnetkreis den hinteren Anker an und beschleunigt dadurch die Nadel gegen die Federspannung. Mit dem sich dabei verkleinernden Magnetspalt nimmt die magnetische Kraft stärker als die Federkraft zu. Es sind dabei mehrere hundert Anschläge in der Sekunde möglich. Später kamen noch schnellere Mechanismen hinzu. Ein Beispiel ist der ballistische

Antrieb nach Bild 9.45g. Auch hier hält die Feder die Nadel zurück. Der Anker schlägt aber erst nach einer Anfangsbeschleunigung gegen die Nadel. Heute sind Nadelfrequenzen bis zu 2000 Hz üblich.
Im Laufe der Entwicklung wurden Drucker mit u. a. 7, 9, 18, 24 und 48 Nadeln gefertigt. Durchgesetzt haben sich nur die 9- und 24-Nadel-Drucker. Dabei ergeben sich die Nadelanordnungen von Bild 9.45d. Übliche vertikale Auflösungen sind von 8×9 = 72, 16 × 9 = 144 oder 24 × 9 = 216 dpi (dot per inch). Die typischen horizontalen Druckkopf-Schritte und vertikalen Walzen-Schritte zeigt Bild 9.45e. Sie sind oft kleiner als der Nadelabstand. Dadurch wird ein feineres Raster erzeugt. Je nach der gewählten Schrittweite werden beim 9-Nadeldruckern eine schnelle Entwurfsschrift (= Draft oder DPQ data processing quality) und eine langsamere NLQ (near letter quality = beinahe Briefqualität) unterschieden. Bei der NLQ sind zwei Durchläufe des Druck-Kopfes je Druckzeile erforderlich. Beim 24-Nadeldrucker erzeugt bereits ein Durchlauf die NLQ. Seine Schriftfonts nutzen für eine gewisse Kompatibiltät aber nur 18 Nadeln. Seine dünneren Nadeln bewirken zusätzlich ein besseres Druckbild. Bei zwei Durchläufen je Zeile wird eine Matrix von 24×36 Punkten benutzt, die dann LQ (letter quality) erreicht. Die graphische Auflösung dieser Drucker beträgt vertikal zwischen 180 und 216 dpi und horizontal zwischen 240 und 360 dpi. Für viele Durchschläge ist jedoch der 9-Nadeldrucker günstiger. Die Lebensdauer der Mechanik von Nadeldruckern liegt bei ca. $3 \cdot 10^8$ Zeichen. Ein Farbband genügt für einige 10^6 Zeichen. Eine Zeitlang gab es auch Nadeldrucker mit vier Farben.

9.4.8 Sonstige Drucker

Drucker sind immer auf bestimmte Einsatzgebiete optimiert. Parameter für sind u. a. die erforderliche Druckleistung, die Druckqualität, das Druckformat, die Notwendigkeit von Farbe und natürlich die Gesamtökonomie. In die Ökonomie gehen u. a. der Anschaffungspreis des Gerätes, die Kosten für Verbrauchsmaterial (meist je Druckseite berechnet) und die Wartungskosten ein. Hauptsächlich werden bezüglich des *Einsatzes* folgende Klassen unterschieden:

- Die *Geschäftsdrucker* sind meist Netzwerkdrucker. Sie sind durch hohe Druckleistung, große Betriebssicherheit und eine lange Lebensdauer gekennzeichnet. Der relativ hohe Preis ist dann gerechtfertigt, wenn mehr als etwa 200 Druckseiten pro Tag anfallen. Zu ihnen werden oft auch die Drucker für Spezialleistungen, z. B. für farbige Proofs gezählt.
- Die *Büro-*, *Heim-* bzw. *Einzelplatzdrucker* sollen vor allem preiswert sein. Sie haben daher nahezu unabhängig vom Typ eine Lebensdauer von etwa 100 000 Seiten. Die drei wichtigsten Varianten – Laser-, Tintenstrahl- und Impactdrucker – sind zuvor behandelt.
- *Miniatur- und Sonderdrucker* existieren vor allem für kleine Formate, z. B. in Registrierkassen und Taschenrechnern, zum Druck von Barcode, Stickern, Labeln usw. Hier herrscht noch Druck auf Thermopapier vor. Andere Varianten verwenden die FFC- oder Nadeltechnik. Für höhere Ansprüche kommen aber auch Laser- und Tintenstrahldrucker zum Einsatz.

Eine weitere wichtige Einteilung ergibt sich aus dem zeitlichen *Ablauf des Druckvorganges.* Hierbei werden Zeichen-, Zeilen- und Seitendrucker unterschieden. Typische *Zeichendrucker* sind die Schreibmaschine und die FFC-Drucker. Sie verlieren stark an Bedeutung. Der Begriff *Zeilendrucker* existiert heute nur noch bedingt. Ursprünglich galt er für Drucker die eine Zeichenzeile komplett parallel drucken. Im weiteren Sinne können heute hierzu die Tintenstrahldrucker gezählt werden. Sie erzeugen nacheinander Zeilen von der Höhe des Druckkopfes. Je nach der Schriftgröße müssen dies aber nicht mehr die Zeichenzeilen sein. Typische *Seitendrucker* sind die Laser-, LED- und LCS-Drucker. Auf Grund ihrer Technologie und der erforderlichen Präzision können sie immer nur eine komplette Seite ausdrucken.

Für die o. g. Miniaturdrucker wird auch ein Verfahren mit sehr speziellem Druckmaterial benutzt. Das Papier, die Pappe oder der Kunststoff sind mit einer Farbschicht und darüber mit einer leitenden Metallschicht versehen. Der Druck erfolgt, indem an die kleinen Nadeln des Druckkopfes eine elektrische Spannung angelegt wird (**Bild 9.46**a). Dabei schlägt ein Funke über und verdampft das Metall. Diese Drucker sind einfach und robust. Auch in rauher Umgebung (u. a. Parktickets in Hoch-|Tiefgaragen) arbeiten sie zuverlässig. Sie haben weiter den Vorteil, fälschungssicher zu sein.

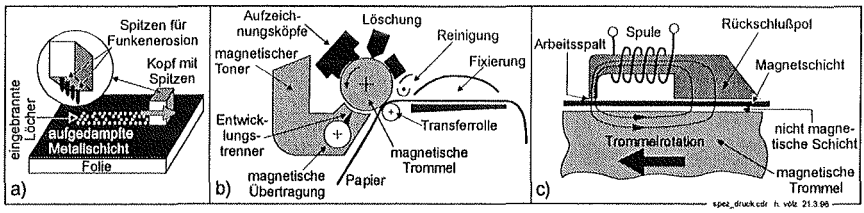


Bild 9.46 Erosions- und Magnetdrucker

Eine wenig bekannte Abart des Laserdruckers ist der *Magnetdrucker*(Bild 9.46b). Die Photo-Trommel ist durch eine magnetisierbare Trommel oder durch ein endloses Magnetband ersetzt. Auf ihr erzeugen vielspurige Magnetköpfe (Bild 9.46c) das magnetische „Bild". Der Aufzeichnungsvorgang ist stark nichtlinear und kommt daher der Digitalisierung sehr entgegen. Ein spezieller magnetischer Toner haftet an den magnetisierten Stellen. Anschließend wird er durch ein weiteres Magnetfeld auf das Druckmaterial, z. B. Papier oder Stoff, übertragen. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, daß die magnetische Aufzeichnung sehr stabil ist. Eine Aufzeichnung kann daher fast beliebig oft gedruckt werden. Außerdem erspart die hohe Parallelität der Aufzeichnung – ähnlich wie beim LED- oder LCS-Drucker – den komplizierten optischen Strahlengang. Ferner sind magnetische Trommeln wesentlich robuster als die OPC-Trommeln. Diese Drucker existieren aber nur im gehobenen Leistungsbereich ab etwa 20 Seiten je Minute. Sie erreichen Auflösungen um 600×600 dpi.

Schließlich seien noch die „*3D-Drucker*" kurz erwähnt. Sie sind erst im Entstehen und erzeugen reale dreidimensionale Modelle (c't 8/95, S. 190). Dazu schmelzen sie ein Kunststoff-Granulat auf. Über etwa hundert Düsen spritzt daraus ein spezieller Druckkopf das Modell schichtenweise übereinander. Innerhalb von einer Stunde sind Größen von etwa 20 × 20 × 25 cm^3 zu erreichen. Hohlräume des Modells werden durch kleine Stützen überbrückt.

9.4.9 Plotter

Plotter sind eine spezielle Abart von Druckern. Sie führen Stifte bzw. Messer in Kurven über das „Druckmaterial". Heute haben sie nur noch für Großformate bis über A0 hinaus Bedeutung. Solche Größen werden vor allem bei CAD-Anwendungen verlangt. Für die Formate bis A4 und z. T. auch A3 sind sie weitgehend durch Tintenstrahl- und Laserdrucker abgelöst. Insgesamt existieren vier unterschiedliche Plottertypen: Flachbett-, Rollen- Photo- und Schneidplotter.

Flachbettplotter existieren für Papierformate von A4 und bis A0. Sie werden meist flach oder etwas schräg aufgestellt (**Bild 9.47**a; nächste Seite). Auf der glatten Grundfläche wird das Papier oder die Folie magnetisch oder statisch festgehalten. Über dieser Fläche kann in horizontaler Richtung eine Brücke mittels eines Schrittmotors bewegt werden. Auf ihr befindet sich ein Läufer, der mit einem zweiten Schrittmotor vertikal bewegt wird. Er trägt den Schreibstift, der durch einen Hubmagneten auf das Papier abgesenkt werden kann. Vielfach kann auch der Stift automatisch durch Stifte mit anderen Farben oder unterschiedlichen Strichstärken ausgetauscht werden. Sie befinden sich im Bild am linken Plotterrand.

Der *Rollenplotter* ermöglicht wesentliche größere Papierformate. Das Papier wird bei ihm über eine Walze geführt und kann daher sehr große Längen erreichen (Bild 9.47b). Auf ihr muß es sehr gut haften. Es darf nicht rutschen. Zuweilen befindet sich daher auf der Walze sehr feiner Diamantstaub. Er prägt sich dann auf die Rückseite des Papiers ein. So kann das Papier viele tausend Male zuverlässig vor und zurück transportiert werden. Bezüglich der Rückkehrpositionierung werden meist Toleranzen um 10 µm gefordert. Diese Bewegung führt es nämlich unter den Stift, der mit dem Läufer nur horizontal bewegt werden kann. Es gibt auch Varianten für randperforiertes Papier, das dann von einem Traktor mit stachelartigen Spitzen bewegt wird. Die Vorteile des Rollenplotters sind die nahezu freie Wahl der Papiergröße und die kleine Stellfläche.

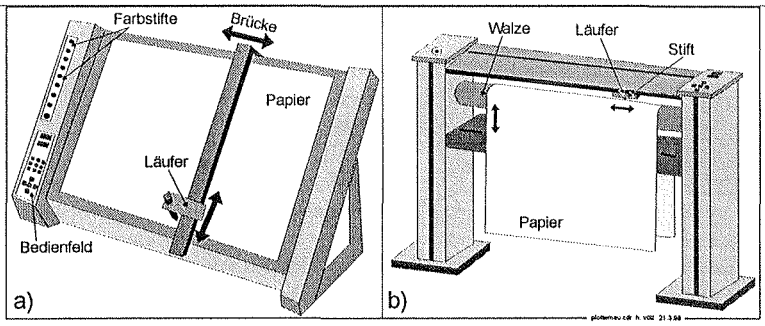


Bild 9.47 Flachbett- und Rollenplotter

Die typische *Schreibgeschwindigkeit* beider Plottertypen liegt zwischen 30 und 800 mm/s. Typische Schreibmaterialien sind Papier, Transparentpapier, Folien und Pappe. Die Schreibstifte müssen hohen mechanischen Belastungen genügen. Bevorzugt sind Faser- und Kugelschreiber oder Tuschefüllhalter mit angepaßten Eigenschaften und Tinten. Im Prinzip bedeutet das linienhafte Plotterschreiben eine erhebliche Einschränkung gegenüber den anderen Druckerverfahren. Dies wird allein durch die geringe Anzahl der verfügbaren Schrifttfonts deutlich. Auch die Füllung von Flächen ist nur mit verschiedenen Schraffuren möglich. Genau für diese Varianten wurde auch die Grafiksprache HPGL (Hewlett Packard Graphic Language) eingeführt. Diese Nachteile spielen aber im CAD-Bereich keine entscheidende Rolle. Hier ist es viel wichtiger, die großen Formate mit vielen kleinen Details zu realisieren.

Der *Photoplotter* funktioniert meist ähnlich wie ein Flachplotter. An der Stelle des Stiftes befindet sich eine Lichtquelle, die durch Spiegel abgelenkt wird. Damit wird ein photographischer Film linienhaft belichtet. Auch Bewegungen der Photoplatte sind üblich. Wesentliche Teile des Photoplotters befinden sich daher in einem lichtdichten Gehäuse. Ähnliche, doch noch viel präzisere Methoden werden auch bei den *Repeatern* der Mikrolektronik zur Herstellung von mikroelektronischen Masken genutzt. In analoger Weise kommen hierfür auch abgelenkte Elektronenstrahlen zur Anwendung. Dann wird allerdings von *Elektronenstrahlbelichtung* gesprochen.

Auch der *Schneidplotter* wird u. a. zur Anfertigung von Masken für die Halbleitertechnik benutzt. Als Schreibmaterial wird dabei eine spezielle, zweischichtige Kunststoffolie verwendet. Die untere Schicht ist transparent, die obere nur für Licht einer bestimmten Farbe durchsichtig. Statt des Stiftes wird ein sehr feines Messer benutzt. Es ritzt die obere Schicht ohne die untere zu beschädigen. Nach dem Schneiden geschlossener Kurven können die entsprechenden Flächen der oberen Folie abgezogen werden. So entstehen die Maskenvorlagen, die übereinandergelegt, leicht die Konturendeckung der Layer überprüfen lassen.

9.4.10 Druckmaterialien

Bisher wurden vor allem Druckprinzipien behandelt. Wichtig sind noch zwei weitere Komponenten:

- das Format und die Art des zu bedruckenden Mediums sowie
- der Farbstoff, mit dem gedruckt wird.

Sieht man vom Thermo- (s. u.) und Erosionsmaterial sowie vom Film ab, so lassen sich die zu bedruckenden Materialien wie folgt einteilen in

- Einzelblätter aus Normalpapier,
- Spezialpapiere (s. u.),
- Folien für Overheadprojektoren,
- Karton,
- Haftetiketten,
- Papier mit Durchschlägen,

- Formblätter (oft ebenfalls mit Durchschlägen),
- perforiertes Endlospapier und
- Briefumschläge, z. B. im langen, schmalen Format mit 240×104 mm^2. Fensterumschläge machen das Bedrucken überflüssig.

Je nach der Auswahl sind häufig Sonderzuführungen bzw. zusätzliche Schächte bei den Druckern erforderlich. Eine weitere Klassifikation der Materialien betrifft:

- Das Format ist meist genormt, also A4, B5, Letter, Legal usw.,
- Das Flächengewicht (bzw. die Dicke) wird meist als Masse für eine Fläche von 1 m^2 angegeben. Übliche Werte liegen bei 80 (50 bis 120) g/m^2. Sowohl sehr leichte Papiere als auch besonders dicke|steife Pappen verlangen zuweilen Spezialdrucker.
- Bezüglich der Herstellung sind gebleichte (zuweilen noch mit dem umweltschädlichen Chlor), aufgehellte recycelte, geleimte usw. Papiere und Kartons zu unterscheiden.
- Neben dem weißen Standardpapier gibt es auch farbige, speziell bedruckte, Schmuck- und Verlaufspapiere.

Bei den *Abmessungen* des Papiers ist zu beachten, daß niemals die gesamte Fläche bedruckt werden kann. An allen Seiten sind immer Ränder notwendig. Ihre Breiten hängen sowohl vom jeweiligen Drucker als auch von der beabsichtigten, vorwiegend ästhetischen Wirkung der Seite ab. Dies kann z. T. zu erheblichen Abweichungen dann führen, wenn ein Dokument unter sonst gleichen Bedingungen auf verschiedenen Druckern ausgegeben wird. Beim Buch- und Zeitschriftendruck ist zusätzlich das Aussehen der Doppelseite wichtig. Dann wird vielfach der Bundsteg (Ränder in der Mitte der Doppelseite) gleich groß und breiter als die Außenränder gewählt.

Die Nutzung von perforiertem *Endlospapier* verlangt beim Drucker Sondereinrichtungen für den Transport. Meist werden Stachelwalzen und|oder Traktoren eingesetzt. Der Zugtraktor befindet sich dabei hinter dem Druckmechanismus und zieht das Papier aus dem Drucker heraus. Ein Schubtraktor ist vor der Walze angeordnet und schiebt das Papier in den Drucker hinein. Bei mehr als drei Papierlagen sollte ein Zugtraktor verwendet werden. Der Vorteil von Endlospapieren liegt in der exakten Positionierung des Druckes. Er wirkt sich besonders günstig bei Formularen mit Durchschlag und Haftetiketten aus. Außerdem tritt seltener ein Papierstau auf.

Beim *Laserdrucker* ist bei den *Haftetiketten* und den *Folien* besondere Vorsicht geboten. Sie müssen die hohe Fixiertemperatur um 200 °C gut überstehen. Die Folien dürfen dabei nicht schmelzen. Bei Haftetiketten darf an den Rändern kein Klebstoff austreten. Beides würde die Fixiereinrichtung schädigen oder gar unbrauchbar machen. Für Tintenstrahldrucker müssen Folien gelatineähnlich beschichtet sein (s. u.). Die Haftetiketten müssen eine für Tinte geeignete Papierart, oft mit speziell präparierter Oberfläche, besitzen. Für Nadeldrucker sind keine Folien bekannt.

Insbesondere bei Tintenstrahldruckern ist die Auswahl des **Papiers** für das Ergebnis mit entscheidend. Eine genauere Kenntnis über Papier ist daher vorteilhaft. Alle Papiere bestehen im wesentlichen aus Zellstoff mit einigen Beimengungen (**Bild 9.48**a, umseitig). Rohstoff für die Produktion von Zellstoff ist Holz. Er ist meist langfasrig und nimmt leicht Flüssigkeit auf. Um die Papiereigenschaften zu verbessern, werden ihm Bindemittel und Füllstoffe hinzugefügt. Ihre Auswahl bestimmt beispielsweise die Elastizität und Glattheit des Papiers. Das „gewöhnliche" Papier nennt man *ungestrichen*. Typische Vertreter sind Kopier- oder Schreibmaschinenpapiere.

Gestrichenes Papier besitzt einen „Unterbau" aus ungestrichenem Papier. Es bestimmt dabei u. a. die Festigkeit und Elastizität. Auf die zu bedruckende Seite ist jedoch eine spezielle, für die jeweilige Anwendung optimierte Schicht aufgebracht (gestrichen). Teilweise wird das weiße Talkum verwendet. Für Tintenstrahldrucker ist die Schicht so gestaltet, daß die Tinte nur definiert eindringt und sehr wenig zur Seite fließt. Dann bleiben die Farbteilchen vor allem an der Oberfläche. Dadurch erscheinen die Drucke brillant und in frischen Farben. Diese Wirkung ist deutlich aus dem Vergleich von Bild 9.48c und d zu erkennen. In ähnlicher Weise kann Papier auch durch zusätzliche Substanzen aufgehellt werden (vgl. S. 36 Bild 3.16c). Weiter lassen sich Papiere mit speziellen Pigmenten verse-

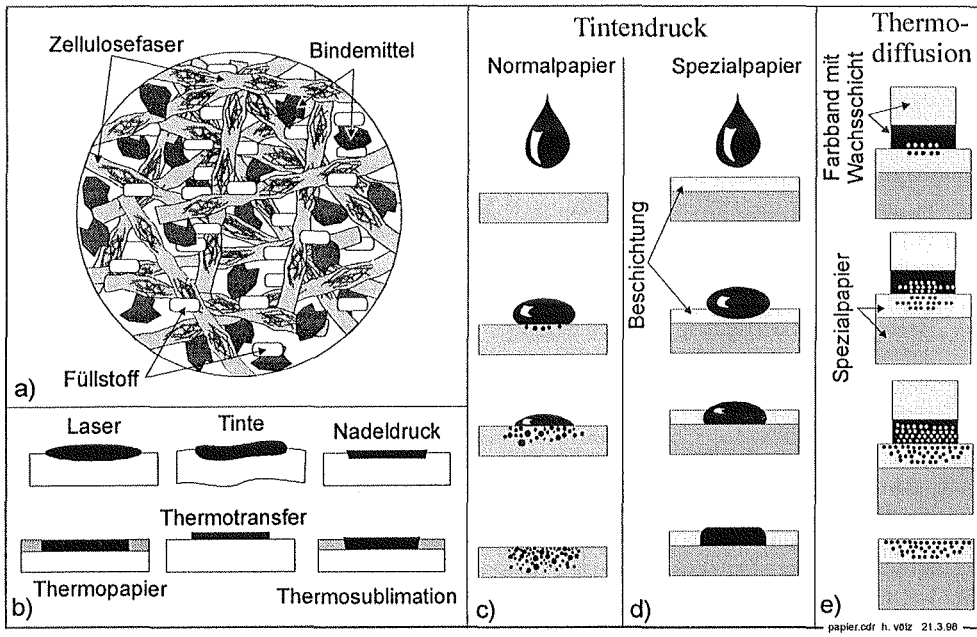


Bild 9.48 Eigenschaften von Druckerpapieren, insbesondere bezüglich Tinte

hen (s. S. 35; Bild 3.15i bis l). Auch die Papiere für Diffusionsdruck sind ähnlich aufgebaut. Sie besitzen aber eine andere Spezialschicht. Den Druckprozeß zeigt Bild 9.48e.

Das *Glossy-Papier* ist eigentlich kein Papier, sondern eine spezielle weiße Folie, die an ihrer Oberfläche für das Haften der Tinte aufgerauht ist. Da die Tinte nicht in die Folie eindringen kann, bleiben fast alle Farbpartikel an der Oberfläche und damit farbwirksam. So entstehen besonders brillante Drucke mit leuchtenden Farben. Da außerdem die Folie glänzt, ähneln die Drucke Hochglanzphotos.

Ziemlich neu sind die relativ teuren *Photopapiere*. Sie stellen eine Mischung zwischen Glossymaterial und gestrichenem Papier dar. Vielfach ist der Aufbau genau auf die speziellen Photopatronen der Tintenstrahldrucker einzelner Hersteller angepaßt. Bei ihnen sieht das Bild nicht nur einem Photo ähnlich, sondern es fühlt sich auch so an.

Für einige Sonderanwendungen kann es notwendig sein, die Druckmedien selbst zu beschichten. Eine metallisierte Folie nimmt z. B. keine Tinte auf und im dünnen Stoff verläuft die Tinte stark. Mehrfach erprobt wurde eine Zusammensetzung aus 50 cm^3 Wasser, 100 cm^3 70%iges Isopropanol (wirkt benetzend), 10 g Gelatine und etwas Kalialaun zum Verfestigen. Die Gelatine läßt man etwa fünf Minuten im Wasser quellen. Dann wird sie im Wasserbad aufgeschlossen. Auf die klümpchenfreie Lösung wird eine Messerspitze Alaun gegeben. Unter ständigem Rühren wird dann das Isopropanol hinzugegeben. Die fertige Lösung wird mit einem Pinsel dünn auf das Druckmedium aufgetragen. Für eine optimale Zusammensetzung sollten die Anteile etwas variiert und erprobt werden. Auch ein Beschichten mit Kartoffelstärke ist möglich. Seit kurzem benutzt Canon bei seinem BJC-7000 mit dem „Ink Optimizer" etwas ähnliches direkt im Druckprozeß. Die Drucktechnologie wird P-POP (plain paper optimized printing) genannt. Das Druckmaterial wird dabei zunächst über spezielle Düsen mit einer Sonderemulsion grundiert. Unmittelbar danach spritzt der Drucker die farbigen Tinten auf das so vorbereitete Medium. Dadurch kann auf fast jedem Material ohne „auszubluten" gedruckt werden. Selbst auf extrem saugfähigen Materialien (Löschpapier, Aquarell-Karton) werden Prints

hoher Qualität erreicht. Die Ausdrucke vertragen anschließend sogar ein Tauchbad im Waschbecken, ohne daß die Farben verlaufen.

Schon bei den einfachen, ungestrichenen Papieren ist es nützlich, auf die Papierseite zu achten. Bei guten Papieren ist die Oberseite auf der Packung (durch einen Pfeil) gekennzeichnet. Ansonsten kann man den Unterschied erfühlen. Da Papier von der Oberseite geschnitten wird, ist die Oberkante glatt. An der Unterkante ist ein spürbarer Grat vorhanden. Bei den Spezialpapieren *muß* auf die richtige Papierseite geachtet werden. Im Zweifelsfall ist sie durch einen einfachen Test zu erkennen. Man feuchtet Daumen und Zeigefinger leicht an und nimmt das Blatt dazwischen. Beim Auseinanderziehen haftet die Schichtseite etwas stärker. Bei allen Spezialpapieren ist es vorteilhaft, sie in der Spezialpackung und dunkel aufzubewahren.

Ein immer noch wichtiges Spezialmaterial ist das *Thermopapier*. Bei ihm befindet sich auf dem Grundmaterial eine wärmeempfindliche Schicht. Sie enthält oft Metallverbindungen, welche den Glanz und das Gewicht des unbenutzten Papiers ausmachen. Sie färben sich bei etwa 100 °C sichtbar dunkel. Bei ihnen gibt es vor allem Probleme bezüglich der Lagerung und der Stabilität des Druckes gegenüber Licht und Wärme. Je höher diese Forderungen sind, desto teurer wird es. Bisher konnte jedoch keine gute Langzeitstabilität erreicht werden.

Beim *mechanischen* Druck befindet sich die Druckerfarbe in einem speziellen Gewebefarbband. Es wurde bereits am 14.9.1886 patentiert. Durch den kurzzeitigen mechanischen Impuls wird etwas Farbstoff auf das Papier gepreßt. Trotz des beachtlich hohen Druckes wird er jedoch nicht sehr fest mit dem Papier verbunden. Das Kohlepapier für die Durchschläge und auch spezielle Farbbänder (Carbonbänder auf Kunststoff) besitzen eine Farbschicht, die nahezu vollständig durch den mechanischen Impuls übertragen wird. Deshalb sind sie nur einmal zu benutzen. Teilweise befindet sich eine solche Schicht auch auf der Rückseite von Originalen. Da derartige Papiere wegen der beachtlichen „Schmutzwirkung" sehr unbeliebt sind, hat sich seit einigen Jahren eine andere „Durchschreibemethode" verbreitet. Hier werden farblose Vorstufen benutzt, die sich in kleinen Bläschen befinden. Durch den Impuls platzen die Bläschen und die chemischen Substanzen reagieren miteinander. Dabei entsteht die Farbe.

Einen Vergleich zum Druckergebnis der verschiedenen Verfahren zeigt Bild 9.48b. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich beim Tintenstrahldruck das Papier wellen kann. Weiter ist zu unterscheiden, daß die Farbe bei einigen Verfahren ins Papier eindringt und bei anderen an der Oberfläche verbleibt.

Seit einigen Jahren befindet sich bei der DRA (britische Militärforschung) ein **digitales Papier** in der Entwicklung (c't 1/1998 S. 28). Bei seiner Anwendung wird auch von ZBD (zenithal bistable device) gesprochen. Vereinfacht entspricht der Aufbau einem speziellen Flüssigkeitskristall. Mit einem photolithographischen Prozeß wird auf einer Glasplatte eine äußerst feine, etwa 0,5 µm dicke Orientierungsschicht erzeugt. Hieran richten sich die vermutlich ferroelektrischen Moleküle aus. Dabei gibt es zwei stabile Richtungen, nämlich längs und quer zur Orientierungschicht. Die jeweils eingestellte Lage der Moleküle ist dabei so stabil, daß sie auch nach abgeschaltetem Feld über sehr lange Zeit bestehen bleibt. Vermutlich stimmt diese Technik mit der **digitalen Tinte** von Joe Jacobson am MIT-Media-Labs überein. Er will mit ihr ein elektronisches Buch entwickeln. Es soll vom Rücken her die Information elektronisch übergeben bekommen. Sie ordnet die Tinte im Papier über elektrische Felder. So kann jeder Text zum dauerhaften Lesen eingegeben werden und bei Bedarf auch gelöscht und | oder durch neue Information ersetzt werden.

Neben den Druckmedien werden auch an die **Druckfarbstoffe** hohe Forderungen gestellt. Bei ihnen muß zwischen den eigentlichen Farbpigmenten und den Binde- bzw. Zusatzmitteln für die spezielle Druckvariante unterschieden werden. Für den Buchdruck z. B. müssen die *Druckfarben* eine gewisse Zähigkeit besitzen und nach dem Antrag schnell und dauerhaft antrocknen. Auf die verschiedenen Komponenten des Toners – Kunstharzpartikel, Magnetit, Farbstoff (vielfach Ruß), Siliziumoxid und Eisenkügelchen – wurde bereits beim Laserdrucker hingewiesen. Alle Komponenten sind heute mit Sicherheit nicht (mehr) krebserregend. Sie können aber dann allergisch wirken, wenn man direkt mit dem noch nicht fixierten Tonerstaub in Berührung kommt. Heute sind die meisten Komponenten so feinkörnig, daß sie die Filter der üblichen Staubsauger passieren. Deshalb ist die Reinigung von Laserdruckern oder das Beseitigen von Tonerverschmutzungen nicht trivial. Alle Tonerzusam-

mensetzungen sind immer auf die jeweilige Engine (Druckwerk nicht Druckertyp s. o.) optimiert. Dabei besitzt jeder Toner eine optimale Größenverteilung, ist im bestimmten Umfang elektrisch aufladbar und bei der gewählten Temperatur optimal auf dem Papier fixierbar. Die Toner für magnetische Drucker benötigen kein elektrische Aufladbarkeit, verlangen aber genauer spezifizierte magnetische Eigenschaften.

Bei den *Farbbändern* muß der Farbstoff relativ fest im *Gewebe* haften. Gleichzeitig muß er sich aber durch mechanischen Druck (d. h. per Anschlag) definiert auf das Papier übertragen lassen. Baumwollgewebe ermöglichen relativ fetten Druck mit groben Konturen. Nylonbänder drucken feiner und dünner. Für die Nadeldrucker sind zuweilen besondere Farbbänder notwendig. Sie müssen den dünnen Nadeln angepaßt sein. Die Carbon-Bänder bestehen aus *Kunststoff*. Auf ihm befindet sich einseitig eine ablösbare, gut auf dem Papier haftende, zusammenhängende, wachsartige Schicht. Durch den Anschlag wird sie kompakt entsprechend dem jeweiligen Zeichen auf das Papier übertragen. Dies ergibt die hervorragende Schriftqualität. Bei den verschiedenen *thermischen* Druckern kommen Farbbänder auf Kunststoffbasis zum Einsatz. Sie sind mit einem wachsartigen Farbstoff beschichtet, der durch Wärme auf das Papier hinüberschmilzt oder -sublimiert. Wie die Carbonbänder können sie daher auch nur einmal verwendet werden. Nach dem Gebrauch enthalten sie negativ die gedruckten Informationen. Dies verlangt eine gute Sicherheitsentsorgung. Spezielle Farbbänder bieten auch die Möglichkeit *in Farbe* zu drucken. Sie enthalten dann in bis zu vier Bereichen die Farben gelb, magenta, cyam und schwarz.

Besondere Aufmerksamkeit kommt den Tinten der Tintenstrahldrucker zu. Die Anforderungen liegen dabei weit über denen für Füllfederhaltertinte. Die wichtigsten Punkte sind:

- Sie muß verträglich mit den Materialien des Druckwerks sein.
- Sie muß homogen sein, damit keine Ablagerungen in den Düsen und den Kanälen erfolgen.
- Sie darf keine Partikel oder Verunreinigungen enthalten.
- Auch beim Drucken darf keine Entmischung auftreten.
- Sie muß ungiftig sein.
- Sie darf einerseits in den Kanälen und Düsen nicht eintrocknen, muß aber nach dem Druck schnellstens wischfest werden.
- Die richtige Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung muß im Temperaturbereich von 10 bis 40 °C eingehalten werden.
- Algen- und Bakterienwachstum muß ausgeschlossen sein.

Für den *BubbleJet* kommen noch hinzu

- eine saubere und gleichbleibende Dampfblasenbildung sowie
- kurzzeitige Hitzebeständigkeit bis etwa 350 °C.

Um so erstaunlicher ist es, daß es Amateuren immer wieder recht gut gelingt, selbst HP-Druckköpfe mit Füllfederhaltertinte (z. B. Pelikan 4001) mit geringen und z. T. sogar ohne Modifikationen mehrmals aufzufüllen. Nicht gelungen ist dies bisher bei den Farbpatronen. Hier bereitet u.a. die feine Abstimmung der Farben die entscheidenden Probleme.

10 Grundlagen zur Information

Die Mensch-Technik-Schnittstelle besitzt – ähnlich wie jede andere (technische) Schnittstelle – mehrere Ebenen. Im Zusammenhang mit Bild 1.1 auf S. 1 wurden dazu allgemeine strukturelle Aussagen für den Menschen und für die technischen Einrichtungen gemacht. Allgemeine Aussagen, bei denen der Mensch im Zentrum steht, sind weiter ab S. 202 und besonders im Kontext zum Bild 9.1 auf S. 204 enthalten. Doch was wird zwischen Mensch und Technik ausgetauscht? Beim Geschmack und Geruch sind es *Stoffe*. Bei der Bedienung mittels Tastatur und Maus müssen wir *Energie* aufwenden. Vom Bildschirm nehmen wir schließlich *Information* entgegen. Über diese Größen hat wohl jeder eine intuitive Vorstellung, aber sie genauer zu definieren, fällt meist schwer. Dazu sind nämlich grundlegendere Betrachtungen notwendig. Sie setzen ein Weltbild voraus. Hier sei dafür von einem Schema ausgegangen, daß die zwei typischen Wege unseres Erkennens der *originären* Welt aufzeigt (**Bild 10.1**). Der Autor schließt sich dem Standpunkt an, daß es sie außerhalb unseres Bewußtseins gibt, daß wir sie aber nicht *vollständig* erkennen können. Wir meinen zu wissen, was sie ist oder sein könnte | sollte. Dafür spricht der im Bild oben dargestellte Weg, auf den wir rein praktisch | pragmatisch | intuitiv vorgehen. Durch Betrachten, Erleben, Handeln usw. machen wir uns die Welt zu eigen. Wir nutzen unsere unmittelbaren Sinneseindrücke und Erfahrungen. Dies ist das, was Dreyfus das „graue Wissen" nennt und was bereits die Intelligenz eines Kleinkindes ausmacht [DRY]. Weizenbaum sagte dazu, daß wir zwar mit der Künstlichen Intelligenz das Expertenwissen von Professoren umsetzen können, aber nicht die Intelligenz eines Zweijährigen [WEI].

Völlig anders gehen wir in der Wissenschaft vor. Hier müssen Experimente gemacht und Abstraktionen durchgeführt werden. Dabei werden Begriffe gebildet, Daten gewonnen und Gesetze gefunden. Auf Basis dieser Fakten entstanden zusammenhängende Wissenschaftsgebiete, wie Physik, Chemie, Biologie usw. Mit ihrer Hilfe lassen sich aus wenigen Anfangsgrößen – nämlich den Begriffen, den Daten und den Gesetzen – viel umfangreichere Aussagen *ableiten | erzeugen*. Die so erzeugte komplexe Welt ist relativ einfach und übersichtlich. Hiermit lassen sich Aussagen „folgerichtig" ableiten, die weit über das Wissen auf den oberen Weg hinausgehen. Auf dieser Grundlage beruhen wesentliche Teile unserer Technik und Zivilisation. Sie war bisher sehr erfolgreich. Bis vor wenigen Jahren hoffte man sogar auf *die* Weltformel, aus der alles abzuleiten sei. Hier soll nicht weiter auf die

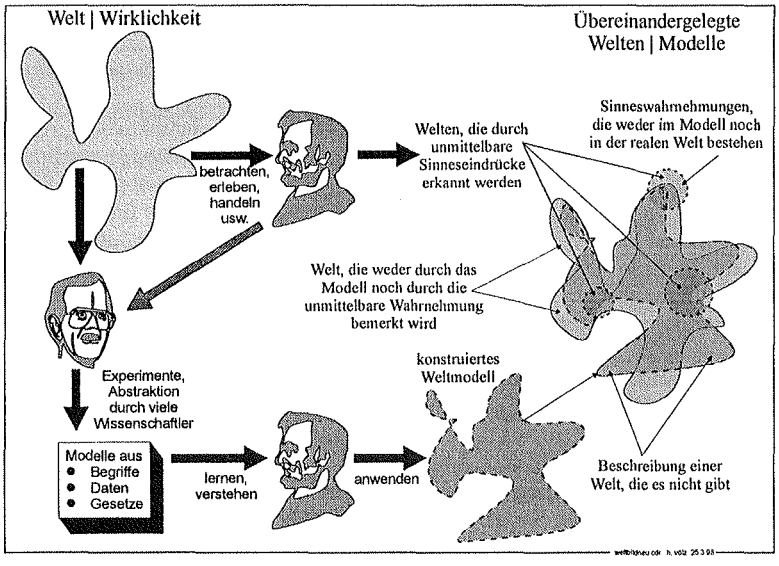


Bild 10.1 Wege unserer Erkenntnis der Welt

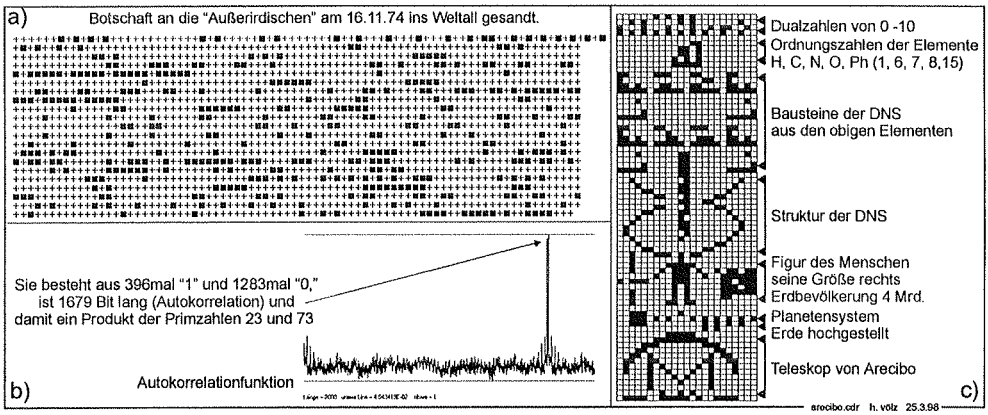


Bild 10.2 Das Signal von Arecibo

durchaus notwendige gesellschaftliche Kritik an diesem Weg eingegangen werden. Doch es ist zu beachten, daß dieser Weg nicht nur geschichtlich, sondern auch individuell sehr dornenreich ist. Wir müssen die Abstraktionen, Daten und Gesetze erlernen *und* verstehen. Ein Großteil der Sozialisierung und der Ausbildung von der Volks- bis zur Hochschule ist nur hierauf ausgerichtet.

Vergleichen wir nun die Ergebnisse der Welterkenntnis auf beiden Wegen, so ergeben sich in etwa die rechts im Bild 10.1 übereinander gelegten Modelle. Einmal ist dort die „originäre" Welt wiederholt. Unsere ganzheitlichen, intuitiven Erkenntnisse sind mehr punktuell und werden daher durch die drei Kreise angedeutet. Sie stimmen zu wesentlichen Teilen mit Ausschnitten aus der originären Welt überein. Hier ist unser Handeln eben erfolgreich. Es gibt aber auch Gebiete, wo wir „unangebracht" handeln und denken. Wer kennt nicht die dadurch entstehenden Frustationen? Das Modell „der" Wissenschaft(en) erfaßt natürlich viel mehr, aber auch nicht alles, von der originären Welt. Es gibt Gebiete, zu denen die Wissenschaft (noch!?) keine Aussagen bereitstellen kann. Teilweise werden sie jedoch erfolgreich auf dem oberen intuitiven, ganzheitlichen Weg erfaßt. Zusammengefaßt entspricht unsere Welterkenntnis – wie es Steinbuch einmal ganz nebenbei sagte – einem *Flickenteppich*. Er hat Löcher und manches paßt nicht zusammen [STE].

Die Bildung solcher Erkenntnisse hängt aber stark von unserer menschlichen „Ausstattung" ab. Dies vermag recht gut der „wissenschaftliche" Versuch zu demonstrieren, eine Botschaft an die „Außerirdischen" zu senden. Hierzu wurde am 16.11.1974 über längere Zeit ein Signal von dem Teleskop in Arecibo ins All gestrahlt [DRA]. Die gewählte 01-Folge zeigt **Bild 10.2**a. So ergibt sie nicht einmal einen Sinn für uns. Nehmen wir nun an, daß die Außerirdischen – wie auch eine beachtliche Gruppe auf der Erde – elektromagnetische Signale beobachten. Dabei versuchen sie zu unterscheiden, was natürlich, also physikalisch erklärbar, ist und was für sein Entstehen einer intelligenten Spezis (was immer das auch sein mag) bedarf. Ist die Periodizität der Signale kurz, so ist natürliches Entstehen wahrscheinlich. Erst längere Perioden verlangen „Organisation". Mit der Autokorrelationsfunktion (Bild 10.2) würden sie dann die Länge 1679 finden. Betrachten sie diese Zahl, so fällt auf, daß sie das Produkt der beiden Primzahlen 23 und 73 ist. Also könnte das Signal ein flächiges Bild „bedeuten"! Doch sind die Zeilen nun 23 oder 73 Bit lang? Man kann ja beide Varianten probieren. Nehmen wir an, sie hätten sich für den „richtigen" Fall von Bild 10.2c entschieden. Wie ist dann aber dieses Bild zu interpretieren? Was die Wissenschaftler vom Arecibosignal dabei gemeint haben, zeigt der Text neben dem Bild. Wären Sie darauf gekommen? Aber wenn es dennoch die Außerirdischen gefunden haben, wie sollen sie es dann nutzen? Diese Fülle an Fragen sollte man wohl immer bedenken, wenn es um Erkenntnis geht. Sie sind auch für die weiteren Ausführungen wichtig.

10.1 Stoff, Energie und Information

Alle unsere Begriffe und unsere Kenntnisse zur originären Welt besitzen nach dem vorigen Abschnitt nur Modellcharakter. Doch es gibt es viele solche Modelle: Modelle des Menschen, der Physik, der Chemie, der Kultur, der Kunst usw. Diese Modelle verhalten sich so zueinander, wie der zuvor zitierte Flickenteppich nach Steinbuch es veranschaulicht. Für die Mensch-Technik-Schnittstelle besitzen nun die drei Modelle: Stoff, Energie und Information eine zentrale Bedeutung. Protestieren Sie ruhig: „Stoff und Energie und wahrscheinlich auch Information gibt es doch!" Sehr schnell ist dann Norbert Wiener [WIE] mit „Information is information nor matter or energy" zitiert. Eine gute Übersetzung könnte lauten: Information ist Information, weder Stoff noch Energie[1]. Doch halt, bedenken Sie den vorigen Abschnitt. Nehmen wir deshalb zunächst und sicherheitshalber den Modellcharakter an. Dann folgt für die drei Modelle **Bild 10.3**a (umseitig). Wissenschaftlich gesehen, kommt es nun darauf an, die drei Begriffe (für die Modelle) zu definieren. Zuvor ist natürlich zu klären, wie das Definieren funktioniert. Hier seien nur die beiden wichtigsten Varianten kurz am Beispiel „was ist eine Birke?" beschrieben:

1. Nennung eines *Oberbegriffs* (hier ist es ein Baum) und einer Spezifizierung durch *typische Eigenschaften* (hier hat er Blätter und eine weiße Rinde).
2. *Aufzählung* möglichst vieler typischer Eigenschaften, hier etwa: Eine Birke hat auf einem Stamm mit weißer Rinde, viele Zweige an denen kleine, etwa herzförmige Blätter hängen.

Die erste Variante erscheint meist verständlicher und effektiver. Sie setzt jedoch voraus, daß ein brauchbarer Oberbegriff existiert und als gut bekannt vorausgesetzt werden kann. Wenn das nicht der Fall ist – und das trifft weitgehend auf recht allgemeine Begriffe zu – ist die zweite Variante zu wählen. Da Stoff, Energie und Information sehr allgemeine Begriffe sind – es sei denn, wir verwenden als Oberbegriff *Modell* – kommt für sie hauptsächlich die zweite Variante in Betracht. **Stoff** kann dann wie folgt definiert werden:

- Er ist die wesentliche Grundlage der *Chemie* (dafür also ein Modell).
- Er ist meist (bei hinreichender Menge) unmittelbar sinnlich *wahrnehmbar, erfahrbar.*
- Er besitzt vorwiegend *physikalisch-chemische Eigenschaften*, wie Gestalt, Masse, Gewicht, Härte, Ausdehnung, Farbe, Temperatur usw.
- Er existiert in den *Aggregatzuständen* fest, flüssig und gasförmig.
- Durch Zusammenwirken mehrerer Stoffe können *neue Stoffe entstehen.*

Für **Energie** gilt entsprechend:

- Sie ist die wesentliche Grundlage der *Physik* (ihr Modell).
- Im Gegensatz zum Stoff ist sie vorwiegend *dynamisch* und löst meist *Wirkungen* aus. Sie kann so Stoffe bewegen, Körper verformen, Stoffeigenschaften verändern, z. B. Eis auftauen, die Temperatur erhöhen usw.
- Sie kann z. B. in Akkumulatoren *gespeichert* werden bzw. existiert in Feldern u. a. als potentielle Energie.
- Sie wird durch spezielle Systeme aus stofflichen Energieträgern *gewonnen.*

Der letzte Punkt ist für den Fortgang der Betrachtungen besonders wichtig. Er sei daher am Beispiel des Bildes 10.3b (umseitig) etwas genauer beschrieben. Der Energieträger *Benzin* wird im System *Motor* unter *Stoff*umwandlung verbrannt. Dabei entsteht *Energie* in Form heißer, sich ausdehnender Gase. Sie be*wirken* schließlich, daß sich das Auto fortbewegt. Die veränderten Stoffe werden in diesem Kontext dann meist als störender | schädlicher Abfall angesehen. Ähnliche Prozesse mit einer

[1] Eine „nachlässige" Übersetzung von matter als Materie löste in den 60er Jahren einen heftigen politischen Streit zur Kybernetik aus: Wiener wurde nämlich daraufhin so interpretiert: Information ist eine dritte Größe gegenüber Materie (matter falsch übersetzt) und Bewußtsein! Folglich ist der dialektische Materialismus gemäß Materie und Bewußtsein widerlegt. Wieners Aussage ist hier korrekt mit der obigen Übersetzung wiedergegeben.

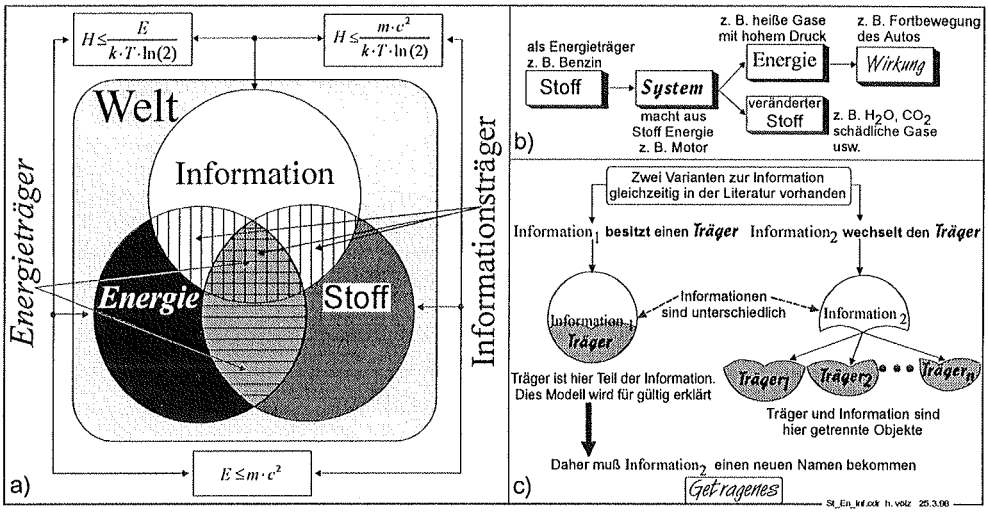


Bild 10.3 Das Verhältnis von Stoff, Energie und Information

Wechselwirkung von Stoff ist praktisch immer in bezug auf die Energie vorhanden. Um Energie zu erhalten, ist also ein zu dem jeweiligen stofflichen Energieträger passendes System erforderlich. Dieses System bestimmt praktisch und zuweilen auch theoretisch, wieviel von dem Stoff für Energie genutzt werden kann. Dieser Anteil stellt im engeren Sinne den Energieträger dar. Im Bild 10.3a ist er als Schnittmenge von Stoff und Energie durch waagerechte Schraffur gekennzeichnet. Dort sind folglich beide Modelle (Stoff und Energie) verträglich und sinnvoll. Für die Größe dieses Bereiches gibt es eine Grenze, die durch die Einsteinrelation beschrieben wird:

$$E = m \cdot c^2 .$$

Mit der Definition der Information ist es etwas schwieriger. Aber schon jetzt ist eine Frage leicht zu beantworten, die häufig beachtliche Unsicherheit auslöst: „Was ist *keine* Information?"

- Information ist dort *nicht* sinnvoll oder notwendig, wo andere Beschreibungen | Modelle aussagefähig und effektiv sind. Speziell also dort, wo stoffliche und | oder energetische Beschreibungen ausreichen.

Erst so wird die obige Aussage von Wiener voll verständlich. Hierbei ist u. a. der von Wiener eingeführte Auslöseeffekt wesentlich. Besonders instruktiv ist folgendes Beispiel, wobei wir hoffen, daß es keiner mehr macht: Jemand drückt auf einen Klingelkopf und daraufhin explodiert eine Atombombe. Natürlich sind die vielfältigen Prozesse mit physikalischen Mitteln zu beschreiben. Aber versuchen Sie es doch einmal! Ist es da nicht viel einfacher zu sagen: Der Druck auf den Klingelkopf war die Information für die Explosion der Atombombe. Analoge Beispiele gibt es viele: leichtes Berühren einer Mimose, Lockruf der Vögel, Duftlenkung der Schmetterlinge, Befehl „Hinlegen", Geldnote als Ersatz für eine Arbeitsmenge usw. Hier lag ja auch seinerzeit eine der Begründungen von Wiener für die Kybernetik. Doch kommen wir zur Definition der Information zurück. Leider gibt es in der meisten Literatur zwei sich widersprechende, definitionsähnliche Aussagen, die meist sogar unmittelbar aufeinanderfolgen. Sie seien hier so formuliert:

1. Information besitzt immer einen Träger. Er ist Teil der Information.
2. Information wechselt leicht und oft den Träger, ohne sich dabei zu verändern.

Veranschaulicht man sich diese Aussagen mengentheoretisch, so folgt Bild 10.3c. Offensichtlich bedeutet in beiden Aussagen „Information" etwas anderes. Deshalb wurden sie auch mit Information$_1$

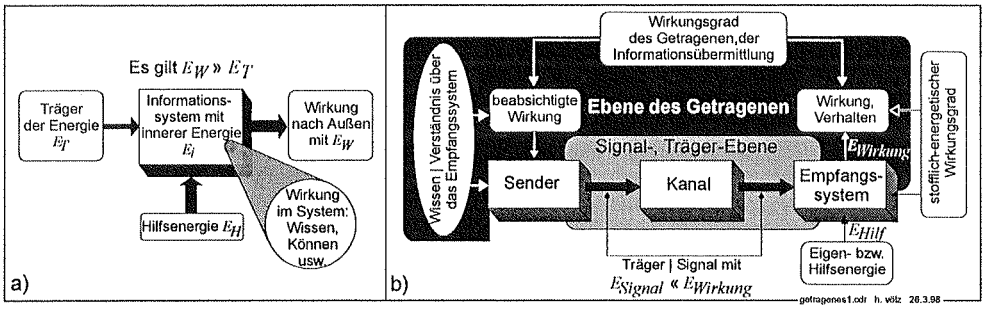


Bild 10.4 Zur Wirkung des Informationsträgers auf ein Empfangssystem

und Information$_2$ bezeichnet. Information$_1$ enthält den Träger, Information$_2$ dagegen nicht. Eine Bezeichnung mit Indizes ist aber nicht lange durchzuhalten. Deshalb entschloß sich der Autor Ende der 60er Jahre, für eine der beiden Informationen einen neuen Begriff einzuführen. Er nannte Information$_2$ das vom Träger *Getragene*. Sehr glücklich war die Bezeichnung nicht, denn sie hat zuweilen Mißverständnisse ausgelöst. Besser erscheint da schon die englische Übersetzung „carried". Doch damit wurde sofort eine entscheidende Lücke überdeutlich. Es war nun das Getragene zu definieren. Schaut man sich jedoch jetzt dazu Bild 10.3a an, so folgt sofort:

- Der *Informationsträger* – kurz der Träger – ist die Schnittmenge zwischen Information und Stoff plus Energie. Er ist also der stofflich-energetische Teil der Information (Information$_1$). In diesem Bereich gelten wieder mehrere Beschreibungen. U. a. wird auf S. 294f. gezeigt, daß es hierfür ähnlich wie bei Stoff und Energie Grenzen gibt. Im Bild sind bereits die Formeln eingetragen.

10.2 Das Getragene

Zu Beginn sei das Getragene aus der Sicht der stofflich-energetischen Trägerprozesse betrachtet. In Anlehnung und in Analogie zu Bild 10.3b folgt dann **Bild 10.4**a. Ein Träger mit der Energie E_T wirkt auf das Informationssystem ein. Er ruft in ihm und|oder seiner Umgebung eine deutlich stärkere Wirkung mit der Energie $E_W \gg E_T$ hervor. Die große Energie stammt also nicht vom Träger, wird vom ihm nicht dem System zugeführt. Sie muß das System aus seinen Ressourcen aufbringen oder durch andere Prozesse von Außen als Hilfsenergie E_H erhalten. Dies ist nur eine ausführlichere Beschreibung des oben zitierten Auslöseeffektes von Wiener. Auf dieser Ebene argumentieren wir in der Sprache der Information. Diese verstärkende Wirkung ist also das, was der Träger „unbemerkt" als Getragenes mit sich führt und das System zur „Handlung" veranlaßt. Auch diese Blackbox-Methode geht auf Wiener zurück. Wir wollen | können nicht in das System hineinschauen. Tun wir es, dann finden wir wahrscheinlich – wenn auch häufig mit großem Aufwand – stofflich-energetische Erklärungen. Aber etwas anderes ist hier viel wichtiger:

- Die Wirkung eines Informationsträgers ist in erster Linie durch Eigenschaften des Empfangssystems bestimmt. Das *Getragene* folgt nur *gemeinsam* aus den Eigenschaften des übermittelten Trägers (Signals) und aus den Eigenschaften des empfangenden Systems. Information *an sich* (im Kantschen Sinne) gibt es nicht. Information ist also ein Modell, daß wesentliche Eigenschaften des Empfangssystems berücksichtigen muß.

Meist wird mit einer Informationsübermittlung auch ein Ziel verfolgt. Dieses Ziel ist also die Wirkung, die der Träger – und nur er ist übermittelbar[2] – bezweckt. Um diese Wirkung zu erreichen, muß der Sender vieles über das Empfangssystem wissen. Nur dann kann er nämlich einen entsprechenden

[2] Hier wird also ganz bewußt von allen hypothetischen, metaphysischen Erscheinungen, wie Gedankenübertragung und Ψ-Phänome abgesehen. Auch eine Diskussion dazu ist nicht beabsichtigt.

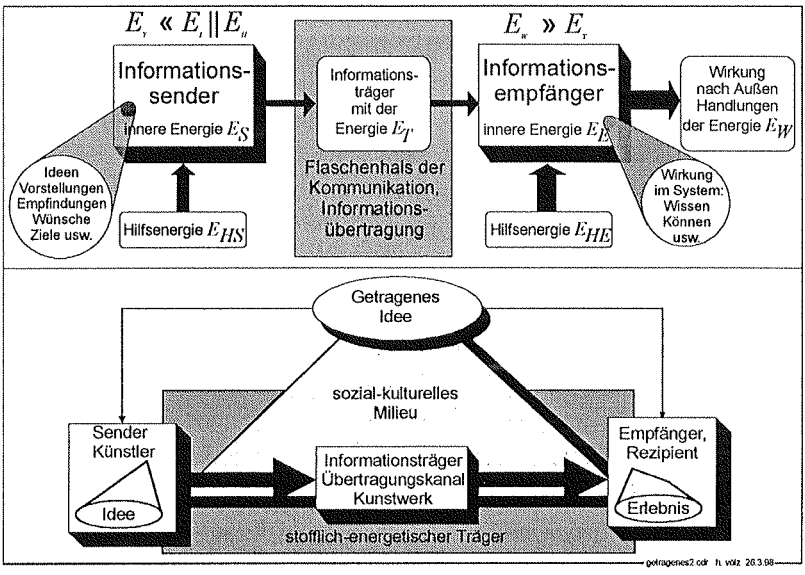


Bild 10.5 Zur Erklärung des Entstehens vom Getragenen

Träger gestalten. Dies ist ganz links im Bild 10.4b enthalten. Auf der Ebene des Getragenen (schwarz dargestellt) läßt sich daher ein Wirkungsgrad bestimmen. Er ist durch das Verhältnis von beabsichtigter zu erreichter Wirkung bestimmt. Er ist nahezu unabhängig von den stofflich-energetischen Wirkungsgraden des Systems. Bei typischen Informationssystemen ist der Wirkungsgrad der Trägerenergie E_{Signal} zur Wirkungsenergie $E_{Wirkung}$ ist immer sehr groß gegen 1. Der Wirkungsgrad von der Hilfsenergie E_{Hilf} zur Wirkungsenergie wird dagegen meist zwischen 10 bis 50 % liegen.

Wird nun das Schema von Bild 10.4b in die Darstellung von Bild 10.4a übertragen, so entsteht **Bild 10.5**a. Es macht besonders deutlich, daß der Träger | Kanal – und nur er übermittelt bei Informationssystemen etwas (s. Fußnote [2]) – einen sehr engen Flaschenhals darstellt. Über ihn müssen mittelbar | indirekt die komplexen Informationsprozesse mit minimalem energetischen Aufwand gesteuert werden. Wie komplex dabei die Zusammenhänge sein können, sei am folgenden Beispiel aus der Kunst etwas genauer beschrieben. Dazu sei von einer Schallplatte mit der Aufnahme der Fünften Sinfonie Ludwig van Beethovens (op. 67, c-moll) ausgegangen. Von den vielen Aufnahme wird jedoch eine bestimmte ausgewählt. Nämlich ein Mitschnitt von 1946 aus dem Admiralspalast in Berlin (jetziges Metropol-Theater). Die Aufführung erfolgte unter dem ersten Dirigat Wilhelm Furtwänglers nach seiner Entnazifizierung. Er war nie Mitglied der NSDAP und wurde als Mitläufer eingestuft. Karajan wurde dagegen nie der Prozeß gemacht. Dabei war er gleich zweimal, in Deutschland und in Österreich, Mitglied der „Organisation" und löste auch gegen Ende der braunen Ära Furtwängler ab. Furtwängler wollte mit diesem Konzert das Wiedererwachen des demokratischen Lebens in Deutschland unterstützen. Beethovens Sinfonie enthält ja das „Pochen des Schicksals". Dieses Klopfen war auch Pausenzeichen des Londoner Rundfunks, der in Deutschland nur bei Gefahr der Todesstrafe gehört werden konnte. Weiter steht die römische 5 „V" für Vergeltung und Victory. Nimmt es da Wunder, daß solche Zusammenhänge und dazu noch bei diesem Jahrhundertdirigenten zu einer einmaligen Interpretation führten. So gilt diese Aufnahme denn auch bei fast allen Musikkennern als die am meisten authentische Interpretation der Fünften. Sie löst folglich eine große Wirkung, ein tiefes Erlebnis aus. Doch wo befindet sich das auf der Schallplatte? Sie besitzt doch nur eine einzige, wenig verbogene Rille. Sie ist doch nur rein stofflich-struktureller Natur und kann daher beim Abspielen auch nur zu einem Informationsträger werden. Wo ist also das Getragene und wie kommt unser großes Musikerlebnis beim Anhören zustande?

Zur Erklärung soll das Bild 10.5b dienen. Jeder Mensch wächst in einem bestimmten Kulturkreis auf. Er eignet sich dabei bewußt und unbewußt ein bestimmtes sozial-kulturelles Milieu an. Es wird dabei auch von Sozialisierung gesprochen. Das ist ein Prozeß, der in vielen Punkten ein ähnliches Verhalten der sozialisierten Menschen bewirkt. Wie zeitabhängig dieser Prozeß sein kann, läßt auch das Beispiel der „Fünften" erkennen. Ein Kind, das zum ersten Mal Beethoven hört, hat bestimmt nicht das „große" Erlebnis. Ihm fehlt ja jeder Vergleich zu anderen Beethoven-Werken und noch mehr zu anderen Interpretationen der Fünften. Genau deshalb war oben auch von Musikkennern die Rede. Für das große Erlebnis ist also offensichtlich viel Musikerfahrung notwendig. Nur dann kann es sich aus dem minimierten stofflich-energetischen Träger der Platte entwickeln. Anders ausgedrückt, ist ein paßgerechtes „Systen", nämlich der fachkundige Hörer, notwendig. Damit wird aber auch klar, warum einzelne Menschen ähnliches und | oder je nach Stimmung unterschiedliches beim Abspielen der Platte hören. Das hörende „Systems" ändert sich eben fortlaufend und bleibt sich dennoch ähnlich. Bild 10.5 deutet diese Aspekte mit den verzerrten Dreiecken bei Sender und Empfänger an. Sie weichen etwas voneinander, aber auch zum mittleren sozial-kulturellen Milieu (großes Dreieck in der Mitte) ab. Für weitere Folgerungen muß aus Platzgründen u. a. auf [VÖL2], [VÖL4] bis [VÖL8] verwiesen werden. Es sei jedoch noch darauf hingewiesen, daß es einem Künstler meist sehr schwer fällt, eine Idee, die er im Kopf hat, an andere zu vermitteln. Er muß sie nämlich auf den Träger so reduzieren, daß ein mittlerer (gedachter), sozialisierter Empfänger, daraus wieder das Gewünschte konstruiert. Damit wird auch klar, daß Rezeption immer ein aktiver Prozeß ist.

10.3 Definition von Information

Die vorangegangenen Betrachtungen ermöglichen es, Information ganz formal wie folgt zu benennen:

- *Information* = Träger + Getragenes.

Doch wie so oft, gilt auch hier: Das *Ganze* (Information) ist offensichtlich mehr als die Summe seiner Teile (Träger und Getragenes), denn:

- Das *Getragene* wird entscheidend durch Eigenschaften des jeweiligen Empfangs- und teilweise auch des Sendesystems bestimmt, eigentlich sogar erst begründet.
- Der *Träger* ist stofflich-energetisch und kann entweder als Signal übermittelt werden oder in einem Speichermedium als zeitunabhängige Struktur existieren.
- *Information entsteht* erst | nur in einem erfolgreichen, oft hoch komplexen Zusammenwirken beider Teile.

Diese drei Punkte sind eine brauchbare Definition von Information. Die obige Summengleichung ist eine mögliche Kurzform. Zum Verständnis sind jedoch die meisten vorangegangenen Betrachtungen erforderlich. Hier folgen noch einige interessante Schlußfolgerungen und Ergänzungen. Dabei werden zunächst die einzelnen Aussagen thesenhaft pointiert formuliert und anschließend erläutert.

- Information besitzt keinen Wahrheitswert.

Wahrheit beruht immer auf einem Vergleich mit etwas. Damit kann auch Information nur bezüglich ihrer Wirkung im | am Empfangssystem und etwas anderem betrachtet werden. Das andere kann z. B. ein zweites System oder Objekte in der Welt sein. Erst wenn dieser Bezug festgelegt ist, können Aussagen zur Wahrheit der Information gemacht werden. Sie können dann aber ein ganzes Spektrum überstreichen, das von wahr über vermutlich, wahrscheinlich, möglich, unwahrscheinlich, irrelevant bis falsch reicht. Anders ist es mit der Bewertung von Informationssendern (Quellen). In bezug auf die Wahrheitswerte können sie u. a. als korrekt, zuverlässig, vertrauenswürdig, unsicher oder falschinformierend eingestuft werden.

- Information existiert nur in der Zeit, ist also zeitabhängig.

Information und Verhalten (in der Zeit) eines Systems gehören eng zusammen. Hierzu haben Autoren, wie z. B. Klix [KLI2] sogar Bücher geschrieben. Information dient ja dem Zweck, im | um das

System etwas zu verändern. Wenn sich nichts geändert hat, so folgt daraus, daß für das System keine relevante Information vorlag. In diesem Sinne entspricht Information für ein System einer Ursache. Jedes dynamische System – und Informationssysteme müssen ja dynamisch sein – ändert seine Eigenschaften und|oder Zustände in Laufe der Zeit. Daher kann auch ein und derselbe Träger zu verschiedenen Zeiten unterschiedliches bewirken. Als eine Konsequenz folgt hieraus:

- Gespeicherte „Information" ist keine (eigentliche) Information.

Mit der Formulierung „gespeicherte Information" und auch z. T. „Informationsspeicherung" wird dem Sprachgebrauch gefolgt. Die Anführungszeichen sollen dabei den formalen Widerspruch in der These aufheben. Informationsspeicherung beseitigt ja absichtlich die Zeitabhängigkeit, indem sie Eigenschaften eines momentanen Zustandes als eine beständige Struktur fixiert|„einfriert". Es wird also ausschließlich ein stofflich-energetischer Informationsträger erzeugt. Gespeicherte Information ist also immer nur ein spezieller Informationsträger. Infolge seiner Statik kann er nicht einmal direkt auf ein System einwirken. Hierzu bedarf es eines Wiedergabeprozesses, der aus dem gespeicherten Träger wieder einen zeitlichen Träger (oft ein Signal) erzeugt. Erst damit kann das System im Sinne der Information beeinflußt werden. Die Ursache der Speicherung *kann* aber durchaus Information gewesen sein und ist es sogar meist. Denn es ist ja gerade der eigentliche Zweck der Speicherung, Information für den zukünftigen Gebrauch aufzuheben. Folglich gilt ergänzend und präziser:

- Gespeicherte „Information" ist (nur) potentielle Information.
- Gespeicherte „Information" ist leicht zu vervielfältigen aber
- Neue Information ist extrem schwer zur erzeugen.

Das Kopieren und damit das Vervielfältigen von „gespeicherter Information" ist heute fast trivial. Die gedruckten Massenmedien, CD, Videokassetten usw. beruhen hierauf. Die Bürokopiertechnik erweitert die Möglichkeiten. In der Rechentechnik kann es jedermann. Warum sind dann die Urheberrechte so wichtig? „Neue" Information ist sehr schwierig zu erzeugen. Jeder einzelne Mensch fügt in seinem ganzen Leben im statistischen Mittel über die Menschheit nur etwa ein Bit zum Gesamtwissen hinzu, [VÖL4]280ff. [VÖL2] S. 326ff. Die Spitzenwerte der individuellen Kreativität liegen bei vielen Tausend Bit. Da mit Information viel Macht und Geld zu gewinnen ist, möchten natürlich viele ihr geistiges Gut geschützt wissen.

- Information kann im Prinzip nicht verloren gehen.

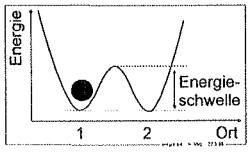
Sobald neue Information entstanden ist, setzt nämlich die massenhafte Vervielfältigung ein. Die ganze Menschheitsgeschichte beweist diesen Trend. Schließlich basieren hierauf ganz erheblich die Archäologie, Geschichtswissenschaft usw. Selbst die Physik begründet mit dem Rudiment Reststrahlung den Urknall. Speichern von Information findet also überall und immerzu statt. Weder Verbote noch Bücherverbrennungen haben Information vernichten können. Selbst durch Töten von Menschen sind Ideologien – positive und negative – nicht zu beseitigen gewesen. Auch die Programme zur Wende in der DDR wurden auf Disketten verbreitet. Für die Reden von Chomeni geschah es auf Tonbandkassetten. Es gilt also:

- Bei einem entsprechenden Stand der Informationsspeicherung ist einmal vorhandene Information prinzipiell immer verfügbar.

Das hat positive und negative Seiten. Die Verbreitung kann – wie eben gezeigt – zur *Demokratisierung* führen. Gegen „schädigende" Information müssen aber völlig neue Methoden gefunden werden, welche wohl vor allem moralisch wirken.

- Information ist im Prinzip ressourcenfrei.

Das Empfangssystem für Information kann als Meßapparatur betrachtet werden. Sie stellt fest, ob ein Informationsträger ankommt oder nicht. Sie muß also zumindest zwei Zustände unterscheiden können. Das einfachste Modell dafür ist ein zweifach entartetes System (Bildchen rechts). Die



Kugel kann sich in einer der beiden Energiemulden befinden. Wo sie sich befindet, weiß man vor der Messung nicht. Für jedes Messen ist aber Energie erforderlich. Um ein richtiges Ergebnis zu erhalten, muß sie kleiner gleich der Energieschwelle ΔE sein. Nach Boltzmann gilt für die thermodynamische Entropie

$$S = k \cdot \ln(W)$$

Darin sind W die Wahrscheinlichkeit für den Zustand und k die Boltzmann-Konstante. Vor der Messung ist die Wahrscheinlichkeit für die Lage der Kugel in jeder Mulde ½. Nach der Messung ist die Lage bekannt und damit die Wahrscheinlichkeit =1. Jede Änderung der Entropie ist über die absolute Temperatur T mit einer Ernergieänderung, hier also ΔE, verbunden. Folglich gilt:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta S \cdot T \\ &= k \cdot T \cdot [\ln(1) - \ln(0{,}5)] \\ &= k \cdot T \cdot \ln(2)\,. \end{aligned}$$

Diese Energiemenge ist also mindestens für ein Bit erforderlich. Wegen der zentralen Bedeutung wird diese Formel noch einmal auf S. 306 anders abgeleitet. Die Energie ist nämlich so klein, daß heutige Speichermedien davon noch um viele Zehnerpotenzen entfernt sind [VÖLD]. Doch dies ergäbe nur eine bedingte Ressourcenfreiheit. Viel wichtiger ist der Auslöseeffekt. Denn dadurch wird mit kleinstmöglicher Trägerenergie eine größtmögliche Wirkung erreicht. Letztlich beruht hierauf ganz wesentlich die Produktionssteigerung durch den Einsatz von Mikroelektronik. In der Informatik wird dies durch die Hierarchisierung von Programmen verständlicher. Ein „simpler" Befehl kann eine stunden-, ja tage- und wochenlange Rechnung auslösen.

10.4 Kontinuierlich, diskret, digital, analog

Diese vier Begriffe werden in der Technik nicht immer korrekt | eindeutig benutzt. Da sie jedoch für viele Anwendungen wichtig sind, sollen sie hier allgemein eingeführt werden. **Kontinuierlich** leitet sich von lateinisch *continens* bzw. *continuus* ab und bedeutet dann zusammenhängend, angrenzend an, unmittelbar folgend, ununterbrochen, jemand zunächst stehend. *Continuare* bedeutet weiter aneinanderfügen, verbinden, fortsetzen, verlängern, gleich darauf, ohne weiteres und schließlich *contingere* berühren, kosten, streuen, jemandem nahe sein, beeinflussen. Das stimmt gut mit dem *Kontinuum* der reellen Zahlen der Mathematik (zwischen zwei beliebigen Zahl gibt es immer eine weitere) und der *Kontinuumsmechanik* der Physik (hier gibt es keine Mikrostruktur bzw. keine kleinsten Teilchen) überein. Auch bei kontinuierlichen *Signalen* gibt es beliebig viele Zwischenwerte.

Diskret ist lateinischen Ursprungs. Zu ihm gehören *discretion* (Unterscheidungsvermögen, Urteil und Entscheid), *discretus* (abgesondert, getrennt) und *discernere* (scheiden, trennen, unterscheiden, beurteilen, entscheiden). Diskret drang im 16. Jahrhundert in die deutsche Sprache ein. Umgangssprachlich bedeutet es heute: taktvoll, rücksichtsvoll, zurückhaltend, unauffällig, unaufdringlich, vertrauensvoll, geheim, verschwiegen. In der Technik verweist diskret auf Größen, die nur endlich vieler (meist weniger) genau definierter Werte fähig sind. Die Quantenphysik zeigt, daß auch die Natur mit diskreten Werten (Energiequanten) umgeht. In der Mathematik betrifft diskret einzelne Punkte oder Elemente.

Kontinuierlich (k) und *diskret* (d) sind also zwei entgegengesetzte Eigenschaften. Kontinuierliche Werte liegen beliebig dicht beieinander, diskrete dagegen genau unterscheidbar und gegeneinander abgegrenzt. Wenn kontinuierliche Amplituden auf diskrete Werte „gezwungen" werden, spricht man vom Vorgang des Quantisierens. Dieser Begriff kommt vom lateinischen *quantitas* (Größe, Anzahl) bzw. *quantum* (wieviel, so viel wie, inwieweit, irgendwie). In der Physik erlangte das Quant durch Max Plancks eine sehr spezifische Auslegung im Sinne von diskreten Energiequanten. Im Zeitbereich ist dagegen der Begriff des Abtastens gebräuchlich. Allgemein kann also kontinuierlich und diskret sowohl auf die Amplitude (Energie) als auch auf die Zeit angewendet werden. Dadurch ergibt sich eine Matrix, wie sie **Bild 10.6**a (umseitig) zeigt. Für die vier möglichen Fälle sind dort auch Signalverläufe und Anwendungsbeispiele eingetragen, und es gilt:

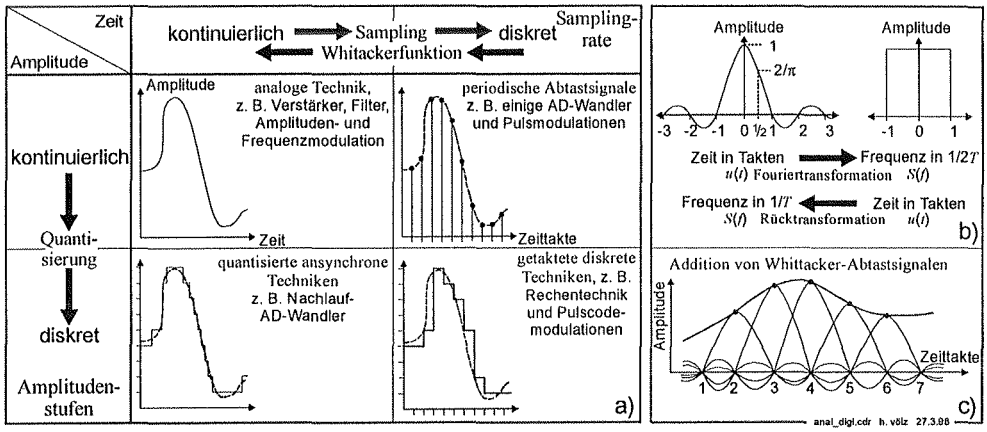


Bild 10.6 Die Begriffe diskret und kontinuierlich bei der Zeit und der Amplitude

- Zu Zeit (k) und Amplitude (k) gehört die vielfach und anfänglich benutzte, aber wohl nie überholte *analoge* (eigentlich falscher Begriff s. u.) Technik. Hier kann zu jedem Zeitpunkt ein anderer Ampliudenwert existieren. Außerdem sind beliebig fein abgestufte Amplituden möglich.
- Bei Zeit (d) und Amplitude (k) existieren Amplitudenwerte nur zu ausgewählten, meist durch einen Takt vorgegebenen Zeiten. Sie werden vielfach durch Abtastung gewonnen und zwischendurch gespeichert. Dann springt die Amplitude zu jedem Zeittakt auf den neuen Wert.
- Bei Zeit (k) und Amplitude (d) liegt ein deutlich anderes Verhalten vor. Die Amplitude kann nur wenige, definierte Werte annehmen und springt immer dann zum anderen Wert, wenn das Originalsignal näher bei diesem Wert vorliegt. Das kann prinzipiell zu jeder beliebigen Zeit erfolgen. Für die Zeit gibt es also keine sonstigenVorgaben.
- Sind Zeit (d) und Amplitude (d), dann kann das Signal nur bestimmte Amplituden annehmen und der Übergang von einer zur anderen Amplitude kann nur zu den Taktzeiten erfolgen.

Genau in der genannten Reihenfolge weicht das erhaltene Signal immer mehr vom doppelt kontinuierlichen Ausgangssignal ab. Das zeigen einmal die Kurvenverläufe im Bild 10.6a. Das ist aber leicht auch anschaulich einzusehen. Durch das Diskretisieren geht eben Information verloren. Dabei besteht aber ein deutlicher Unterschied zwischen der Zeit- und der Amplitudendiskretierung. Bei der Amplitude gibt es keinen fehlerfreien Rückweg zum Original. Es bleiben immer gewisse Amplitudenfehler als Quantierungsrauschen übrig. Für die Zeit zeigt bereits Shannon [SHA] 1940, daß unter gewissen Bedingungen das Original wieder exakt herstellbar ist. Bei einem Signal mit der Bandbreite B müssen die Proben (Abtastwerte) in einem zeitlichen Abstand $T_A \leq 1/(2 \cdot B)$ genommen werden. Notwendig für die Wiedergabe ist dann nur ein idealer Tiefpaß. In Bild 10.6b (rechts) ist das die Rechteckkurve. Bei einer Stoßerregung erhält man hinter ihm ein wellenförmiges Signal gemäß der Whittacker- bzw. Spaltfunktion $\sin(x)/x$ (Kurve links im Bild10.6b). Werden nun die Stöße entsprechend den Abtastwerten entsprechend ihrer zeitlichen Folge überlagert, so ergibt sich das Bild 10.6c. Die sich insgesamt dabei einstellende Hüllkurve ist – wie es Shannon bewies – identisch mit der ursprünglichen Funktion. Dies Ergebnis verwundert: Wie können endlich viele Werte exakt unendlich viele erzeugen? So verblüffend wie das auf den ersten Blick erscheint, ist das aber gar nicht. Wir kennen viele solche Fälle. Beispiele hierzu enthält **Bild 10.7**d. Offensichtlich tritt so etwas immer dann ein, wenn außerdem (stillschweigend) Gesetzmäßigkeiten hinzugenommen werden. Bei der Geraden und beim Kreis sind es die mathematischen Funktionen. Im Fall der Rekonstruktion des Zeitverlaufs sind das der ideale Tiefpaß und die hinreichend dicht gelegenen Abtastwerte. Offen bleibt jedoch die Frage, warum so etwas nicht in der Amplitudenachse möglich ist. Darauf gibt es (noch) keine Antwort. Daher sei jetzt zu den Begriffen analog und digital übergegangen.

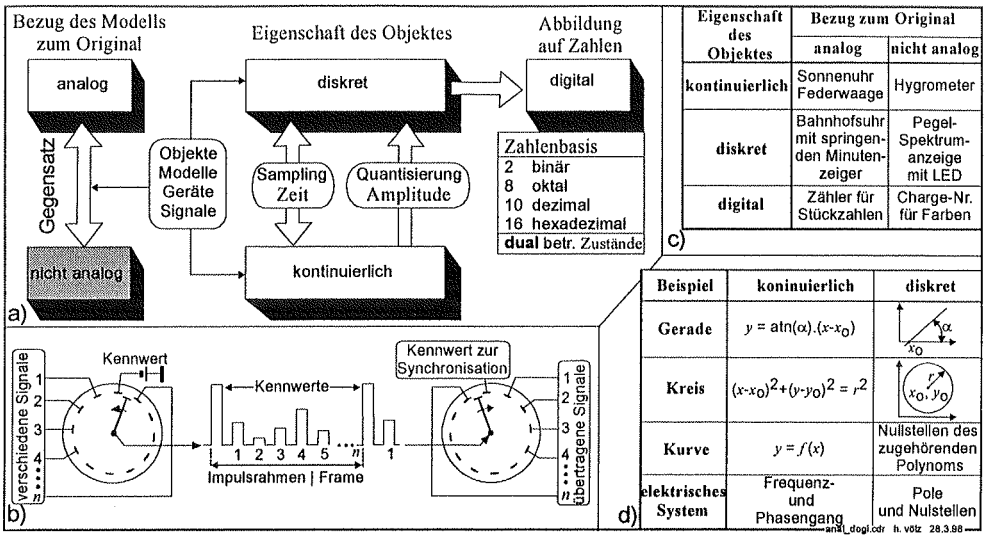


Bild 10.7 Zusammenhang von analog, digital, kontinuierlich und diskret

Analog enthält das griechische Wort *logos* (etwa Vernunft). Verwandt damit ist die heutige Logik. Das kann zu Widersprüchen führen (s. u.). Meist werden in ihr nämlich binäre Entscheidungen im Sinne von wahr ⇔ falsch benutzt, sowie jegliches Dritte ausgeschlossen. Die lateinische Vorsilbe *ana* bedeutet auf, wieder, aufwärts, nach oben. So entsteht das lateinische *analogia*, was soviel wie mit der Vernunft übereinstimmend, aber auch Gleichmäßigkeit bedeutet. Aus diesem Stamm drang analog um 1800 in die deutsche Sprache ein. Heute verwenden wir analog im Sinne von übereinstimmend, angeglichen, angepaßt, vergleichbar. Das Substantiv zu analog ist *Analogie.* Dieser Begriff wird dann im Sinne von Entsprechung, Ähnlichkeit, Gleichwertigkeit und Übereinstimmung gebraucht. Er wird in mindestens drei Fachgebieten etwas spezieller verwendet:

- In der *Wissenschaft* wird von einer Analogie dann gesprochen, wenn zwei Systeme funktionell gleichartiges Verhalten zeigen. Sie können dabei unterschiedliche Bestandteile und | oder Strukturen besitzen. Dies war besonders deutlich beim Analogrechner. Aber auch mechanische oder wärmemäßige Anordnungen werden oft über elektrische Analogien berechnet. Im Zusammenhang mit Bild 2.2 auf S. 11 wurde so die biologische Zelle durch ein elektrisches Ersatzschaltbild genähert. In diesem Sinne bildet die übliche Analoguhr mit ihren sich drehenden Zeigern die Bewegung des Schattens einer Sonnenuhr bzw. die Bewegung der Erde um ihre Achse nach.
- In der *Biologie* wird von analogen Organen bezüglich einer vergleichbaren Morphologie | Struktur gesprochen. So verwirklichen die strukturell recht unterschiedlich aufgebauten Augen der Wirbeltiere, der Tintenfische und der Insekten genau die eine analoge Funktion des Sehens.
- In der *Rechtsprechung* wird der Begriff Analogie dann angewendet, wenn ein rechtmäßig nicht geregelter Tatbestand auf einen etwa wesensgleichen bezogen wird. Eine Rechtsprechung nach dieser Methode ist nicht zulässig.

Das Gegensatzpaar „analog (a) ⇔ nicht analog (n)" betrifft also einen Bezug zwischen zwei Modellen | Objekten | Dingen usw. oder einem Modell und einem Objekt. Als Folge des bisherigen Betrachtungen ergibt sich Bild 10.7a. Ähnlich wie zuvor, bei vier verschiedenen Objekten, Modellen, Geräten, Signalen usw., gibt es jetzt vier Kombination von (a), (n) und (k), (d). Beispiele hierzu enthält Bild 10.7c. Dort ist auch bereits das noch zu behandelnde digital eingetragen.

Digital ist der letzte zu erklärende Begriff. Er geht auf das lateinische *digitus* (Finger) zurück. Früher bedeutete es auch eine Maßeinheit mit 18,5 mm Fingerbreite. Inhaltlich kann es mit zählen, ziffernmäßig, in Zahlen übersetzt werden. Digital ist also nur im Kontext mit Zahlen sinnvoll. Sie können aber eindeutig nur diskreten Werten zugeordnet werden. Begriffe wie binär, oktal, dezimal, hexadezimal usw. betreffen dann die jeweils benutzte Zahlenbasis. Zu beachten ist jedoch, daß *dual* nicht für eine Zahlenbasis, sondern für physikalische Systeme|Speicherzellen mit nur zwei möglichen Zuständen gilt. Durch Zusammenfassung von n solchen Zellen können dann 2^n diskrete Zustände geschaffen werden, die einem solchem Zahlensystem zugeordnet werden.

Insgesamt folgt somit, daß digital und analog im strengen Sinn keine gegensätzlichen Begriffe sind. Diese falsche Auffassung entsteht vor allen dadurch, daß die beiden wichtigsten Informationstechniken landläufig so bezeichnet werden. Analoge Technik müßte dabei aber eigentlich kontinuierlich und digitale oft auch diskrete genannt werden. Da heute allgemein behauptet wird, daß der Digitaltechnik die Zukunft gehöre, stellt sich die Frage nach ihren wesentlichen Vorteilen. Besonders wichtig dürfte die Möglichkeit der sequentiellen Verschachtelung beliebig vieler Signale sein. Das Prinzip zeigt Bild 10.7b. Hierdurch wird es auch möglich, alle digitalen Signale einheitlich zu behandeln und über nur einen Kanal zu übertragen. Ein weiterer Vorteil besteht in der immer wieder möglichen exakten Rekonstruktion der einmal diskretisierten Werte. Die „Verluste" durch die Diskretisierung der Amplitude müssen dabei immer hingenommen werden. Sie können praktisch nur durch hinreichend viele diskrete Werte unmerklich gemacht werden. Zu beachten ist jedoch, daß die „analoge" Technik grundsätzlich immer notwendig bleibt, nämlich zumindest dort, wo kleine Signale auftreten. Das ist bei vielen Messungen, bei Antennen, Mikrophonen usw. unvermeidbar. Hier muß zunächst ein „analoger" Verstärker benutzt werden. Erst danach können die Signale mit einer ebenfalls weitgehend analogen Schaltung diskretisiert und (A/D-Wandler) digitalisiert werden.

10.5 Redundanz und Relevanz

Informationen werden vom Sender über einen Kanal zum Empfänger übertragen. Im folgenden interessiert fast ausschließlich ein technischer Kanal. Dort liegen nur Informationsträger vor, die infolge ihrer Zeitabhängigkeit Signale heißen. Oft werden ihre Eigenschaften jedoch nicht immer mit denen des Kanals übereinstimmen. Dann sind Anpassungen erforderlich. Bei kontinuierlichen (analogen) Signalen dienen dazu die Modulationen und bei digitalen (diskreten) Signalen die Codierungen. Diese Spezialgebiete der Nachrichtenübertragung werden in diesem Buch nicht behandelt. Wichtiger sind hier andere Änderungen der zu übertragenden Signale, welche relativ eng mit der Mensch-Technik-Schnittstelle zusammenhängen. Sie sind im **Bild 10.8** schematisch dargestellt und betreffen zwei große Gebiete:

- Eine *Komprimierung* ist vorteilhaft bis notwendig, wenn große Datenmengen zu übertragen oder zu speichern sind. So wird die Übertragungszeit verkürzt oder die Speicherkapazität verkleinert.
- *Datenschutz* ist aus sehr unterschiedlichen Gründen erforderlich. Damit werden Übertragungs- bzw. Speicherfehler erkannt und wenn möglich beseitigt. Andere Schutzmaßnahmen betreffen u. a. die Geheimhaltung, den Urheberschutz usw.

Bei der Komprimierung sind zwei wichtige Fälle zu unterscheiden, die verlustlose und die verlustbehaftete. Bei der *verlustlosen* Komprimierung muß die endgültig beim Empfänger vorhandene Datei in jedem Bit mit der ursprünglichen Sendedatei übereinstimmen. Für die Übertragung kann also nur jenes entfernt werden, was sich später wieder ergänzen läßt. So etwas bezeichnet man mit *Redundanz*. Wenn man von der speziellen Shannon-Redundanz (s. S. 302f.) absieht, hängt die Redundanz jedoch von vielen Faktoren ab und ist vor allem kaum ein Kennzeichen der Datei. Wesentlich stärker gehen die verwendeten Verfahren ein. Das ähnelt etwas den Aussagen auf S. 296f. im Kontext von Bild 10.7d. Einmal können die benutzten Verfahren vielfältige Regelhaftigkeiten in der Datei ermitteln und dann für die Übertragung entfernen. Diese Regelhaftigkeiten müssen dem Decoder mitgeteilt werden oder ihm bekannt sein. Durch sie kann er aus den übertragenen Daten wieder die ursprüngliche Datei herstellen. Bei anderen Verfahren sind auf beiden Seiten ganze Texte, Bilder usw. unter einer Numerierung gespeichert. Dann genügt für jedes dieser Objekte die Übertragung der Codenum-

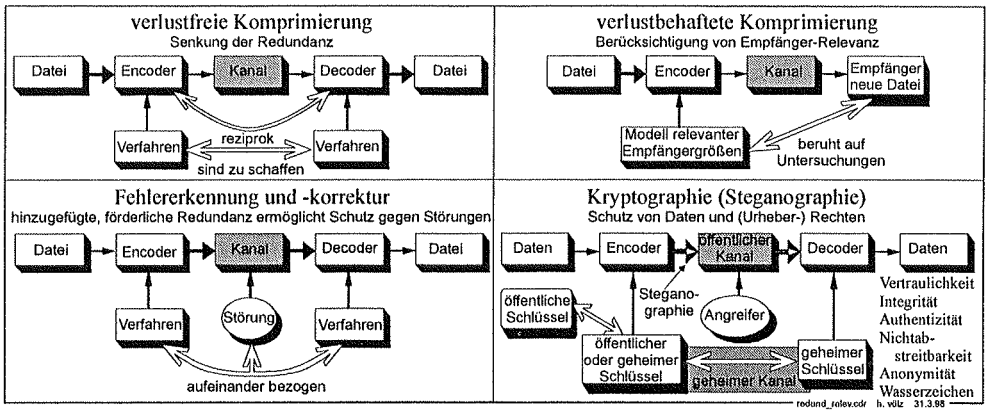


Bild 10.8 Methoden der Komprimierung und des Datenschutzes

mer. So lassen sich teilweise extrem große Komprimierungsfaktoren erreichen. Aus beiden Prinzipien lassen sich viele Verfahren konstruieren, aber auch neue erfinden. So wird verständlich, daß mehr das Verfahren als die Datei den Grad der Komprimierung bestimmt. Folglich gilt:

- *Redundanz* ist ein sehr relatives Maß. Es wird stark durch das verwendete Kompressionsverfahren und weniger durch die zu komprimierende Datei beeinflußt.

Völlig anders arbeitet die *verlustbehaftete* Komprimierung. Für sie ist der Begriff der *Relevanz* entscheidend. Hierbei wird davon ausgegangen, daß jeder konkrete Empfänger nur einige Signale aufzunehmen vermag. Für den Menschen sind das jene physiologischen Grenzen, die in den ersten Kapiteln dieses Buches behandelt wurden. So können wir keine Frequenzen unterhalb von 20 Hz und oberhalb von 20 kHz hören. Weiter verdeckt ein lauter Ton teilweise andere leisere Töne. Solche Effekte ermöglichen es, alle von Empfänger prinzipiell nicht zu nutzenden, also irrelevanten Komponenten aus dem Signal heraus zu nehmen. Damit erreicht den Empfänger natürlich eine z. T. erheblich veränderte Datei. Doch er vermag diesen Unterschied nicht wahrzunehmen. Oft hängt die Relevanz auch von der Interessenlage des Empfängers ab. So genügt es uns zuweilen, einen Text zu lesen. Statt den ursprünglichen | eigentlichen Schall zu hören, sehen wir nur Zeichen. Im Rechner existieren sie z. B. als ASCII-Code. Hierbei gehen natürlich das Klangbild der Sprache, die Betonung der Wörter und die Individualmerkmale des Sprechenden verloren. Das ergibt dafür aber eine vieltausendfache Verdichtung. So etwas ist aber beim künstlerischen Wort unzulässig. Insgesamt gilt also:

- *Relevanz* ist ein Maß, daß nur durch den Empfänger bestimmt ist. Dabei sind zwei extreme Werte zu unterscheiden. Die *absolute* Relevanz ist durch die Unmöglichkeit der Aufnahme von gewissen Signalen gegeben. Eine *relative* Relevanz berücksichtigt auch Bedürfnisse, Interessen, Wünsche usw. des Empfängers. Dabei wird noch weniger Information aufgenommen.

Auch für den *Schutz von Daten* sind zwei Hauptvarianten zu unterscheiden (Bild 10.8 unten):

- *Fehlererkennung* und *-korrektur* wirken den verschiedensten technischen Störungen auf dem Übertragungskanal entgegen.
- Unter *Kryptographie* wird eine Vielzahl von Varianten zusammengefaßt, die – bewußt vereinfacht – einen Schutz gegenüber „böswilligen" Menschen (Angreifern) ermöglicht.

Der Fehlerschutz, also die Fehlererkennung (EDC = error detecting code) und die Fehlerkorrektur (ECC = error correcting code) sind in gewisser Hinsicht das Gegenteil der verlustfreien Komprimierung. Sie entfernen keine als redundant erkannte Daten, sondern fügen bestimmte Daten hinzu. Dadurch erzeugen sie eine genau definierte, förderliche Redundanz. Störungen im Kanal verändern nun

die Datei und damit (meist) auch die bekannte förderliche Redundanz. Der EDC ist daraufhin ausgelegt, daß nur eine Meldung erfolgt: Die Übertragung war gestört. Der ECC benötigt mehr förderliche Redundanz. Dadurch ist er imstande, gewisse Störungen auch wieder zu entfernen. Er besitzt meist einen zusätzlichen EDC-Anteil. Die Theorie des Fehlerschutzes ist eine der „schönsten" technischen Theorien. Sie ermöglicht es, bei bekannten Störungen und gegebenen Kanaleigenschaften alle Details vollständig konstruktiv zu berechnen. Die Verfahren reichen bis zur elektronischen Schaltung. Die Mathematik ist jedoch so komplex, daß sie nur wenige Spezialisten gut beherrschen. Ihre genaue Wirkungsweise ist jedoch kaum zu veranschaulichen.

Das Wort *Kryptographie* geht auf das griechische *krypte* zurück und bedeutet unterirdischer, geheimer Gang, Gewölbe, Gruft. Das Verb *kryptein* kann mit verbergen, verstecken, verhüllen übersetzt werden. Daher bedeutet Krytographie etwa Geheimschrift. Man will damit also etwas gegenüber anderen geheim halten. Für Geheimhaltung gibt es zwei gewichtige Gründe. Der erste ist, weil ich Böses im Schilde führe. Daher benutzten und benutzen die „Herrschenden" ähnlich den „Kriminellen" oft die Kryptographie für Kriegspläne bzw. bei der Planung von Gewaltakten. Der zweite Grund ist, weil ich mich gegen derartiges Böse schützen muß. Ich darf keine möglichen Angriffspunkte sichtbar werden lassen. So ist es verständlich, daß dieses Gebiet vielfältig in die Geschichte – auch der Spionage und der Legende – eingegangen ist. Schon immer galten die beiden o. g. gegensätzlichen Richtungen sowohl im großen Maßstab wie im kleinen privaten Bereich. So ist es nicht verwunderlich, daß uns bereits aus Sparta – also von vor 2500 Jahren – Verfahren der Geheimhaltung bekannt sind. Auch Julius Caesar ist für sein Verfahren berühmt geworden. Im Laufe der Geschichte sind ständig sowohl leistungsfähigere Verfahren entwickelt als auch neue Anwendungsgebiete erschlossen worden. Die klassischen Standardverfahren sind im wesentlichen symmetrisch. Mit einem geheimen „Schlüssel" (Zeichenfolge | Algorithmus) wird der zu übermittelnde Text so verändert, daß er für Uneingeweihte – und damit auch für potentielle „Angreifer" – praktisch nicht lesbar ist. Er kann dann über einen öffentlichen Kanal übertragen werden. Der Empfänger kennt den Schlüssel und kann den chiffrierten Text dadurch wieder lesbar machen. Diese Methode hat zwei Schwachstellen. Einmal muß der Schlüssel auf einem zusätzlichen, geheimen und zuverlässigen Kanal ausgetauscht werden. Zum anderen läßt sich der Text über den öffentlichen Kanal vielleicht doch, wenn auch mit großem Aufwand entschlüsseln (knacken). Aus dieser Sicht kann die Botschaft von Arecibo (s. S. 288) auch als Geheimbotschaft angesehen werden. Weiter kann eventuell die Botschaft im öffentlichen Kanal unbemerkt geändert werden. Daher muß das Verfahren sehr komplex sein. Das bedeutet Aufwand, Zeit usw. Daher wurden mehrere Verfahren genormt und als Hardware hergestellt. Eine völlig neuartige Möglichkeit zeigten 1976 Diffie und Hellman: Geheimhaltung geht auch mit einem öffentlichen und dem zugehörigen geheimen Schlüssel. Der öffentliche Schlüssel ist frei verfügbar und dient zum Chiffrieren. Eine solche Botschaft ist nur mit dem zugehörigen geheimen Schlüssel zu entziffern. Dadurch entfällt der geheime Kanal. Hierauf beruht die RSA-Chiffre (Rivest, Shamir und Adleman), die mit großen Primzahlen operiert. Der Absender wählt einmalig eine entsprechende Zahl, führt die entsprechenden mathematischen Operationen durch und erhält den geheimen und den öffentlichen Schüssel. Nur den öffentlichen Schlüssel hinterlegt er auf einer hierfür eingerichteten Datenbank unter seinem Namen. Wenn ihm nun jemand eine geheime Botschaft schicken will, chiffriert der sie mit dem öffentlichen Schlüssel. Sie ist dann nur mit meinem geheimen Schlüssel zu entziffern. Genau den entgegengesetzten Weg geht die *Steganographie*. Sie versteckt in bekannten Objekten, wie Bildern oder Schall, die eigentliche Information. Erstens ist es schwer zu erraten, in welchem „Scheinobjekt" die eigentliche Information verborgen ist. Zweitens muß man wissen, wie sie dort codiert ist. Bei Bildern werden hierzu meist die niederwertigen Bit der Pixel benutzt. Im Normalfall, wie z. B. beim Scannen, sind sie ohnehin verrauscht. Unauffällig können ihnen daher Werte gemäß der zu schützenden Information aufgeprägt werden. Natürlich muß hierzu eine wesentlich größere und damit redundante Datenmenge übertragen werden.

Heute besteht eine große Anwendungsbreite der Kryptographie. Bezüglich der Schutzwürdigkeit existieren daher auch mehrere Sicherheitsattribute:

- Die *Vertraulichkeit* betrifft die Notwenigkeit | Sicherheit mit der ein Inhalt gegenüber Uneingeweihten verborgen werden muß.

- Die *Integrität* einer Nachricht ist ein Maß für die Gewähr, daß die Nachricht nicht durch einen Angreifer verfälscht werden kann. Zumindest muß erkennbar sein, ob solche Störmaßnahmen erfolgt sind.
- Die *Authentizität* verlangt, daß der Empfänger und|oder der Sender feststellen kann, ob er auch wirklich mit dem gewünschten Partner in Verbindung steht. Es muß also erkennbar sein, wenn sich ein Angreifer statt des Partners in den öffentlichen Kanal eingeschlichen hat.
- Die *Nicht-Abstreitbarkeit* entspricht dem Einschreiben mit Rückantwortschein. Sender und|oder Empfänger bestätigen sich so verbindlich die Sendung|den Empfang der Nachricht. Hierzu gehört auch die elektronische Unterschrift.
- Die *Anonymität* ist eine Garantie für Sonderfälle. Bei öffentlichen Wahlen, soziologischen Umfragen, Recherchen in Datenbanken, aber auch bei in Notgeratenen (mißbrauchten Kindern oder mißhandelten Ehepartnern) muß der Absender der Botschaft unerkannt bleiben.
- Das *digitale Wasserzeichen* (Signatur) wird u. a. zum Schutz von Urheberrechten eingesetzt. Hierbei erhalten z. B. Bilder|Audiosignale zusätzliche Information eingeprägt, die mit normalen Methoden nicht feststellbar sind. Sie sind aber nicht – auch nicht durch Bearbeiten – vollständig zu entfernen. Im Streitfall dienen sie so als Beweis für die unerlaubte Nutzung.

10.6 Shannon-Theorie diskreter Werte

Schon in den 20er Jahren wurde es einigen Technikern klar, daß eine Theorie der Kommunikation erforderlich ist. Damals sprach noch niemand von Information. Wegen ihres Fehlens wurden Telephon und Telegraph sowie in den Anfängen auch Rundfunk und Fernsehen rein intuitiv entworfen. Die ersten Vorarbeiten stammen u. a. von Gabor, Hartley, Kotelnikow, Küpfmüller und Szillard. Doch sie blieben alle Stückwerk oder waren unbefriedigend. Am **24.3.1940** reicht Shannon die entscheidende Arbeit beim JIRE (Journal of the Institute of Radio Engineering) ein. Sie wurde sofort als geheim erklärt. Es war Krieg und Zusammenhänge mit der Krytographie waren unübersehbar. Sie erscheint dann neun Jahre später als [SHA1] und schließlich erweitert als die heute allgemein zitierte Quelle [SHA2]. Leider ist hier der „unwissenschaftliche Kommentar" von Weaver vorangestellt. Weaver hält es darin nicht einmal für nötig, auf den Ursprung seiner, in diesem Kontext „unzulässigen" Aussagen, aus der Semiotik (z. B. Peirce und Morris) zu verweisen. Bis heute ist unklar, warum erst vor wenigen Jahren der ursprüngliche Einreichungstermin von [SHA1] bekannt wurde. Daher ist es heute geradezu spannend, wie sich Wiener [WIE] noch 1948 um den Inhalt, der ihm gewiß bekannten Arbeit windet. Schließlich war es offensichtlich Wiener, der sowohl den Begriff Information als auch die Bezeichnung Entropie (s. u.) vorschlug (siehe auch [VÖL2] S. 13 und 27). Aus Shannons Arbeit hat sich eine sehr umfangreiche und umfassende Theorie der Nachrichtentechnik entwickelt, zu der u. a. auch alle Gebiete gehören, die im Zusammenhang mit Bild 10.8 behandelt wurden. Sie ist daher von so fundamentaler Bedeutung, daß ihr eigentlich ein Nobelpreis gebührt, aber für Mathematik und Technik gibt es halt keinen. Auch die oft als gleichwertig bezeichnete Fields-Medaille wurde Shannon m. W. nicht zuteil. Wahrscheinlich war dafür die Arbeit zu praxisbezogen.

In diesem Abschnitt wird nur auf die wesentlichen Grundlagen bei den diskreten Signalen eingegangen. Sie betreffen drei Fälle: die Quellenentropie (**Bild 10.9a**, übernächste Seite), die Präfixcodierung (Bild 10.9b) und den Informationsfluß (Bild 12.9c). Im nächsten Abschnitt folgen dann Ergänzungen zu kontinuierlichen Signalen.

Als Eigenschaft einer Signalquelle definierte Shannon die **Quellen-Entropie**. Zu ihrer Berechnung sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen:

- Es muß ein *Alphabet* vorliegen|gewählt werden|festgelegt sein. Bei der Anwendung der Theorie darf es dann nicht mehr geändert werden. Ansonsten ist die Wahl der Zeichen|Symbole völlig frei. Es können z. B. diskrete Signale, Buchstaben, Zahlen oder musikalische Noten sein.
- Für die einzelnen Zeichen|Symbole muß die *Wahrscheinlichkeit* ihres Auftretens bekannt sein. Hierfür sind drei Fälle zu unterscheiden:

- Die *Apriori*-Wahrscheinlichkeit ist unabhängig von Versuchen und im voraus prinzipiell bekannt. Dies gilt, z. B. beim Würfel oder bei der Urne, allein auf Grund von physikalischen Gesetzen.
- Die *Apostori*-Wahrscheinlichkeit wird aus einer hinreichend großen Anzahl von Versuchen als relative Häufigkeit ermittelt. Beispiele hierfür sind die Signalstatistik, Buchstabenhäufigkeiten einer Sprache oder ein Histogramm. Ähnlich, wie es in der Biologie, Medizin und Soziologie üblich ist | sein sollte, muß hierbei das Gesetz der großen Zahl oder zumindest die Repräsentativität eingehalten werden.
- Wenn nichts über die Statistik bekannt ist, kann eventuell eine *Gleichverteilung* angenommen werden. Dann wird aber (s. u.) für die Entropie nur die Obergrenze erhalten.

Leider ist die Ableitung der *Entropie-Formel* nicht gut verständlich zu machen. Sie wird daher meist einfach hingeschrieben. Hier sei eine Veranschaulichung versucht. Dazu werden n Speicher angenommen, die jeweils den Werte „0" oder „1" besitzen. Hiermit lassen sich insgesamt

$$m = 2^n$$

unterschiedliche Zustände einstellen. Für 3 Speicher sind es z. B. die folgenden 2^3=8 Zustände:

```
000; 001; 010; 011; 100; 101; 110; 111
```

Umgekehrt können die m Zustände als die möglichen Informationen angesehen werden. Zu ihrer *Beschreibung* genügen dann

$$n = \mathrm{ld}(m)$$

Speicherplätze (ld ist der Logarithmus zur Basis 2). Diesen Zusammenhang benutzte bereits Hartley. Bei einer Gleichverteilung tritt jede Information mit der Wahrscheinlichkeit $p = 1/m$ auf. Die obige Formel geht dann über in

$$n = -\mathrm{ld}(p)$$

Liegt keine Gleichverteilung vor, so besitzt das i-te Zeichen mit $i = 1$ bis n die Wahrscheinlichkeit p_i. Sie ist einmal in die obige Formel einzusetzen und zum anderen als zusätzlicher *Bewertungsfaktor* zu verwenden. Über alle Zeichen ist dann noch die Summe zu bilden. So folgt für die Entropie die Shannon-Formel:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot ld\,(p_i).$$

Symbol	Kennzeichen	Karten	p_i
Z	Zahlen	7, 8, 9, 10	0,5
M	männlich	Bube, König	0,25
A	As	As	0,125
W	weiblich	Dame	0,125

Sie hat die Maßeinheit Bit je Zeichen und gibt an, wieviel *Zweierentscheidungen* je Zeichen | Symbol *minimal* erforderlich sind[1]. Auch diese Aussage sei veranschaulicht. Dazu sei ein klassisches Skatspiel benutzt. Seine Karten werden in vier Klassen mit zugehörenden Wahrscheinlichkeiten eingeteilt (Tabelle). Setzt man diese Werte in die Entropie-Gleichung ein, so folgen für dieses Alphabet 1,75 Bit/Klasse. Nachrichtentechnisch ist nun so vorzugehen. Ein Spielmeister mischt die Karten und wählt dann eine zufällig aus. Damit ist das „Zeichen" gesendet. Der Empfänger hat nun auf Grund von Kriterien zu entscheiden, zu welcher Klasse die Karte gehört. Er darf dazu an den Sender | Spielmeister beliebige Fragen richten. Dieser kann aber nur mit „Ja" oder „Nein" (Zweierschritt = Bit) antworten. Folglich muß sich der Empfänger eine Fragestrategie (Binär- = Codebaum) aufbauen. Ein Beispiel zeigt Bild 10.9d. Hier wird jede Klasse mit genau zwei Binärfragen gefunden. Nach Shannons Formal muß es aber eine bessere Strategie geben. Wie es bei Schulbeispielen üblich ist, gibt es sie hier auch. Sie zeigt Bild 10.9e. Die erste Frage lautet „Ist es eine Zahl?". Bei der Antwort „Ja". sind 50% der Karten mit einer Frage gefunden. Bei „Nein"

[1] Die Ähnlichkeit mit der thermodynamischen Entropie (1. Formel auf S. 295) war für Wiener der Anlaß, auch in diesem Fall den Namen Entropie vorzuschlagen.

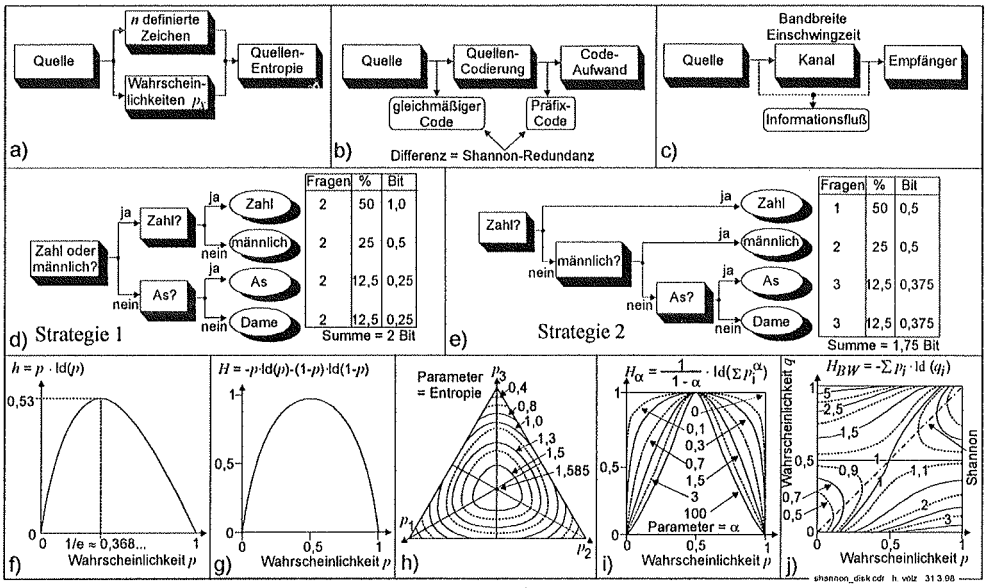


Bild 10.9 Zur Shannon-Theorie bei diskreten Signalen

fragen wir weiter: „Ist sie männlich?". Bei „Ja" haben 25% der Karten mit 2 Fragen gefunden. Bei „Nein" stellen wir die dritte Frage „Ist es ein As?". Egal ob „Ja" oder „Nein", die letzten 2mal 12,5% der Karten werden mit 3 Fragen gefunden. Das gemittelte Ergebnis beträgt also, genau wie es die Theorie als Grenze vorgibt, 1,75 Fragen/Klasse. Nach Shannon brauchen wir nun nach keiner besseren Fragestrategie mehr zu suchen. Es gibt keine, sondern nur schlechtere oder gleichwertige.

Das hier durchgeführte Spiel ist in der Shannon-Theorie noch ein wenig anders zu interpretieren. Die Abfolge der Fragen, z. B. „Nein - Nein - Ja" für das As, kann auch als Code „001" betrachtet werden. Dann gilt Z =1; M =01; A = 001; D = 000. Hierbei ist kein Code der Anfang eines anderen. Solche Codes heißen Präfix-Codes bzw. irreduzibel. Sie können hintereinander ohne Trennzeichen übertragen werden und sind daher sehr compact. „010000011101" ist so z. B. ohne Schwierigkeit als „MDAZZM" zu interpretieren. Häufig sind alle Signale einer Nachrichtenquelle gleichlang (gleichmäßiger Code). Dies ist z. B. bei den ASCII-Zeichen der Fall. Im obigen Beispiel wären für die 4 Klassen also ld(4) = 2 Bit erforderlich. Die Quellencodierung nach Shannon (Bild 10.9b) ermöglicht also einen Präfixcode gemäß dem Codebaum vom Bild 10.9e. Er ist im Mittel über hinreichend viele Zeichen kürzer als der gleichmäßige Code. Während wir im obigen Fall die Lösung erraten haben, gibt es auch konstruktive Verfahren. Das erste stammt bereits von Shannon. Das z. Z. beste fand Huffman bereits 1954. Es wird oft als optimal bezeichnet. Das muß aber nicht heißen, daß es prinzipiell keine bessere konstruktive Lösung geben kann. Doch hier kann diese Problematik nicht weiter verfolgt werden (vgl. u. a. [VÖL2]).

Es ist aber nützlich, noch einige Ergänzungen zur Entropie-Formel zu machen. Sie enthält den Term „$-p \cdot \mathrm{ld}(p)$". Sein Verlauf ist im Bild 10.9f dargestellt. Er besitzt bei $p = 1/e \approx 0{,}368...$ ein Maximum mit 0,53. Anteile dieser Art sind – wie u. a. H. Frank fand – besonders auffällig [FRA]. Tritt z. B. in einem farbigen Bild eine Farbe mit diesem Anteil auf, so *kennzeichnet* sie für die meisten das Bild. Hierfür gibt es viele interessante Beispiele [VÖL8]. Dieser Wert liegt nun aber auch dicht beim Verhältnis des Goldenen Schnittes mit 0,382. So gab es hierzu viele kritische Diskussionen. Letztlich kann aber festgestellt werden, daß die Ursache im logarithmischen Weber-Fechnerschen Gesetz liegt (s. S. 19f.). So gilt heute: Der Goldene Schnitt ist die Näherungskonstruktion mit Zirkel und Lineal als für den Auffälligkeitswert.

Da die Summe aller Wahrscheinlichkeiten immer 1 sein muß, können die Wahrscheinlichkeiten für zwei Zeichen durch p und $(1\text{-}p)$ ausgedrückt werden. So ergibt sich der Wahrscheinlichkeitsverlauf gemäß Bild 10.9g. Das Maximum mit $H = 1$ Bit liegt also wie oben schon angedeutet bei der Gleichverteilung mit $p = ½$ vor. Für drei Werte kann dafür das Trigramm der Stoffzusammensetzungen benutzt werden (Bild 10.9h). Bei ihm stehen die drei Wahrscheinlichkeitsachsen um 120 Grad versetzt. Die Entropie hat wiederum ein Maximum bei Gleichverteilung $p1 = p2 = p3 = {}^1/_3$ mit einem Wert von jetzt $H = 1{,}585...$. Der Beweis für dieses Maximum ist trivial. Man braucht in die Entropie-Formel nur $p = 1/n$ einzusetzen.

In den 50er und 60er Jahren hat die Entropie-Formel fast überall Anwendung gefunden. Dann setzte eine Scheinkrise ein. Sie geht hauptsächlich darauf zurück, daß die o. g. Voraussetzungen nicht mehr eingehalten (vergessen) wurden. Daraufhin versuchten mehrere Autoren, „Erweiterungen" bzw. Verallgemeinerungen der Entropie-Formel zu finden. Ein Beispiel ist die α-Entropie von Reney (Bild 10.9i). Wird der frei verfügbare Parameter $\alpha = 1$ gesetzt, so geht H_α in die Shannon-Entropie über. Für diese Formel ist keine Anwendung bekannt geworden. Interessanter ist da schon die Formel von Bongard-Weiß (Bild 10.9j). Sie nutzt den Unterschied von objektiver (p) und subjektiver (q) Wahrscheinlichkeit aus. Aus Experimenten wissen wir, daß wir kleine Wahrscheinlichkeiten immer zu groß und große immer zu klein einschätzen. Wegen der so größer erscheinenden kleinen Wahrscheinlichkeiten spielen so viele Menschen in der Lotterie. Umgekehrt hoffen sie auch bei großen Gefahren auf individuelles „Glück", der Gefahr zu entrinnen. Auf dieser Basis hat die Bongard-Weiß-Entropie eine gewisse Bedeutung in der Psychologie erlangt.

Den dritten wichtigen Fall der diskreten Shannon-Theorie zeigt Bild 10.9c. Hier wird untersucht, wieviel Information über einen Kanal mit der Bandbreite B. gelangen kann. Hierfür ist die Einschwingzeit

$$T_S \geq 1/(2 \cdot B)$$

erforderlich. Sie hat Küpfmüller (Küpfmüller-Beziehung) in den 20er Jahren experimentell gefunden. Sie wird auch als Nyquist-Rate bezeichnet. Das Gleichheitszeichen entspricht dem Samlingstheorem von Shannon (s. S. 296). Es läßt sich weiter zeigen, daß sie äquivalent zur Heisenbergschen Unschärfe-Relation der Quantenphysik ist. Über den Kanal können daher maximal

$$C = H/T_S \leq 2 \cdot H \cdot B$$

Zeichen je Sekunde übertragen werden. C heißt Kanalkapazität.

10.7 Kontinuierliche Signale

Zur Berechnung der Shannon-Entropie für kontinuierliche Signale müssen die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Symbole durch Wahrscheinlichkeitsdichten $p(x)$ der Signalamplituden x ersetzt werden. Das Prinzip geht aus **Bild 10.10**c hervor. Um eine Amplitude x_0 wird zunächst ein endlicher Bereich Δx gebildet. Dann wird über eine hinreichend lange Zeit ermittelt, wie lange das Signal in diesem Bereich erscheint. So entsteht ein Wert $p(x_0)$. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ergibt sich als Grenzwert mit $\Delta x \to 0$ als $p(x)$. In analoger Weise ist bei der Entropie-Formel zu verfahren. Es werden n Intervalle Δx gewählt. Zu ihnen gehört die Wahrscheinlichkeit $p_n(\Delta x)$. So gilt zunächst

$$H(n,\Delta x) = -\underbrace{\lim_{\substack{\Delta x \to 0 \\ n \to \infty}}}_{} \sum_{i=0}^{n} p_i(\Delta x) \cdot \Delta x \cdot \mathrm{ld}(p_i(\Delta x) \cdot \Delta x) \cdot$$

Beim Grenzübergang geht die Summe in ein Integral über. Das Produkt unter dem Logarithmus ist vorteilhaft in eine Summe zu zerlegen:

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot ld(p(x)) \cdot dx \; -\underbrace{\lim_{\substack{\Delta x \to 0 \\ n \to \infty}}}_{} \sum_{i=0}^{n} p_i(\Delta x) \cdot \mathrm{ld}(p_i(\Delta x)) \cdot \Delta x \cdot$$

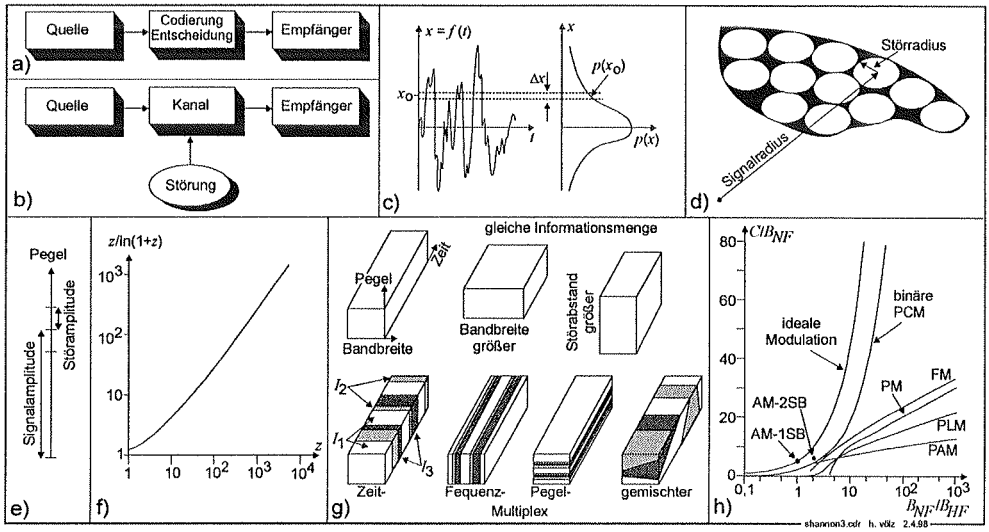


Bild 10.10 Die Shannon-Entropie bei kontinuierlichen Signalen

Weil der zweite Teil beim Grenzübergang divergiert

$$\lim_{\Delta x \to 0} \log(\Delta x) \to -\infty ,$$

wurde die Summe beibehalten. Daher ist auf diesem Wege die Entropie unbestimmt. Sinnvoll ist es, nur den ersten Term als **relative Entropie** für weitere Betrachtungen zu benutzen:

$$h(x) = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot ld(p(x)) \cdot dx \ .$$

Das divergierende Glied läßt sich aber auch indirekt eliminieren. Bei der Übertragung mit kontinuierlichen Signalen tritt nämlich immer eine Störung auf (mehr dazu unten). Auch für sie allein gilt die durchgeführte Betrachtung. Die nutzbare, wirkliche Entropie ist die Differenz aus beiden. Bei der Differenzbildung entfällt aber der divergierende Term und es gilt:

$$H(x) = h_{Nutz}(x) - h_{Stör}(x) .$$

Shannon nahm sowohl für das Signal mit der Leistung P_N als auch für die Störung mit der Leistung P_S eine Gauß'sche Verteilung an. Auf anderem Weg (s. u. Kanalkapazität) fand er dann Entropie

$$H = \frac{1}{2} \cdot ld\left(\frac{P_N + P_S}{P_S}\right).$$

Gemäß Bild 10.10e läßt sich das auch folgendermaßen interpretieren: Im maximal möglichen Pegelbereich der Nutzleistung erzeugt die Störleistung

$$m = \sqrt{\frac{P_N + P_S}{P_S}}$$

unterscheidbare Amplitudenstufen. Damit wird auch deutlich, warum der digitale Kanal gemäß Bild 10.10a ohne Störung behandelt wurde. Bei ihm liegen von vornherein die eindeutig unterscheidbaren

Signale (Zeichen | Symbole) vor. Störungen während der Übertragung können nur ein Vertauschen von Signalen bewirken. Dies ist aber deutlich anderer Natur, als die hier durch Störungen auftretenden Unsicherheiten. Mit den unterscheidbaren Amplitudenstufen wird der kontinuierliche Kanal praktisch (nur) auf einen diskreten Kanal umgerechnet. So gilt das Schema von Bild 10.10b.

Shannon hat in seiner Arbeit alle Samplingsignale während der Dauer $T_{\ddot{U}}$ einer Übertragung zusammengefaßt. Das sind $n = 2 \cdot B \cdot T_{\ddot{U}}$. Sie spannen einen n-dimensionalen Raum auf, dessen Radius durch die Signalleistung bestimmt ist (Bild 10.10d). Um jeden möglichen Endwert erzeugt das Störsignal eine Störkugel mit dem Störradius. Er berechnete dann, wieviel unterscheidbare Störkugeln in der Signalkugel Platz haben und erhielt die Formel für die Kanalkapzität:

$$\boxed{C \le B \cdot \mathrm{ld}\left(\frac{P_N + P_S}{P_S}\right).}$$

Die übertragene Informationsmenge $C \cdot T_{\ddot{U}}$ setzt sich aus drei Faktoren zusammen (Bild 10.10g): Der Übertragungszeit $T_{\ddot{U}}$, dem logarithmischen Störabstand von P_N/P_S (Pegel) und der Bandbreite B. Sie lassen sich als Volumen interpretieren. Der große Vorteil solcher Betrachtungen ist, daß sich diese Größen gegeneinander austauschen lassen. Das Informationsvolumen (-menge) ist nur durch ihr Produkt bestimmt. Deshalb lassen sich auch mehrere Signale in Anlehnung an Bild 10.7b als Multiplex unterschiedlicher Art verschachteln (Bild 10.10g). Leider sind die bekannten Verfahren für einen solchen Austausch nicht verlustfrei. Für die ideale Modulation und für einige praktische Beispiele zeigt das Bild 10.10h.

Mit der obigen Formel für die Kanalkapazität läßt sich nun erneut die Formel von S. 295 ableiten. Die Störleitung sei rein thermodynamisch bedingt

$$P_S = k \cdot B \cdot T.$$

Darin bedeuten k die Boltzmann-Konstante, B die Bandbreite und T die absolute Temperatur. Die Signalleistung wird nun als das z-fache der Störleistung eingeführt. Dann gilt

$$C = B \cdot \mathrm{ld}(1+z)$$

Für das Verhältnis von Nutzleistung zur Kanalkapzität folgt daraus

$$\frac{P_N}{C} = k \cdot T \cdot \frac{z}{\mathrm{ld}(1+z)} \text{ in } \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{Bit}} \text{ bzw. in } \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{Bit/s}}.$$

Der entscheidende Teil von diesem Ausdruck ist im Bild 10.10f ausgewertet. Er kann auch in eine Reihe entwickelt werden:

$$\frac{z}{\ln(1+z)} = \frac{1}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{3} - \frac{z^3}{4} \pm \cdots}.$$

Hierfür gelten die Grenzen

$$1 \le \frac{z}{\ln(1+z)} \to 1 \text{ für } z \to 0.$$

Also gilt wieder

$$\frac{\mathrm{E}}{\mathrm{Bit}} \ge k \cdot T \cdot \ln(2).$$

Für diesen Grenzwert ist die Nutzleistung klein gegen die Störleistung. Es ist wiederum ein Verdienst von Shannon, gezeigt zu haben, daß auch in solchen Fällen eine völlig fehlerfreie Übertragung möglich ist. Allerdings wird dann auch für ein Bit eine sehr lange Übertragungszeit benötigt. Für weitere Details zu diesen Problemen und Aussagen der Shannon-Theorie sei u. a. auf [VÖL2] verwiesen.

10.8 Gibt es ein Informationsfeld?

Die letzten beiden Abschnitte zeigten, daß mit der Shannon-Theorie hauptsächlich statistische Eigenschaften der Information – eigentlich des Informationsträgers – beschrieben werden. Aus den Abschnitten 10.2 und 10.3 ab Seite 291 geht aber hervor, daß Ursache-Wirkungs-Relationen besonders wichtig sind. Dies wird noch deutlicher, wenn man das Gebiet um die Information nach den Aspekten diskret ⇔ kontinuierlich und statisch ⇔ dynamisch klassifiziert. So entsteht Bild 10.11. Für das Verhalten wurden dabei die ähnlichen Begriffe *beschreibend* und *strukturell* hinzugefügt. Ebenso wurde dynamisch durch *wirkend* und *funktionell* ergänzt. Die Shannon-Theorie umfaßt nach dem gezeigten fast nur den statisch-beschreibenden Aspekt. Logik und Semiotik betreffen diskrete Zustände und sind fast nur beschreibend. Die Algorithmentheorie ist für diskretes und dynamisches Geschehen zuständig. Es verbleibt also eindeutig eine Lücke für dynamisches und kontinuierliches Geschehen. Bei physikalischen, also energetischen Prozessen leisten das im wesentlichen die Differentialgleichungen und damit die verschiedenen Feldtheorien. Deshalb wurde von mir dieses Gebiet vor einigen Jahren mit dem Begriff „Informationsfeld" belegt.

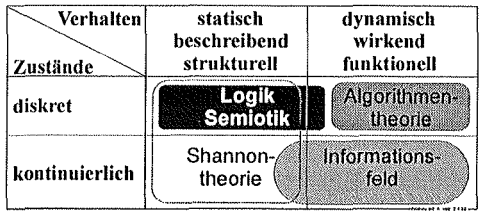


Bild 10.11 Möglichkeiten eines Informationsfeldes

Bei dem Begriff ist aber zu beachten, daß er in einigen Fällen – wenn auch aus anderen Erwägungen und nicht immer so bezeichnet – schon vorher verwendet wurde. Die älteste Quelle stammt wohl von 1963 aus der Soziologie von Lewin [LEW][2]. In Anlehnung an die Kybernetik war ihm der betont strukturelle Aspekt der Soziologie zu statisch und zu eng. Für ihn stand das zu erreichende Ziel im Vordergrund. Dabei versuchte er zu zeigen, daß nicht immer der kürzeste Weg der optimale ist. Längere Wege um Hindernisse können durchaus vorteilhaft sein. Von mir ins physikalische übertragen, bleibt dabei der Feldgradient zum Ziel erhalten. Die Arbeit ist offensichtlich weitgehend in Vergessenheit geraten. Unter einem anderem Aspekt verwendet später Klix [KLI2] den Begriff des subjektiven Zielabstands. Hiermit kann er im Rahmen der Künstlichen Intelligenz das Verhalten bei Spielen analysieren. Den Feldbegriff verwendet er aber nicht. Im ähnlichen Sinne habe ich dann auch den Zielabstand bei Emotionen definiert [VÖL7] (s. S. 7f.). Bonitz [BON] untersuchte in mehreren Arbeiten, wie Wissenschaftler mit „ihrer" Information umgehen. Er fand dabei zwei typische Erscheinungen, die er folgendermaßen bezeichnet und erklärt:

- *Holographie-Prinzip*: Wissenschaftler verhalten sich so, daß sie ihre Ergebnisse möglichst überall hin verbreiten und andere sie interessierende Ergebnisse von überall her holen.
- *Geschwindigkeits-Prinzip*: Wissenschaftler verbreiten und holen sich die relevante Information immer mit der technisch höchstmöglichen Geschwindigkeit.

Ich vermute, daß beide Prinzipien zumindest in der Tendenz für jegliche Information gelten. Man denke nur an die Bemühungen des Journalismus und der Medien. Natürlich gibt es auch Gegentendenzen, wie Geheimhaltung und bewußte Falschinformation (s. S. 293ff.). Beide Prinzipien sind dann gut über ein Informationsfeld zu interpretieren, das sich zwischen Informationsquellen und -senken ausbreitet (geschieht bei Bonitz nicht). Fehlfunktionen werden dann u. a. als Abschirmung bzw. Störfelder erklärbar.

Fischer verwendet in mehreren biologisch-morphologischen Arbeiten definitiv den Begriff Informationsfeld [FIS] und versucht auch Bezüge zum physikalischen Feldbegriff herzustellen [FIH]. Leider sind seine Betrachtungen, die sich betont auf die mathematischen Zusammenhänge beim Größenwachstum von Lebewesen beziehen, kaum allgemeiner zu fassen. Dennoch ist die Arbeit sehr anregend. Sheldrake [SHE] führt morphogenetische (morphische) Felder ein, die dem Informationsfeld in

[2] Den Hinweis auf diese Arbeit verdanke ich Kollegen Prof. G. Wersig.

einigen Punkten nahe stehen. Er vermutet, daß die Natur generell eine statistische, also durch Häufigkeiten bedingte Erfahrungsspeicherung in morphischen Feldern vornimmt. Trotz systematischen und ernsthaften Bemühens ist bisher aber nicht erkennbar, was das Substrat dieser Felder sein könnte und wie sie wirken. Zudem nimmt er eine unendlich hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit an. Alexander Gurwitsch [BIS] nimmt ein biologisches, miotisches Feld an, das die Initialzündung für die Zellteilung auslöst und mit dem superschwachen Photonenstrom[3] gekoppelt ist. Vielleicht läßt sich sogar Steinbuchs Aussage „Information ist ein Kitt, der die Gesellschaft zusammenhält" als Hinweis auf ein Informationsfeld interpretieren. Auf weitere Hinweise soll hier jedoch – sowohl des (noch) hypothetischen Charakters als auch des Umfanges wegen – verzichtet werden. Notwendiger und vorteilhafter ist es, etwas auf einige Grundlagen der physikalischen Felder einzugehen.

Faraday stellte als erster fest, daß sich die Wirkung von Ladungen mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Hierauf bauen u. a. die Maxwellschen Gleichungen der elektromagnetischen Felder auf. Damit wurden die Wellen zugleich eine wichtige Eigenschaft von Feldern. Eigenartigerweise findet man aber in keinem bekannten Physikbuch eine anschauliche Definition für Felder. Sie werden als bekannt vorausgesetzt oder bestenfalls durch Formeln eingeführt. Die Schwierigkeit des Verstehens der Felder wuchs sogar durch den Michelson-Versuch. Danach gab es für die elektromagnetischen Wellen (Licht) kein Substrat mehr. Der zuvor angenommene und in sich widersprüchliche „Äther" mußte aufgegeben werden. Die Schwierigkeiten für Felder wuchsen weiter mit dem Entstehen der Quantenphysik. Es war der Dualismus Partikel ⇔ Welle bzw. klassisch ⇔ quantentheoretisch notwendig. Felder sind folglich nur Modelle einer ausgewählten Beschreibung von Eigenschaften stofflich-energetischer Objekte, die ja auch selbst nur Modelle sind. Diese Kompliziertheit ist natürlich auch bei „denkbaren" Informationsfeldern zu beachten. Als Hintergrundwissen sind daher in der Tabelle die heute üblichen physikalischen Felder mit wichtigen Eigenschaften zusammengestellt.

Feldart	Erzeugt von	Nachweis durch	Wellen als	Partikel
elektrisch	Ladungen	Beschleunigung von Ladungen	Radiowellen Licht Röntgenstrahlung usw.	Lichtquanten Photonen
magnetisch	elektrischem Strom Dauermagnet	Anziehung|Abstoßung von Magneten Kraftwirkung auf stromführende Leiter		
Gravitation	Massen	Anziehung von Massen	Gravitationswellen Materiewellen	Massen Gravitonen
akustisch	Schallquelle	Mikrophon, Ohr	Schwingung einer Saite Oberflächenwellen	Phononen
thermisch	Wärmequelle	Thermometer, fühlen	Bernardzellen	Photonen?
optisch	Lichtquelle	Photozelle, sehen	Interferenz	Photonen

Die letzten drei Fälle wurden bewußt etwas abgesetzt. Sie zeigen nämlich, daß ein Feld nicht immer zu einer besonders vorteilhaften Interpretation führen muß. Die Eigenschaften von Feldern lassen sich nun folgendermaßen zusammenstellen:

- Ist eine (physikalische) Größe eine Funktion des Ortes, so spannt sie ein *skalares* bzw. *vektorielles* Feld $G(x, y, z)$ auf.
- Ein Feld kann auch in der Zeit *veränderlich* sein $G(x, y, z, t)$.
- Die Ursache eines Feldes sind meist „Partikel", von denen sich das Feld mit einer endlichen *Geschwindigkeit*, z. B. der Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.
- Zeitliche Änderungen von „Objekt"-Eigenschaften können *Wellenerscheinungen* mit einer Frequenzen ω und einer Wellenlänge λ hervorrufen.

[3] Die Wellenlängen liegen zwischen 190 bis 350 nm. Der Fluß beträgt etwa 10 bis 1000 Photonen/cm².

- Durch Reflexion, Interferenz usw. können sich *stehende Wellen*, oder allgemeiner lokal periodische Erscheinungen, ausbilden.
- Der Nachweis eines Feldes ist nur über seine *Wirkung* auf Objekte möglich. Sie werden u. a. durch das Feld bewegt, oder eine schon vorhandene Bewegung wird verändert.
- Entsprechend dem Dualismus der Physik entspricht die im gesamten Feld vorhandene *Energie* einer anderen physikalischen Größe, z. B. der Masse oder der Ladung des Teilchens, welches das Feld hervorruft.

Im letzten Punkt wäre Energie natürlich durch Information zu ersetzen. Weiter ist auffällig, daß bei der Aufzählung mehrfach die Wirkung und die Begriffe dynamisch | zeitabhängig erscheinen. Das sind ja auch wesentliche Eigenschaften der Information. Solche Wirkungen eines eventuellen Informationsfeldes sind recht anschaulich bei Begegnungen von Menschen zu beobachten. Jeder Mensch nutzt gegenüber anderen unbewußt einen „Sicherheits"- oder „Optimalabstand". Einerseits ist er interessiert, Kontakt aufzunehmen, aber andererseits möchte der Abstand nicht zu eng werden. Brecht übertrug dies symbolisch zu den Igeln (was allerdings biologisch nicht stimmt). Bei Kälte versuchen sie sich gegenseitig zu wärmen, indem sie sich nähern. Sie können sich aber nicht zu nahe kommen. Dann würden sie sich gegenseitig mit den Stacheln verletzen. In der Physik tritt dies ähnlich durch die Überlagerung von verschiedenen Feldern auf. Hierauf geht u. a. die Einstellung des Gitterabstandes in Kristallen zurück. Soziologisch auffällig ist das besonders, wenn Menschen aus unterschiedlichen Kulturkreisen, (z. B. Europäer und Asiaten) miteinander kommunizieren. Sie haben unterschiedliche Optimalabstände sozialisiert. Da jeder versucht den seinen einzuhalten, tanzen sie quasi fortlaufend umeinander herum. Weiter können Informationsfeldern auch gut das Zu- und Abströmen von Menschen zu bestimmten Orten, wie Bahnhöfen, Supermärkten, Sportplätzen, Konzertsälen, Kinos, Urlaubsorten usw. beschreiben. Sie können gut das „Übergreifen" von Stimmungen, Emotionen usw. auf andere erklären. Daher könnte solche Effekte künftig bei der Mensch-Technik-Schnittstelle Bedeutung erlangen. Nur deshalb wurde hier diese noch weitgehend unerforschte Möglichkeit behandelt.

11 Anhang

11.1 Hinweise zur CD-ROM

Die CD-ROM enthält folgende Pfade mit entsprechenden Daten:

RECHTE: Hier sind Angaben enthalten, die den urheberrechtlichen Umgang mit den Dateien der CD-ROM regeln. Sie sollten unbedingt gelesen werden. Sie sind eine Zusammenfassung der Angaben, die sich jeweils ausführlicher in der Datei rechte.txt in den einzelnen Pfaden befinden.

SUCHE: Dieser Pfad enthält bei geringen Einschränkungen den Volltext des Buches in einer Datei um 1 MByte. Um diesen Wert zur schnellen Volltext-Suche auf jedem Rechner zu ermöglichen, war die Wandlung in das reine ASCII-Format erforderlich. Dadurch entfallen die Formeln, Bilder und Tabellen. Jedoch sind die Textteile der Bilder und Tabellen nachträglich wieder eingefügt worden. Die Suche kann daher komplex und vollständig erfolgen. Zusätzlich seien für das Suchen folgende Richtlinien empfohlen:

- Die Seiten erscheinen im Text als „---- Nr. ---„ mit noch mehr Bindestrichen rechts und links. Rechts und links von der Seitenzahl steht also je **ein** Leerzeichen. Diese Struktur also z. B. „--- 147 „ führt sehr schnell zur Seite 147.
- Hinter den Nummern der Kapitel- bzw. Abschnitte stehen immer **drei** Leerzeichen. Also 7.2.3 gefolgt von drei Leerzeichen (kein Punkt nach der letzten Ziffer!) führt zum Beginn des Abschnitts 7.2.3.

BILDER: Hier liegen alle Bilder geordnet nach den Kapiteln in Unterverzeichnissen. Sie wurden aus dem eigentlich vorhandenen *.CDR-Format in das *.PCX-Format konvertiert. Dabei wurde eine einheitliche Breite von 2000 Pixel gewählt. So sind alle Schriften gut lesbar. Die Bilder sind rein Schwarz-Weiß und damit nicht zu groß. Auf das *.CDR-Format wurde bewußt verzichtet. Es gibt zu viele Inkompatibiltäten zwischen den einzelnen Versionen. Außerdem besteht die Gefahr, daß die gewählten Schriftfonts nicht verfügbar sind. Bei Bedarf können solche Dateien, die z. T. auch farbig sind, vom Autor gegen Erstattung der Unkosten und schriftlicher Zusicherung des Urheberschutzes erhalten werden. Deswegen finden sie im Unterverzeichnis TEXT eine Datei, die alle Bildtexte enthält und damit auch die Dateinamen. Außerdem ist diese Datei für ein zusätzliches Suchen nützlich.

SACHWORT: hier liegt das gedruckte Schwortverzeichnis etwas erweitert. Gegenüber der Volltextsuche tauchen auch Stichwörter auf, die nur implizit im Volltext vorhanden sind.

LITERAT: enthält das gedruckt vorliegende Literaturverzeichnis.

GESCHI: enthält eine Geschichtsdatei mit über 8000 Einträgen. Die Originaldatei ist MS-WORKS 4.0. Sie wurde aber zusätzlich in das Format mit trennenden **Tabulatoren** konvertiert. Sie enthält drei Felder: die Jahreszahl (v.d.Z. negativ); eine Codespalte für die Teilgebiete und das Ereignis. Die Auswahl der Daten ist von den Interessen des Autors bestimmt. Sie reicht deutlich über den Inhalt dieses Buches hinaus. Umfangreich sind enthalten:

- Akustik, Bildschirm, Bildwiedergabe, Codierung, Druck, Elektronik, Farben, Fernsehen, Fraktale, Hardware, Informatik, Information, Informationstheorie, KI, Kryptographie, Kybernetik, Mathematik, Messen, Midi, Multimedia, Musik, Nachrichtenübertragung, Optik, Peripherie, Rundfunk, Schrift, Software, Speicher, Sprache, Technik, Technologie, Wissenschaft.

Ergänzend, also verkürzt sind weiter aufgenommen:

- Akkus; Architektur; Astronomie; Batterien; Biologie; Chemie; Energie; Ernährung; Gesundheit; Homo sapiens; Kleidung; Krieg; Kultur; Kunst; Politik; Raumfahrt; Satelliten; Transport; Viren; Wohnung.

Diese Datei wird ständig erweitert (monatlich ca. 100 Einträge) und ist von Autor erhältlich.

11.2 Literaturverzeichnis

Infolge der Breite des Stoffes war es hier nicht möglich, alle benutzte Literatur zusammenzustellen. Einerseits wäre das dabei Verzeichnis auf sehr viele Seiten angewachsen und andererseits wären viele Stellen aufgetaucht, deren hauptsächliche Inhalte auf völlig anderen Gebieten liegen. Vielfach mußten graues Schrifttum, manchmal auch Tageszeitungen benutzt werden. Generell existiert ein recht unbefriedigender Literaturbestand. Bisher wurde offensichtlich nicht versucht, die Mensch-Technik-Schnittstelle entsprechend umfassend und gemäß ihrer Bedeutung zu behandeln. Sie wird fast immer pragmatisch und intuitiv erstellt und dann nicht weiter beschrieben. Deshalb wurde hier im Text auch weitgehend auf Literaturverweise verzichtet. Sie erfolgten vor allem in zwei Fällen. Einmal, wenn „überraschende" Ergebnisse genannt wurden und zum anderen, wenn eine Vertiefung sinnvoll gewesen wäre, aber den Rahmen bzw. Umfang der Aussagen gesprengt hätte. Die hier typische Literaturauswahl sei am Beispiel der *Sensoren* etwas erläutert. Details zu ihnen befinden sich überwiegend in den Zeitschriftenartikeln. Eine Vertiefung der vorhandenen Aussagen ist mittels folgender Bücher möglich. Sie enthalten – da Spezialgebiete betreffend – umfangreiche Literaturverzeichnisse. Ein breit angelegtes Buch mit guter Darstellung und Solidität vor allem in den theoretischen und physikalisch-chemischen Grundlagen ist [SCH6]. Für eine Nutzung in der Praxis enthält es auch viele Tabellen und Kurven. [NIE] beschreitet einen Mittelweg zwischen Theorie und Praxis und ist daher als ergänzendes Buch geeignet. Es enthält viele Aussagen zum Betrieb von Sensoren. Systematisch werden dabei die typischen Schaltungen, wie Hoch-, Tiefpaß, Brücken- und Kompensationsschaltungen, Zähler, Verstärker, Multiplexer, A/D- und D/A-Wandler, Operationsverstärker und Lockin-Schaltungen beschrieben. Umfassender bezüglich der gesamten Elektronik ist [VÖL3]. Hier sind hauptsächlich die grundlegenden Varianten, ihre Funktionen und Eigenschaften aus physikalisch-elektronischer Sicht behandelt. [BLA] ist schließlich in Bezug auf den direkten Rechneranschluß konzipiert. Dazu werden neben Schaltungen auch Programme (u. a. in Visual-BASIC) mitgeteilt. Sensoren selbst werden nur für einige Anwendungen beschrieben. Die beigelegte CD-ROM enthält umfangreiches Datenmaterial vieler Hersteller von Sensoren. [GAU] gibt schließlich einen Überblick zum Stand der optischen Sensoren im Labor. Es sind aber noch weitere wichtige Arbeiten in der folgenden Liste zu finden. Wie unterschiedlich selbst Hinweise auf gegebene Literatur ausfallen, mag ein zweites Beispiel zeigen, nämlich für unser *Hören*. Zuvorderst ist die hervorragende Neuro- und Sinnesphysiologie von Schmidt [SCH3] und die gekürzte Form [SCH2] zu nennen. Hier fehlen aber wichtige, spezielle Aussagen. So mußte das „alte", vorzügliche Werk von Ranke und Lullis über Gehör - Stimme - Sprache [RAN] von 1953 zusätzlich benutzt und zitiert werden. Informationstheoretische Grundlagen enthält dagegen fast nur Zwicker [ZWI1] und Meyer-Eppler [MEY1]. Vielfältige Meßergebnisse sind in [SKU], Aussagen zu räumlichem Hören in [HEN], [PIE] und mehreren nicht zitierten Zeitschriftenartikeln zu finden. Diese Beispiele machen deutlich, warum eine anfangs geplante, ähnliche Anotation zu den Inhalte des Buches wieder fallen gelassen wurde. Auch sie wäre zu umfangreich ausgefallen. Es bleibt also nur die Hoffnung, daß die Titel der folgenden Quellen beim Suchen weiter helfen. Auf jeden Fall sind die wesentlichen genutzten Quellen zitiert.

[ARD] **Ardenne, M. v.; Musiol, G., Reball, S.**: Effekte der Physik. 2. Aufl., Verlag Harri Deutsch, Thun - Frankurt/M 1997

[AUK] **Aukstatkalnis, S. u. Blatner, D.**: Cyberspace. VGS Verlagsgesellschaft, Köln 1994

[BER1] **Bergmann, H.**: Dreidimensionale Bildwiedergabe. Überblick zum Stand. Bild und Ton **44** (1991) H. 2. S. 74 - 79

[BER2] **Bergmann, H.**: Bildaufnahmeröhren: Aufbau und Anwendungen. Bild und Ton **39** (1986) H. 5, S. 145-149

[BER3] **Bernath, K. W.**: Technik des Fernsehens. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1986

[BIE] **Biesold, D. u. Matthies, H.**: Neurobiologie. Gustav Fischer Verlag, Jena 1977

[BIS] **Bischof, M.**: Biophotonen. Zweitausendundeins, Frankfurt a. M. 1995

[BLA] **Blank, H.-J.**: Sensoren am PC. Markt und Technik, Haar b. München 1996

[BLE] **Bleicher, M.**: Halbleiter-Optoelektronik. Verlag Technik, Berlin 1986

[BON] **Bonitz, M.**: Zum Stand der Diskussion über Verhaltensprinzipien der wissenschaftlichen Information. Symposiumsband des WIZ, Berlin vom 5. Wiss. Symposium des wissenschaftlichen Informationszentrums der AdW der DDR, 12. -14. Okt. 1987, S.1 - 7

[BOR] **Bormann, S.**: Virtuelle Realität. Addison-Wesley, Bonn u. a. 1994

[BRA] **Braitenberg, V.**: Gehirngespinste. Springer, 1973

[BRE] **Breuer, H.:** dtv-Atlas zur Physik, Bd. 1 u. 2. dtv, München 1991/2

[DEP] **Depp, St. W., Webster, E. H.:** Flache Bildschirme. Spektrum der Wissenschaft 1993, H. 5. S. 42 - 48

[DRA] **Drake, F., Sobel, D.:** Signale von andren Welten. Bechtermünz-Verlag, Augsburg 1997

[DRE] **Dreyer, R.:** Aufbau und Funktion moderner Kamera-Röhren. Funktechnik (1985) H. 4, S. 149 - 151; H. 5, S. 199 - 202

[DRY] **Dreyfus, H. L.:** Was Computer nicht können. athenäum, Frankfurt/M 1989

[EID] **Eidenschink, R.:** Flüssige Kristalle. Chemie in unserer Zeit **18** (1984) H. 5, S. 168 - 176

[END] **Enders, B.:** Lexikon der Musikelektronik. Atlantis-Musikbuch. 3. Aufl. Mainz 1997

[ENG] **Engler, T.:** Virtueller Touchscreen von Siemens. c't (1997) H. 9, S. 126 - 127

[ERN1] **Ernst, B.:** Abenteuer mit unmöglichen Figuren. Taco, Berlin 1985

[ERN2] **Ernst, B.:** Der Zauberspiegel des M.C. Escher. Taco, Berlin 1986

[ERN3] **Ernst, B.:** Holographie. Wittig Fachbuchverlag, Hückelhoven 1987

[ESC] **Escher, M. C.:** Art and Science, North Holland, Amsterdem - New York - Oxford - Tokio 1986

[FAL] **Falletta, N.:** Paradoxien. Fischer Logo, Frankfurt/M 1990

[FAS] **Fasold, W. u. a.:** Taschenbuch Akustik. Verlag Technik. Berlin 1984

[FEL] **Fellbaum, K.:** Sprachverarbeitung und Sprachübertragung. Springer-Verlag. Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1984

[FIS] **Fischel, W.:** Grundzüge des Zentralnervensystems des Menschen. 3. Aufl. G. Fischer-Verlag, Jena 1972

[FIH] **Fischer, G.:** Über Proportionalitäten und Erhaltungssätze: Eine Physik der Natur-Konstanten oder Entwurf einer Feldtheorie für die Biologie: Teil I bis III, Zool. Jahrb. Anat. **116** (1987) S. 13 - 38; 129 - 167; 245 - 283
Fischer, G.: Zur Synthese von Physik und Biologie. Gegenbaurs morph. Jahrb. **135** (1989) H. 3, S. 427 - 438
Fischer, G.: Über einige Analogien zwischen Physik und Biologie. Gegenbaurs morph. Jahrb. **135** (1989) H. 4, S. 545 - 555
Fischer, G.: Zur Bestimmung der Konstante b – Grundlagen und Voraussetzung. Gegenbaurs morph. Jahrb. **136** (1990) H. 3, S. 253 - 267

[FLI] **Flindt, R.:** Biologie in Zahlen. 3. Aufl. G. Fischer-Verlag, Stuttgart - New York 1988

[FRA] **Frank, H.:** Kybernetische Grundlagen der Kybernetik. 2. Auflage. Bd. 1 u. 2. Agis-Verlag Baden-Baden 1969

[FRE1] **Freudenberger, J., Weber, C. u. Pokrandt, C.:** Schalter und Tasten für die Schwachstromtechnik. Militärverlag Berlin 1989

[FRE2] **Frey, S.:** Nonverbale Kommunikation. SEL-Stiftungsreihe Heft 1

[GAU] **Gauglitz, G.:** Trends bei optischen Sensoren, Labo-Trend 95; S. 19 - 29.

[GOL] **Goldstein, E. B.:** Sensation and Perception. 4th Ed. Broocks/Cole Publishing Companie, Pacific Grove et. al. 1996

[GRA] **Gradecki, J.:** the virtual reality construction kit. J. Wiley & Sons, New York u. a. 1994

[GÜN] **Günther, B. C., Hansen, K.-H. u. Veit, I.:** Technische Akustik - Ausgewählte Kapitel. Grundlagen, aktuelle Probleme und Meßtechnik. 5. Aufl. expert-Verlag, Rennungen-Malsheim 1995

[HAS] **Hascher, W.:** Wie funktioniert das PhaserJet-Druckprinzip? Elektronik (1991) H. 15, S. 18 - 19

[HAU1] **Hausdorf, F.:** Handbuch der Lautsprechertechnik. 4. Aufl. Visaton 1993

[HAU2] **Hauske, G.:** Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung. B. G. Teubner Stuttgart 1994

[HEE] **Heerdt, A.:** Berühren erlaubt. PC-Professional (1997) H. 9, S. 218 - 224

[HEN] **Hennings, H.:** Scannen, Technik und Praxis. Markt und Technik. Haar bei München 1994

[HEN1] **Hennig, A.**: Die andere Wirklichkeit - Virtual Reality - Konzepte - Standard - Lösungen. Addison-Wesley. Bonn u. a. 1997

[HEN2] **Hennings, H.**: Still-Video + elektronische Bildverarbeitung. Augustus, Augsburg 1992

[HEY] **Heyde, H.**: Grundlagen des natürlichen Systems der Musikinstrumente. Deutscher Verlag der Wissenschaften Leipzig 1975

[HOF] **Hoffmann, J.**: Taschenbuch der Meßtechnik. Fachbuch-Verlag Leipzig 1998

[HOR] **Horn, E.**: Vergleichende Sinnesphysiologie, G. Fischer, Jena 1982

[HUB] **Hubel, D. H.**: Auge und Gehirn. Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1989

[IBM] Ergonometrie bei der Arbeit am Bildschirm.

[IVA] **Iwainsky, A. u. Wilhelmi, W.**: Lexikon der Computergrafik und Bildverarbeitung. Vieweg, Braunschweig - Wiesbaden 1994

[KAI] **Kaiser, W.**: Elektronische und mechanische Verfahren zum schnellen Drucken in der Nachrichtenverarbeitung. NTZ (1962) H. 11, S. 564 - 579

[KAU] **Kaufmann, A.**: Entwicklungstendenzen bei Farbfernsehkameras für Standard- und HDTV. Fernseh- und Kino-Technik 47(1993) H. 3, S. 153- 165

[KLE1] **Klebe, I. u. J.**: Die Sprache der Zeichen und Bilder. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1989.

[KLE2] **Klein,R.-D.**: Mikrocomputer - Hard- und Softwarepraxis. Franzis, München 1981

[KLI1] **Klix, F.**: Erwachendes Denken. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1983

[KLI2] **Klix, F.**: Information und Verhalten. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1971.

[KLU] **Klug, H.**: Bau und Funktion tierischer Zellen. 6. Aufl. A. Ziemsen, Wittenberg 1973

[KNA] **Knapp, M.**: Digitale Photografie; Chip Spezial, Vogel Verlag, Würzburg 1994

[KÖH] **Köhler, W.** Gestaltpsychologie

[KOL] **Kolb, B. u. Wishan, I. Q.**: Neuropsychologie. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg - Berlin - Oxford 1990

[KRÄ] **Krätschmar, J., Loviscach, J.**: Flache Displays, c't 1995, H. 4. S. 104 - 110

[KRA] **Krauss, M.**: Virtuality now! c't (1992) H. 9, S. 158 - 162, H. 10, S. 250 - 255; H. 11, S. 274 - 280; H. 12, S. 278 - 282

[KRO] **Kroschel, K.**: Sprachkommunikation - akustisch und optisch. Funkschau (1996). H. 21, S. 62- 65

[KUC] **Kuchling, H.**: Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig 1991

[LAN] **Landau, T.**: Von Angesicht zu Angesicht. Was Gesichter verraten und was sie verbergen. Spektrum-Verlag o. J.

[LAT] **Latzer, F.**-M.: Spracherkennung – You Computa. PC Professionell, (1997) H. 1 S. 197 - 201

[LEM] **Lemme, H.**: Plasmadisplays starten durch. Elektronik (1977) H. 21, S. 40 - 52; H. 22, S. 56 - 70

[LEM2] **Lemme, H.**: Flache Bildröhren. Funkschau (1998) H.4; S. 61 - 63

[LEW] **Lewin, K.**: Feldtheorie in den Sozialwissenschaften. Ausgewählte theoretische Schriften. Verlag Hans Huber, Bern - Stuttgart 1963

[LIT] **Littler, T. S.**: The Physics of the ear. Pergamon Press. Oxford - London- Edinburgh - New York - Paris - Frankfurt 1965

[MAE] **Maelicke, A.**: Vom Reiz der Sinne. Verlag Chemie, Weinheim 1990

[MEY1] **Meyer-Eppler, W.**: Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1969

[MEY2] **Meyer, L. u. Shepard, H.**: Figur und Funktion. Fotokino-Verlag Leipzig, 1968 (Posing for the camara, Focal-Press London 1960

[MIC] **Michels, U.**: Atlas zur Musik. Deutscher Taschenbuch-Verlag. München 1980

[MUC1] **Mucke, H. u. Simon, H.**: Anaglyphen zur Darstellenden Geometrie. Volk und Wissen Berlin 1965

[MUC2] **Mucke, H.**: Anaglyphen und Raumzeichnungen. Teubner, Leipzig 1970.

[MUC3] **Mucke, H., Günzler, G. u. Fischer, C.**: Anaglyphen zur Struktur der Stoffe. Volk und Wissen, Berlin 1986

[MÜL1] **Müller, W.**: Flachmänner im Kommen. edv-Aspekte. 1992, H. 7, S. 22 - 31

[MÜL2] **Müller, W.**: Optoelektronische Sender, Empfänger und Koppler. Militärverlag, Berlin 1986

[NIE] **Niebuhr, J., Lindner, G.**: Physikalische Meßtechnik mit Sensoren. 4. Aufl. Oldenbourg, München - Wien, 1996

[NN01] Kameraröhren kontra CCD-Bildaufnehmer. Funkschau 1986, H. 12, S. 34-37

[NN02] Wie die verschiedenen Touchscreen-Technologien arbeiten. Elektronik-Praxis (1993) H. 4. S. 60 - 62

[NN03] Die Kontakter (Touchscreens). Screen-Multimedia. (1993) H. 9, S. 52-55

[NN04] Strichcode-Fibel von DATA-Logic GmbH Berlin + Der Strichcode-Katalog. Firmenmitteilung der Datalogic GmbH. Berlin - Hamburg usw. 1991

[NN05] Der Phasenwechseldrucker Phaser III PXi von Tektronics. mc (1994) H. 6, S.16 - 22

[NN06] Farbe, Ausstellungskatalog. Baumann u. Stromer, Zürich 1994

[NN07] Der Midas-Touch (Trackpad). Macwelt (1994) H. 6, S. 72-73

[NN08] Lehr- und Übungsbuch der Gebärden Gehörloser. Volk und Gesundheit. Berlin 1985

[NN09] Wie funktioniert das?, Meyers Lexikonverlag. Mannheim - Leipzig - Wien - Zürich 1986

[NN10] Exkurs; Das Themenspezial von RS Components GmbH 2/96

[NN11] Vakuum-Elektronik. Akademie-Verlag, Berlin 1978

[NN12] LCD-Tastatur: Aufbau, Anwendung und Programmierung. Mini Micro Magazin (1987) H. 4. S. 106 - 109

[NN13] PC-Bedienung mit der Fingerspitze. Funkschau (1995), H. 25; S. 42 - 43

[NN14] mehrere Artikel in Foto & PC 1/97

[NN15] Einhändig bedienbar. Elektroniker (1990) H. 10, S. 53

[NN16] Stereogramme. Ars edition 1994

[NN17] Drucker fast Photoqualität, Foto und PC, (1997) H. 1; S. 34 - 39

[NN18] 19 Injet-Papiere, Foto und PC, (1997) H. 1; S. 40 - 41

[NOL] **Noll, J.**: Multimedia, Midi und Musik. Fischer, Frankfurt a/M 1994

[OCK] **Ockenfelds, R.**: Das große PC-Drucker-Buch. Data Becker, Düsseldorf 1988

[PFE] **Pfeiffer, A.**: Abbild und Leitbild. Akademie Verlag, Berlin 1973

[PIE] **Pierce, J. R.**: Klang - Musik mit den Ohren der Physik. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1985

[PRI] **Prisby, J. P.**: Sehen - Optische Täuschungen - Gehirnfunktionen - Bildgedächtnis. Heinz Moos Verlag, Gütersloh o. J.

[PRO] **Proebster, W. A.**: Peripherie von Informationssystemen - Technologie und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - London - Paris - Tokyo 1987

[RAN] **Ranke, O. F. u. Lullis, H.**: Gehör - Stimme - Sprache. Springer-Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1953

[REI] **Reichardt, W.**: Grundlagen der Elektroakustik. Geest & Portig K. G., Leipzig 1958

[RIC1] **Richter, N.**: Das große Laserdrucker-Buch. Data Becker, Düsseldorf 1990

[RIC2] **Richter, M.**: Einführung in die Farbmetrik. 2. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin - New York 1981

[RIC3] **Richter, K.**: Computergrafik und Farbmetrik. Technische Akademie Wuppertal; VDE-Verlag, Berlin - Offenbach 1996

[RIC4] **Richadson, D.**: Create Stereogramms on your PC. Wait Group Press. Corte Madera, CA, 1994

[RIM] **Rimke, B.**: Schreiben mit Licht. PC-pur (1992) H.3, S. 26 - 31

[RÜD] **Rüdiger, W.**: Der Gesichtsinn. G. Thieme, Leipzig 1982

[SAC] **Sachesenweger, R.**: Stereo-Sehübungen. G. Thieme, Leipzig 1979

[SCH1] **Schläpfer, K.:** Farbmetrik in der Reproduktionstechnik und im Mehrfarbendruck. 2. Aufl. UGRA, St. Gallen 1993

[SCH2] **Schmidt, R. F.:** Neuro- und Sinnesphysiologie. 2. Aufl. Springer Berlin u.a. 1995

[SCH3] **Schmidt, R. F.:** Physiologie des Menschen. 25. Aufl. Springer Berlin u.a. 1993

[SCH4] **Schröder, G.:** Technische Optik. Vogel Buchverlag, Würzburg 1990

[SCH5] **Schult, Th. J.:** Neue Sinnlichkeit, c't 1996, 5, S. 134 -138

[SCH6] **Schaumburg, H.:** Sensoren. B. G. Teubner, Stuttgart 1992

[SCH7] **Schröter, W., Lautenschläger, K.-H., Bibrak, H.:** Taschenbuch der Chemie, 17. Aufl., Verlag Harri Deutsch Thun - Frankurt/M 1995

[SCH8] **Schahn, P.**: Digitizer: Verfahren, Fehlerquellen, Qualitätskriterien. CAD-CAM (1992) Nr. 2; 8 Seiten

[SEN] **Senger, H.**: Drucker für das Büro. Informationstechnik (1989) H. 3. S. 211ff.

[SET] **Seetzen, R.**: Bilddigitalisierung - Viele Wege führen nach Rom. Computer persönlich (1993) H. 4. S. 48 - 50

[SHA1] **Shannon, C. E.**: Communication in the Presence of Noise. Proc. IRE 37 (1949) pp. 10 - 20, (eingereicht am 24.3.1940)

[SHA2] **Shannon, Cl. E. u. Weaver, W.**: Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. R. Oldenbourg Verlag . München - Wien 1976.

[SHE] **Sheldrake, R.**: Das Gedächtnis der Natur. Scherz-Verlag. Bern - München - Wien 1993

[SKU] **Skudrzyk, E.:** Die Grundlagen der Akustik. Springer- Verlag Wien 1954

[STA] **Starrermayr; G. J.**: HP LaserJet - Anwendungen - Einsatz - Optimierung. te-wi-Verlag, München 1993

[STE] **Steinbuch, K.**: Mensch und Maschine. In: Nova Acta Leopoldina, Neue Folge Nr. 206 Band 37/1, S. 451ff. J.A. Barth, Leipzig 1972.

[STO] **Stotz, D.:** Computergestützte Audio- und Videotechnik - Multimediatechnik in der Anwendung. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1995.

[STÖ] **Störch, B.**: Drucken in Farbe. Addison-Wesley. Bonn u.a. 1994

[THI] **Thing, N. E.**: Das Magische Auge. Ars edition München 1994

[TOR] **Torndorf, H. u. Torndorf M.**: Das große Personal Computer Buch. Data Becker 1991

[VEI] **Veit, I.:** Technische Akustik. Vogel Buchverlag, Würzburg 1988

[VIL] **Vilbig, F.**: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik. Bd. 2, 4. Auflage. Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler, Leipzig 1945

[VÖL1] **Völz, H.**: Farbmetrik und Farbmodelle. rfe (1993) H. 6, 16 - 18; H. 7, S. 27 - 30

[VÖL2] **Völz, H.**: Grundlagen der Information, Akademie-Verlag, Berlin 1991.

[VÖL3] **Völz, H.**: Elektronik. Grundlagen, Prinzipien und Zusammenhänge. 5. Auflage. Akademie-Verlag, Berlin 1989

[VÖL4] **Völz, H.**: Information I. Akademie-Verlag. Berlin 1982

[VÖL5] **Völz, H.**: Information II. Akademie-Verlag. Berlin 1983

[VÖL6] **Völz, H.**: Information verstehen. Vieweg Verlag, Braunschweig - Wiesbaden 1994

[VÖL7] **Völz, H.**: Diskussion zu Rüdiger: „Über Besonderheiten der Informationsverarbeitung im Gehirn, ihre Beziehungen zu emotionalen Faktoren und der Subjektivitätseigenschaft", in Information. IV. Kühlungsborner Kolloquium, Akademie-Verlag, Berlin 1976; S. 269 - 277

[VÖL8] **Völz, H.**: Computer und Kunst. Urania-Verlag, Leipzig - Jena - Berlin 1988

[VÖL9] **Völz, H.:** Beitrag zur formalen Musikanalyse und -synthese. Beiträge zur Musikwissenschaft 17 (1975) H. 2/3, S. 127 - 154

[VÖLA] **Völz, H.; Ackermann, P.**: Die Welt in Zahlen und Skalen, Spektrum - Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford 1996

[VÖLB] **Völz, H.**: Grundlagen der magnetischen Speichertechnik Bd. 2, Akademie-Verlag. Berlin 1970

[VÖLC] **Völz, Ruth u. H.**: Vorstellung des Systems Textgrafik, GI-Mitteilungen **5** (1990) H. 3, S. 21f.

[VÖLD] **Völz, H.**: Informationsspeicher, Grundlagen - Funktionen - Geräte. Expertverlag + Linde-Verlag, Renningen-Malmsheim 1966

[VOS] **Voss, H. u. Herlinger, R.**: Taschenbuch der Anatomie, Bd. 3, Nervensystem usw. 14 Aufl. G. Fischer-Verlag Jena 1973

[WEI] **Weizenbaum, J.**: Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft. Suhrkamp, Frankfurt/M 1977

[WIE] **Wiener, N.**: Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. Hermann, Paris 1948 ein. Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und in der Maschine. Econ-Verlag, Düsseldorf - Wien 1963.

[WIL] **Willim, B.**: Leitfaden der Computergrafik. Drei-R-Verlag, Berlin 1989

[WIN] **Winkel, F.**: Klangstruktur der Musik. Radio-Foto-Kinotechik, Berlin-Borsigwalde 1955

[ZEM1] **Zemanek, H.**: Das geistige Umfeld der Informationstechnik. Springer Verlag, 1992

[ZEM2] **Zemanek, H.**: Der Geist in der Flasche. Warum der Computer nicht ausschaut. Informationstechnik **30** (1988) H. 1, S. 3 - 10.

[ZWI1] **Zwicker, E.**: Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs. Acustica (1956) H. 4, S. 365ff.

[ZWI2] **Zwicker, E.**: Psychoakustik. Springer-Verlag. Berlin - Heidelberg - New York 1982

10.3 Sonstige Verzeichnisse

Die folgenden Verzeichnisse sind z. T. sehr stark gekürzt. Das komplette, ausführliche Verzeichnis enthält über 10000 Begriffe und befindet sich als Datei sachw.txt auf der CD-ROM. In getrennten Teilen verweist sie zusätzlich auf im Text des Buches vorhandene chemische Elemente, Verbindungen und Substanzen sowie auf Einrichtungen, Institutionen, Firmen usw. Im folgenden bedeuten:

B	vor der Seitenzahl	im Bild vorhanden.
T	vor der Seitenzahl	in der Tabelle vorhanden.
f	hinter der Seitenzahl	auch auf der folgenden Seite.
ff	hinter der Seitenzahl	auch auf den folgenden Seiten, bzw. als längere inhaltliche Abhandlung.

11.3.1 Elemente, Verbindungen, Substanzen

Benzin 289, B290
Carotin 36, B36
Fleckenwasser T69
Halogen-Lampe 223, 272
Halogenlampe 270
Harnstoff 110
Hg-Hochdrucklampe B26, B33
Kampfer T69
Melaninkörner 23, 27,
Mottenpulver T69
Myolin 12
Myolinscheide 11ff, 15
Myosin 73f, B73
Na+-Einstrom 13ff, B14
Na-Dampf-Lampe B33
Na-K-Pumpen 10, 13
Natriumdampflampe 34
Ölhaut|Film B220, 221
Oxid-Kathode 118f, B119
Ozon 269
Petroleumlicht 34
Pfefferminzöl T68
Quarz T94, 98f, B98, 115
Quarzlampe B272
Retinal 23f, B24
Rhodopsin 23f, B24
RNS Ribo-Nuklein-Säure 9
Sehpurpur 23
Si-Fotodiode T184
Si-Vidicon B184
Transmitter 9, B12, 13f, 16, 20
Umanmi-Geschmack 69
Urin T69
Zellulosefaser B284

11.3.2 Abkürzungen

ADSR = Attack, Decay, Sustain, Release 239f, B239
AGP Accelerated Graphics Port 213
AM Aktiv-Matrix LCD 135
ANSI-Lumen amerikanisches Norminstitut 220f, 223
APS Advanced Photo System 177, 185
ATP Adenin-Tri-Phosphat 9
ATRAC 54
Bit/Klasse 302f
Bit/Pixel B214, 266, B267
CCD charge coupled device T94, 103, 177, 180, B184
CCD, Zeile 179, 182f, 189, 191, B192, 193f
CHEM-FET chemischer FET 110
CIE Commision Internationale de l'Éclairage 31, 40, 41
CIE Farbdreieck 38, 41
CLUT colour look up table 213
D-ILA direct (driven) Image Light Amplifier 221, B222
DIN Deutsche Industrie Norm, Farbkarte 41
DSP digitaler Signalprozessor 191
EAN einheitliche Artikel Nummer 194
EBU European Broadcasting Union 37, T37, B38, T39
ECC error correcting code 299f
EDC error detecting code 299f
EEG Electro-Encephalo-Gramm 2, 5, B6, 80, 87, B88
EKG Elektro-Kardio-Gramm 79
EKG Ereignis-Korreliertes Potential 82
EMG Elektro-Myo-Gramm 73, B80
EMV elektromagnetische Verträglichkeit 164, T164, 197, 211
EOG Elektro-Oculo-Gramm 79, 80
FCC Ferderal Communications Commission 37, T 37
FM-Synthese 240, B239, 242
GPS Global Positioning System 195, 198
HMD Head Mounted Display B4 204f, 218, 223f, 227f, 256
HRTF head related transfer function 256, 259,
ILA image light amplifier 137f, 219, 221f, B222
ISO International Organisation for Standardization 215
ITO Indium-Zinn-Oxid 133, B216, B218
JEDEC Joint Electron Device Engineering Committee 128
JPEG Joint Photographic Experts Group 39, 41, 216
LCD liquid crystal display|device 131ff, B136, 138, B161, B186, 205, 216, B218, 219, B222, B225, B229
LCD-Abkürzungen 137
LCD, bistabile 133
LCD-Großprojektion 219
LCD-Tastatur 151
LCS-Drucker liquid crystal shutter 272, 280

LED light emitting diode B26, B92, 126, 130, 140ff, B144, B155, 163, B163, B186, B194, B201, 223, B225, B272, B297
LED-Drucker 272, 280
LUT look up table 213, B213
MEMS micro electro mechanical systems 112f, 222
MPEG Motion Picture Experts Group 54, 215
MPR Statens Mätoch Provad 210
Nawi-Membran nicht abwickelbare 245
NTSC National Television System Committee T39, 41, 129, 213
OCR optical character recognition B127,180, 194ff
OPC organic photo conductiv 269, B272, 281
PA public address 248, 254
PAL phase altenation line 39, 41, 129, 213, 215
PIN Personal Identification Number 90
PLZT Blei-Lanthan-Zirkonat-Titanat 108, 146, B146
PVDF Polyvinyliden-Fluorid-Folie 98f
PZT $PbZrTiO_3$ 98, B98, 107, 108
REM rapid eye movement 80f
RET resolution enhancement technology T266, 267, B268
RIP raster image processor 271, 273
RSA-Chiffre nach Rivest, Shamir und Adleman 300
SECAM Séquentiel couleur à Mémoire 41, 129, 213
SIRDS single image random dot stereogramm 204, 227, B228, 230ff, B231
SPL sound pressure level 51
SQID superconducting quantum interference device 82,100
TCO Zentralorganisation der Angestellten und Beamten 210, B210
TFT Thin Film Transistor 135, 137f, B229
THX Thomlinson Holman's Experiments 171f,257f, B260
TWAIN technology without an importend name 191

11.3.3 Personen und zugehörende Begriffe

Adleman 300
Adorno 86
Amoore 68
Aston-Dunkelraum B121
Auger-Effekt 140
Augustinus 87
Ballmoos, Fritz 237
Barkhausen, H. 51, 53, 124
Barnack, Oskar 177
Beethoven, Ludwig van 51, 292
Bekesy 46, 48, 48
Bequerel 104
Berger, Hans 80
Berio 237
Bernardzellen T308
Bernoulli-Prinzip 76
Besselfunktion 241
Blickensderfer, George 278
Bluemlein 257
Bois-Reymond Emil Du 79
Boltzmann-Konstante 106, 118, 139, 295, 306
Boltzmann-Statistik 138
Boltzmann-Verteilung 118, B119, 143
Bongard-Weiß-Entropie 304
Bonitz, Manfred 307
Bonnet, M. 229
Boreas B84
Boyle, J. W. S. 177
Braunsche Röhre 205f
Brecht, B. 309
Broca-Zentrum B63
Brunelleschi, Filippo 177
Busch H. (Elektronenoptik) 125
Busch, Wilhelm 236
Caesar, Julius 300
Caselli 189
Chevron-Konfiguration SEV 106
Chomeni 294
Chowing, John 240
Clarke, Maureen 230
Cooper-Elektronen-Paar 101
Corbino-Scheibe 102
Coulomb'sches Gesetz 114
Crooke-Dunkelraum B121, 122
Cube, Felix 87
Curie-Temperatur 107
Dalesches Gesetz 13, 20
Dali, Salvador 230
D'Almeida 228
Dement W. 81
Descartes 178, 203
Dessau, P. 152
Destriau-Effekt 130
Diffie 300
Doppler-Effekt 99, 148, 198, 236, 248, 252, 261
Dreyfus 287
Dvorak, A. 51
Dvorak-Tastatur 200, B200
Eastman, George 177
Ebbinghaus, H. 83, B84
Eck, Wim van 210
Eckmiller-Lautsprecher 253
Einstein 143, 290
Elster 177
Engelbart, Douglas 152
Escher M. C. 44, 226
Eustachische Röhre 45, B45
Fabry-Perot-Interferometer 144
Faraday 308
Faraday-Dunkelraum B121, 123
Faraday-Konstante 10
Faulkner-Verfahren 172
Fechner 19, B19
Fermi-Niveau 180, B181
Fermi-Statistik 118, B119,138
Fick'sches Gesetz 10
Field, Moffet 224
Fink, H. 237
Fischer 221, 307
Fletcher 48
Förster-Sonde 100
Fourier-Analyse 241
Frank, Helmar 7, 85, 303
Fresnel-Linse B222
Furtwängler, Wilhelm 292
Gabor Dennis 231, 301
Galton-Henry-Verfahren 89
Gauß-Effekt 102
Gauß'sche Verteilung 305
Geitel 177
Ginsburg 185
Gliddon, Carlos 278
Gödel 203
Goethe, J. W. 263
Goldman'sche Gleichung 10
Golgi-Apparat 9, B9, 62
Golgi-Sensoren 74
Golgi-Sinnzelle 62
Grassmann'sches Gesetz 31
Gurwitsch, Alexander 308
Gutenberg 263, B264
Gutmann, Rolf 237
Haertling G. 146
Hall, Edwin Herbert 94,101

Hall-Effekt T94, 97, 100f, 159, 172
Hallwachs 177
Hammond-Orgel B239, 240
Hanksbee, F. 120
Harder, Hans 237
Hartley 301f
Hartline 20
Hawking, Stephen 199
Hawley 153
Heisenberg'sche Unschärfe-Relation 304
Helfrich-Schadt-Effekt 133, 138
Hellman 300
Helmholtz 47, 251
Henry, Pierre. 237
Hilbert 203
Hindemith, P. 152
Hitchcock 152
Hittorff-Dunkelraum B121 122
Hodgkin-Huxley-Katzsche Gleichung 10
Honegger A. 152
Huffman-Code 303
Huges, David Edward 278
Huxley 10
Huygens'sches Prinzip 117, 232, 235
Ito, Masayuki 230
Ives, Charles 237
Jacobson 53
Jacobson, Joe 285
Jacobson'sches Organ 68, B68
Jocklin-scheibe 172, B173
Johnson-Rahbeck-Effekt 244
Joule'scher Effekt 102
Julesz, Bela 230
Kant'sches Ding an sich 291
Karajan, Herbert 292
Karlplus-Strong-Synthese B239, 240
Katz 10
Kawai 116
Kay, Alan 152
Keidel, W. 7, 50
Kleitman N. 81
Klix, Friedhardt 86, 293, 307
Kobrinskij 158
Kopfermann 143
Koresh, David 237
Korn, Arthur 189
Kotelnikow 301
Krause'sche Endkolben 64
Kreuger Myron 203
Krüger, Helmut 257
Küpfmüller 301, 304
Ladenberg 143
Lambert'sche Rückstrahlung 35f
Langmuir-Blodgett-Schichten 108
Lanier, Jaron 203
Lewin 307
Liebermann, Rolf 236f
Lodge, Oliver 244
Loh B84
Lorentz-Kraft 114
Lorenz, Konrad A82
MacAdams-Ellipse 32, B32, 38, 41f, 42, 55
Mach'sche Streifen 21
Maggioni, Christoph 201
Mälzel B88
Markoff-Kette 176
Marr, David 230
Masaccio, T. die G. 177
Maxwell-Gleichungen 308
Maxwell-Verteilung 117, 119, 123
May 177
Meissner Zellkomplex 61, B62
Meißner-Effekt 101
Merkel-Zelle 61, B62
Michelson-Versuch 308
Mitterhofer, P. 278
Moog-Synthesizer 240
Morris 301
Munsell-Farbordnungssystem 41
Murakai, Azuma 160
Nernst'sche Gleichung 10
Newton'sches Gesetz 49
Niépce, Joseph Nicéphore 177
Nipkow-Scheibe 177
Nobel-Preis 48, 118, 301
Nyquist-Rate 304
Orff, C. 152
Pacini-Körperchen B62
Pauli-Verbot 138, 237
Pawlow 86
Peirce 301
Peltier-Effekt 111, 112, B112
Penrose-Dreieck 44
Perot-Fabry-Interferometer 144
Perowskit-Gitter 98, 274
Planck, Max 33, 295
Planck'sche Konstante 104, 140
Planck'scher Strahler 33f
Polhemus-Sensor 158, B225
Popper 203
Purkinje-Faser B14
Ranke 48
Ratcliff 20
Rayleigh-Streuung 115, B148
Reißner'sche Membran 47, B47
Reney-Entropie 304
Richardson-Konstante 118, T118
Rivest 300
Rollmann 228
Ross 45
Rötgen, Strahlung u.a. 210
Ruffini-Kolben|Körper 61, B62, 64
Sabine-Nachhallformel 57, 259
Sala, Oskar 152, B152
Sangster, F. L. 177
Sauerbronn, Drais von 278
Schadt-Helfrich-Effekt 133, 138
Schaeffer, Pierre 198, 237, 258
Schebalin, W. 51
Schiff'sche Base 132
Schmidt-optik 220, B220
Schultz, Debra 164
Schwann'sche Scheide 12, B12
Seebeck-Effekt 111
Shamir 300
Shannon 296, 301ff, B303, B307
Shannon-Entropie 304ff
Shannon-Redundanz 298, B303
Sheldrake 307
Silver, Bernard 194
Skinner-Box 82
Slyke, S. A. van 142
Smith, G. E. 177
Steinbuch, W 7, 288f, 308
Stevens 19, B19
Stockhausen 237
Sutherland Ivan 160, 197, 224
Sylvi'sche Furche B63
Szillard 301
Taguchi-Gas-Sensor 110
Tang C. W. 142
Thom, Randy 237
Townsend-Entladung 120ff, B121
Turing 203
Tyler, Christo 230
Vater-Pacini-Körper 61, B62
Villari-Effekt 102
Walsh-Wandler 247
Ward, Jean Renard 164
Weaver 301
Weber-Fechner-Gesetz 19f, 33, 51, 303
Wehnelt-Kathode|Zylinder 108, B124, 125, B206
Weiß 304
Weizenbaum 287
Welch, Peter 175
Wernicke Zentrum B63
Wersig, G. 307
Whittacker-Funktion 296, B296
Wiegand-Effekt 100
Wiener, Norbert 45, 289ff
Wittgenstein 203
Wollscheid, Achim 237
Woodland, Norman Joseph 194
Zemanek 203
Ziese, Dirk 199
Zimmermann, B. A. 237
Zimmermann, Thomas 158
Zwicker E. 51
Zwislocki 48
Zworykin 177

11.3.4 Sachwortverzeichnis

2½-dimensional 127, 179
2-Zoll-Diskette 178
3-Chip-Kamera 187f
3D-Bild 226
3D-Cyberbat 198
3D-Display B229
3D-Drucker 281
3D-Maus 156ff, 198
3D-Modell 180, 226f, 258
3D-Scannen 189, 193f, 227
3D-Sound-Standard 261
3-Wege-Box B253
5.1 Audio 257f, B260
9|24-Nadel-Drucker 278ff

A

A/B-Stereophonie 172
A/D-Wandler B93, 298
Ab|Anströmen, Menschen 309
Abbildung, Faserbündel 147
Abgabe Kopierer|Scanner 195
Abhör-lautstärke 53
- raum, vergrößern 260
Ableitung, Gehirn 80ff, 149
Absender, unerkannt bleiben 301
absolutes Gehör 53
Absorption, Pigment B35
- kurve 29, 34ff, B268
Abstand, optimaler 309
Abstimmanzeigeröhre 125
Abstraktion 202, 287f, B287
Abstreitbarkeit 301
Achatwelle B243, 244
Achtercharakteristik 117, B117, B165, 167, B173, 165f
Adaptionszeit B28
Adataption s. Adaption 19
additive Mischung 30f, 37ff, B37, 41, B239, 267, B268
- Synthese 240
afferent 6, B6, 16, B16, 24 50
after touch 239, B239
Ähnlichkeitsmaß, Farbe 40
Air-Motion-Wandler 247
Akkomodation 27, B27
Aktionspotential 2, 14ff, B14, B16, 20ff, 70
Aktivator 128, B129
Aktiv-Box 252
- Matrix 135, 224, B260
aktives Lexikon 176
Aktivierungsenergie 125
Aktor B1, 2, 3, B3, B4; B6, 6, 92f, B92, B93, 111ff, 202
Akustik 234
Akustik geplanter Raum 260
- Linse 249f
akustische Raumeigenschaft 256
- Raumgröße 57
- Raumsimulation, 173
- Rückkopplung 250
-r Kurzschluß 248
-s Modell 259
-s Rendering 261
-s Spiegelkabinett 259
Akzeptor 139ff, B139
Alaising, Moiré 210
Algorithmentheorie 307, B307
algorithmische Synthese 240
Alles-oder-Nichts-Gesetz 15, 74
Alphabet, definieren|festlegen 301
Alpha-Entropie 304
- Rhythmus 80, B81 T81
alte|junge Frau 44
Alter, Geschmack 70
- Hörgrenze 53, T53
- Riechschwelle 68
amakrine Zelle B22, 23
Ambiophonie 172
Amboß 45, B45
Amplitudenstufe B53, 255, B296
- Hören 53
- unterscheidbare 305f
Anaglyphentechnik 228
analog 3, B4, B93, B213, B262, B297 , 295ff, B296
-e Technik, Notwendigkeit 298
analog|digital|kontinuierlich|diskret B297
Analphabetismus 174
analytisches Hören 86
Anästhesie 81, 84
Anforderung, Schalter|Taster 96
Anfühlen wie Photo 284
angeregter Zustand 140
Angreifer 299ff, B299
animales Nervensystem 6, B6
Anlauf-Gebiet 123ff
- Spannung, Photozelle 105
Anonymität B299, 301
Anordnung, Pixel T266
- Schallquellen 256
Ansatzrohr 76
Anschläge/Minute 75
Anschlagsdynamik 152, 239, B239
Ansichtskarten, räumlich 229
Ansteuerung, sequentielle 134f
Antagonist 73, 74
Antialaising 93
Antiwackeleinrichtung 187
Antizipation 204, B204
Anwendung, Entropie 304
Anwesenheitseffekt 227
Anzahl der Farbpixel 42
Anzeige s.a. Display|Bildschirm| Monitor 113, 126, B127, 145, B146, B186, B297
- Einteilung 126, 145ff
Apertur, numerische 147, B148
Apostori-Wahrscheinlichkeit 302
Apriori-Wahrscheinlichkeit 302
Arbeits-Gedächtnis 84
- Platzgestaltung 199
- Rhythmus B88
Arbsorptionskurve 268
Archäologie 294
Architekt, Klang 59
Architektur 193, 225
Area Gehirn 15, 24ff, B25, 63, B63
Arecibo, Botschaft 288, B288, 300
Artificial Reality|World 203
Artikulation 76, 77ff, 175, 236
Arztbericht 174
As B303
asphärische Linse 220, 228
Astigmatismus 27
Atmung 60, 67, 87, B88, 116, 269
Atombombe, Klingelkopf 290
Attack 239, B239
Audio-Kompression 54
- Metrie 52, 242
Aufbau, Auge 22ff
- CCD 181
- continous drop 274
- DMD 222f
- Farbbildröhre 207
- Farb-FS-Kamera 184
- Flachbettscanner 193
- Laser 144
- Laserdrucker B270
- LCD 133
- Maus 154ff
- Muskel 73
- Optik, Scanner 191
- Scanner 189
- Toner 270
Aufbereitung, Druckseite 271
Auffälligkeit 303
aufgehelltes Papier 36, B36, 284
Auflicht-Scanner 189, 193, B214
Auflösung 127, 154, 184ff, B186, 190, 205, T212, 225, 266f
Aufnahmedynamik 262
Aufprojektion 220

Aufstellung, Mikrophon 170
Auge s.a. Sehen B5, 15f, B15, B19, 22ff, B25, 27, 33, B33, 39ff, T61, B63, T71, T72, B92, B104, B129, B141, B192, B214, B225, B228, B229, B232, 269, 297
- dunkel adaptiert 29
- Farbauflösung 39
- Motorik 24f, B80, 162
- Empfindlichkeit 33, 141
Augen-Focus 185, 187
- Hintergrund 88, 90
- Höhe 199
- Krankheit 90, 199
- Saccade 75
Auralisierung 259
ausbluten, Tinte 284
Ausdrucksfähigkeit 4
Ausgabe B3, 5, 95, 111ff
- akustisch 202
- Bild 202, 204ff
- inneres Bild 203
ausgeschlossenes Drittes 297
Auslöseeffekt 290f, 295
Aussage, wissenschaftliche 203
Ausscheidung, Haut 60
Außenohrübertragungsfunktion 261
Außerirdische 288, B288
Außersinnliches 1
Ausstattung, menschliche 288
authentische Interpretation 292
Authentizität B299, 301
Auto-Focus 80, 177f, 185f, 187
- Korrelation 288, B288
automatische Gesichtserkennung 90
- Übersetzung 174
- Notendruck 173
Automatisierungstechnik 3, 93, 97, 112
autonomes Nervensystem 5, B6
Autostereogramm s.a. SIRDS 230, B231
averbal 51, 83
axiomatische Methode 178, 203
Axon T10, 11ff, B12, B14, 15f, B15, B16, B62, B68

B

Bahnübergangssignal 237
Bakterienwachstum, Tinte 286
Band, erlaubtes|verbotenes 138f
- Abstand 106, 138ff
Bändchen-Lautsprecher 244, 247
- Mikrophon 166, B168
Bändermodell 128, 138ff
Bandpaßgehäuse 251, B253, 260, B260
Barcode B127, 180, 194ff, B194, B265, B276
- Drucker 280
- Leser|Scanner 189, 194
Bark B48 , 53, 54, B54
Basilarmembran 47ff, B47, B48, B50, 54
- Einschwingvorgang 53
- Evolution 48
Baß, emotionale Wirkung 255
- Reflexbox 250f, 255
- Wiedergabe 56, 255
Baumwollfarbband 286
Beamer 205, 219f, B220
Bedeutung B7, 44, 82f, 174f, 202
Bedienung, direkt Finger|Hand 162
- intuitive 149
- zeigende 159
bedingter Reflex 82, 86f
Befindlichkeit, emotionale 67, 90
Begegnung von Menschen 309
Begehen geplanter Bauwerke 225
Begriff 202, 287ff, B287
- Information 301
Behinderter 16, 80, 149, 174, 199ff, 234
Beleuchtung 26, B26, 33, 104, B104, B136, 188ff, B220
- Stärke in Lux 26
Belichtung, automatische 177, 185
-s Messung 103
Beobachtungskamera 229, B229
Berührung wahrnehmen 62
-s Sensor 61
Beschallungsanlage, Entwurf 260
Beschichten, Papier 284
Beschleunigung, Körper 60
beschreibende Information 307
Besucher wartet 88
Beta-Welle 81, B81, T81
Betonungsmuster 175, 299
Betrachter B220, B222
Betrachtungswinkel (2|10 Grad) 30, 38, 130, 133, B146, 219
Beugungsfehler 27, B27, B28
bewegliche Lettern 263
Bewegung, direktionale|rotationale 157
- Gliedmaßen 195
- in der Retina 27
- im Raum 199
-s Erfassung 157, 195ff
-s Rezeptor 16
-s Sensor 1, 188
-s Sinn
Beweis, korrekter 178
Bewertungskurve, Schall 51
Bewußtsein, Materie 289
Bezeichnung, Entropie 301
Biegeschwinger 115, B235
Bild, bidirektionales (MPEG) 216
- dreidimensionales 127
- Herumgehen 227
- inneres 5
- und Macht 178
- virtuelles 271
- Aufbau, interlaced|noninterlaced progressiv|zeilenweise 215
- Ausgabe 204ff
- - Mensch 126
- Einteilung 127, 178, 204
- Gedächtnis 203
Bildröhre s.a. Farbbildröhre 3, 35, B136, 174, 205, 205ff, 208, 219, B222, B225, T266, 267, B268
- Alterung 209
- Delta 207
- flache 131, 216ff
- Flat|Flatline|Planar|S-Flat 206
- Jumbo 206
- Kugel|Zylinderoberfläche 206
- Röntgenstrahlung 206
Bild-Schirm s.a. Anzeige|Display| Panal|Monitor 1, B3, B26, B114, B124, 126, B127, B160, 162, 179, 199, B206, B216, 218, B229
- - interaktiver 4
- Stabilisierer 187
- Telefon 185, 214, B214
- Verstärker 106
- Wand B35, 220, B220, B222, B223
- - Fresnellinse 220
- Wandler 106, 184, B184
- Wechsel 28, T214
- Winkel B186
Bild|Schall|Text-Verhältnis 203
binär B297, 298, B305
binaural 171
-e Raumimpulsantwort 259
binokular 25, B25
-er Monitor 225
Biofeedback 82
biologische Zelle 9ff, 297
biometrisches Merkmal 88
Biorhythmen 87ff
Biosensor 108, 110ff
Bipolarzelle 22, B22, B25
Bit-Tiefe 127, 179, 190, 204, 267
Black-Box-Methode 1, 291
- Matrix 136, 208, B216
Blätterpapille 70, B70, T71
blaue LED|Laser 141|222
Blick, Kommandos auslösen 201
- maus 200
- Richtung 80, 149, 187, B225
- Winkel HMD 225
Blindenschrift 60, 202

blinder Fleck 23
Blobs 25, B25
blooming 184, 187
Blutdruck 63, 66, B88
Bodenreflexion 257
Bogenentladung B121
Bogengang 45, B45, 64, B64
Box, Photoapperat 177
Breit-Bandchassis 246, 252
- eingeführte Technik 174, 264
- Wandverfahren 257
Brille, Gesichtserkennung 91
- Polarisation 229
Bubblejet 273ff, 277, 286
Buch, elektronisches 285
- ohne Bild 203
Bücherverbrennung 294
Buchstabenhäufigkeit 302
Buchungsmaschinen 237
Bündelung, Schall 249
Büro-Drucker 272, 280
- Kopiertechnik 263f, B264, 294
Bus-Maus 155
- Systeme, Grafik 213

C

Candela 26
Carbon, Farbband 279, 285f
cent (akustisch) 53, B54
Center-Lautsprecher 257, B260
changierender Samt 34, 38
Charakteristik 5, B5
chemische Analytik 103
- Reaktion 107, 144, 146
-r Sensor 67, 107ff
-r Sinn 60
chiffrieren 300
cholesterisch 132ff, B132, 138
Chroma 32, 39, 40
Chrominanz B28, 29, 32, 39
- Signal 40
Cinemascope 257
Cocktail-Party-Effekt 256
Code 300ff, B303
cone tracing 259
continous drop 274
Copyright 241
Corona-Entladung 121, B121
Coroton, Ladel Transfer 269, B270
Cortex 85
Cruise Missiles 198
CrystelEyes 230
Cupula-Organ 64, B64
Cyberspace 203f, B204

D

D/A-Wandler 3, 93, B93
da ist das|etwas 18, B19, 68
Daisy wheel 278
Damoklesschwert 224
darstellbare Farbe 268,
darstellende Geometrie 228
Darstellung von Menschen 178
DataGlove 158f
- Suite 159, 204
Daten, sicherheitsrelevante 88
- Recherche 301
- Handschuh 4, 158ff, 204
- Helm s. a. HMD 136, 158, 197
- Schutz 5, 298, B299
Dauergedächtnis 83ff, B83
Definition, Begriff 289
- Energie 289
- Feld 308
- Information 290, 293ff
Degauss 208f
Dehnungmeßstreifen s.a. DMS T94, 97, 161, B161
deklaratives Gedächtnis 83
Delta-Bildröhre 205, 207f, B207
- Stereophonie-Systeme 172
- Wellen 81, T81, B81
demokratisches Leben, Wiedererwachen 292
Demokratisierung, Information 294
Dendrit 11, B12 , 15, 16
Denk-Modell, Welt 204
- Psychologie 83
dense projections 13
Deskjet, farbtüchtiger 273
dialektischer Materialismus 289
DIA-Vorträge, Raumbild 229
dichroitisch 133, 136, 147ff, 183f B184, B192, 193, B222, 221f, 229, B229
Dichte, Schweißdrüsen 79
- Stäbchen|Zäpfchen 30
Dickschichttechnologie 125, 142, 277
Diebstahlsicherung 198
Differentialgleichung 307
diffuses Klangbild 57
- Licht 188
Diffusion 10, 202, 277, B284
-s Druck B276, 277, 284
DigiCam 185
Digiset 273
digital|analog|kontinuierlich|diskret B297
digital 3, B4, B93, B255, B262, 295ff, B297, 298ff
-e Kamera|Photograhie 136, 179, 185ff, 263
-e Tinte 285
-er Kopfhörer 255
-es Papier 285
-es Wasserzeichen 301
- Technik, Zukunft 298
Digitalisierungstablett s.a. Grafiktablett|Tablett 4, 149, 156, 161f
Digitizer = Digitalisierungtablett
Digitron 125f, 128
Diktierende Sprachverarbeitung 174
Dinglichkeit der Welt 60
Dipol-Lautsprecher 257f
- Wand 248
DirectSound 261
Direktschall 57, B58, B249
Diskette, 2-Zoll 178
Disko 53, 256
diskret|analog|digital|kontinuierlich 295ff, B296, B297, B307
Diskurs 175
Display s.a. Anzeige|Bildschirm| Monitor 95, B124, 126, B127, 130, 145, B151, B229, B264
- elektrophoretisches 146
- farbtüchtiges 135, 137
- Feldefffekt 120
- individuelles 223ff
- passives|aktives 135, 137
- reflektierendes 137
Dithern 42, 266f, T266, B267, 269, 278
Divergenz 20, B21
Dolby Del Encoder B260
- Surround 171f
Doppel-Baßsystem 252
- Klick, Maus 153
- Seite 283
dot/mm B267
dpi dot per inch 154, 191, 205, 266, B267
Drahtgittermodell 80
Drawing board 160
Dreh-Regler 149f, 152
- Spule 243
- Teller 193
Drei-Stufentheorie, Lernen 86
- Tagebart 91
- Wegebox 253
Drittes, ausgeschlossenes 297
drop on demand 274
druck-bare Farben 42, B268
- empfindliche Fußmatten 197
- -s Tablett 160
- -s Zeichnen|Schreiben, 159
- sensibles Tablett 89, 161f
Drucker, Einteilung, 263
- Geschichte 278
- LCS|LED 280
- sonstige 280ff
- thermische 276ff
- Farbe 36, B36, 268, 277
- Lärm 278
- Papier B284

Druck-Kammerlautsprecher 253f
- Kopf B275, B276
- - thermischer 277
- - Tintenstrahldrucker 275
- Punkt 95ff, B96, 100, T164
- - fühlbarer 150
- Raster 42, 276, B276
- Seite, Aufbereitung 271
- Sensor 97
- Telegraph 278
- Transformation B45, 248
- Verfahren 263f, B265
- Vorlage 272, 279
Druxel 266, T266
dual B288, B297, 298
dual scan 137
Dualismus, Partikel\|Welle 308
Duft s.a. Riechen\|Geruch
- Kauflust 67
- künstlicher 67
- Schmetterling 290
Dunkel-Adaption 19, B19, B26, 29
- Entladung 121, B121
- Raum, Gasentladung 122f, B121
- Strom 105
Dünnfilm-Kopf B276
- Transistor 135, 137f
Dünnschicht-Sensor 110
- Technologie 130, 277
Durch-Blutung 66, 82, B88
- Laßrichtung 140
- Licht-Betrachtung 36
- - Hologramm 233
- - Projektion 36, 220
- - Scanner 189, 192
- - Sucher 187
- - Vorlage 190
- Schläge 278, 280, 283
- Schreibepapier B265, 285
- Zugsscanner 179, 189, 192
Durst 16, B17, 60, 67
DX7, Synthesizer 240
Dynamik, verwertbare 261f
- Arten, Einteilung 261
dynamische Information 307
-s Gleichgewicht 122
-s Mikrophon 154, 166, 168

E

Ebenen, physiologische 7
Echogramm 259
Effekt B213
- äußerer lichtelektrischer 177
- elektrodynamischer 137
- elektrooptischer 146
- Gaußscher 102
- Hall 100
- Joulescher 102
- magnetoresitiver 100, 102
Effekt, Peltier 111
- piezoelektrischer 115, 274
- Seebeck 111
- thermischer 111
- Villari 102
- Wiegand 100
effektorisches Axon 16
efferent 6, B6, B16, 24, 47, 50
-e Hemmung 23
Eidophor 205, 219, 221f
Eigengeruch 67, B92
eigentliche Information 294
Eigenzeit B88
eineiige Zwillinge 90
Einfluß, Ohrmuschel 256
Eingabe, direkt mit Finger 159
- indirekte 95, 149
- Koordinaten 159
- Sprache 149
eingefrorene Polarisation 99, 133, 138
-s Wellenbild 232
eingeführte Technik 264
eingeschränkte Motorik 200
-r Wortbereich 175
Eingeweide B17, B63, B66
Eingeweideschmerz 66
Einlaßkontrolle 90
Einmessung Surround 257
Einschlafstörungen T81, 82
Einschreiben, Rückantwortschein 301
Einteilung, Aktoren 94ff
- akustische Eingaben 165
- Anatomie 5
- Ansteuerung vieler Pixel 134
- Anzeige 126
- Auflösung 186
- Ausgabetechniken 202
- Bewegungserfassung 195
- Bild 127, 178, 204
- Bildabtastung 179
Einteilung, Drucker 263
- Druck-Ausgabe 264
- - Ergebnis 285
- - Verfahren B265
- Dynamikarten 261
- Eingabetechniken 149ff
- Einsatzgebiete Drucker 280
- Emotion B8
- Farb-Systeme 39ff
- - Tiefe 127
- Flachdisplays 218
- Flüssigkristalle 137
- Gedächtnis 83
- generelle 1
- Grafiktablett 161
- Großprojektion 219
- Hardausgabe 263
- Hautsinne 61
Einteilung, Informationsfluß 6
- Interaktion 149
- Klangerzeugung 240
- klassische Photographie 185
- Kopfhörer 254
- LCD 137
- magnetische Sensoren 100
- Maus, Leistung 153
- Mikrophone B165
- Neuronenschaltungen 20
- Reizwahrnehmung 18
- Schall 236
- - Ausgabe 242
- - Erzeugung 238
- - Modelle 259
- Schmerz 66
- Sensoren 94
- Sinne 15, 16, B17, 60, T71
- Stereo-Bilder 226
- - Techniken 172
- thermischer Druck B276
Eintrocknen, Tinte 286
Einverständnis, Sonden 92
Einweglichtschranke 99
Einzel-Platzdrucker 263, 280
- Reiz, Muskel B73, 74
Einzugsscanner 189, 193
Eis auftauen 289
Elastizität, Papier 283
Electro-Encephalo-Gramm 80
- Oculo-Gramm 80
Elektret 98, 116, 165, B165, B167 244
- Membran B255
- Mikrophon 167
elektrische Analogie 297
-s Ersatzschaltbild 297
- Schreibmaschine 278
Elektro Cortico Gramm 82
- Kardio Gramm 79
- Myo Gramm 73
- Okulo Gramm 79
elektro-chemische Anzeigen 145
- chrome Anzeige 146
- dynamischer Effekt 137
- - Kopfhörer 254
- - Lautsprecher 244ff
- - Mikrophon 166
- magnetischer Ohrhörer 254
Elektrode, kammartige 103
- in Sehrinde 225
- rückseitige 130
- seitlich am Augapfel 80
Elektronen-Hopping 217
- Mikroskop 125
- Optik 105, 125, B184
- Röhre 43, 174
elektronische Kamera 126
- Musik 198
- Photographie 278

elektronische Schreibmaschine 279
- Unterschrift 301
-s Buch 285
-s Instrument 152
-s Publizieren 178
-s Zeichenbrett 160
elektro-optischer Effekt 146
- Phorese 145ff, B146
- Schock 84
- statischer Ohrhörer|Kopfhörer 254f
- Ausbreitung 13, 15, 17
Elementarladung 11
Emission, spontane 143
- stimulierte 142f, 145
- Spektralanalyse 106
Emotion 2, T2, 17, B17, 24, 29, 65, 67, 79, 81, T85, 86f, 201, 307, 309
- Basisarten 80
- Befindlichkeit 90
- Vergleich 8, B8
Empfangssystem, Eigenschaft 291
Empfindlichkeit, Auge 23
- Kamera 184
- Ohr 46
- Schall 17
- Sinnesorgan 16
Endlospapier, perforiertes 272, 278, 283
endoplasmatisches Retikulum 9, B9
Endplatte, motorische 12, B12, 74
Energie, Definition 289
- dynamisch 289
- Feld 309
- je Bit 295
- kinetische 139
- minimale 292
- mulde 294
- potentielle 289
Energie|Stoff|Information 289ff, B290
- schwelle B30, B294, 295
- Term 138
- Träger 289f, B290
Engine, Laserdrucker 271, 285
Engramm 84
entartetes Quantensystem B294
Entfernung, Schallquelle 256
- Subwoofer|Satellit 253
-s Hören 19, 56f
Entladung, selbständige 121f
Entnazifizierung 292
Entropie 87, B303
- Anwendung 304
- Bezeichnung 301
- formel 302
- formel, neue 304
- obergrenze 302
Entropie, relative 305
- thermodynamische 295, 302
- Trigramm 304
Entstehen, Getragenes B292
- Verschaltungen, Auge 23
Entwicklungsgeschichte 12
Entwurf, Beschallungsanlagen 260
Entzerrung, perspektivische 185
Environment, akustisches 237
episodisches Gedächtnis|Lernen 83
Epithelzelle 16
Epoche, Zivilisation 263
Equalizer B169
Erbgutanalyse 9, 88, 91
Erdbevölkerung B288
Erfolgs-Organ 79
- Zelle B12, 13
Erinnerung B63, 81
Erkältung 65
Erkennen, am Geruch 90
- Gesichter 90
- individuelles 89
- Noten 150, 194
Erkenntnis B287, 288
Erkennungsschwelle 68
Erleben T2, 5, B83, 202, 204, B204, 224, 233, 287, B287
- Schmerz 66
Erlebnis 149, 292, B292
Erlernen, Fremdsprache 174
erlernte Information 84
Ermüdung, Muskel 74
Erosion, Funke 280ff, B281
erregte Zone 15, B14
Erregung, unphysiologische 15
-s Fortleitung 14
-s Kreis 20, B21
-s Muster 20
Ersatzschaltbild 10f, 297
Erst-Reiz B14
Ertasten der Umwelt 60
Erwartung, Reiz 82, 86
erworbene Information 84
Erzeugung, Information 294
Event Related Potentials 82
Evolution 204
- Basilarmembran 48
- Geschmack 69
- Hautfalten, Ohrmuschel 56
- Netzhaut 23
- Schallerfahrung 256
- Sinneszellen 16
evoziertes Potential 82
Expertenwissen 287
Exponential-Horn B249
- Reflex-Box 252, B253
- Trichter 248, 253
extrafoviales Sehen B30, 23
eyedentify 90
Eye-Trackingsysteme 200

F

fach-kundiger Hörer 293
- spezifische Wörter 176
- sprachliches Symbol 126
Fadenpapillen T71
falsche Perspektive 226
Falsch-Farbe B213
- Information 293, 307
fälschungssicher 280
Falten, Ohrmuschel 256
Farb-Aufbau, 207
- Auflösung Auge 39
- Auszug 273
- Bildröhre s.a. Bildröhre|Monitor 43, 206ff, 224
- Blindheit 30, T30
- Diffusion T266, 267, 277
- Display 135ff
- Dreieck 31, 32, 36, 37, T39, 41, 129, 268, B268
- Druck 37, B38, B264, 267, B268
- Drucker 185, 274 - Band B264, B265, 276ff, B279, B284, 286
- Empfindung 29, 32, 43
- Erfahrung 29
- Fehler B27, 209, 218
- Fernsehen 37, 40, 41
- Fernsehröhre 207
- Film 233
- Filter 136, B136, 187, B218, B223
- - rotierendes 206, B220, 223f
- Fläche 37, B268
- Folie 135
- FS-Kamera, Aufbau 184, B184
- Gasentladungsröhre 123
- Gebrauch 43
- Gefühl 43
- Harmonie 44
Farb-Justage 208
- Konstanz 34
- Konvergenz 209, B209
- Kreis 25, 39, T39, 44
- Laserdrucker 272, 277
- Management 42ff, 43
- Metrik 29
- Mischung, additiv|subtraktiv 37f, 267
- Modell T39, 41ff, 265
- Monitor 37
- Ort 31, B31, 32, 268
- Palette 179, 213, B213
- Patrone 286
- Pigment 29, 36, 285
- Raum 31f, 38, 43
- Sättigung 25, 32, B32, 39, 41, 268, B268, 276
- Schwäche T30

Farb-Sechseck 37, 40, 268
- Sublimation 277, 286
- System s. Farbmodell
- Tabelle 39, 43
- Temperatur 33ff, 34, B34
- Tiefe, Einteilung 127, 212
- Ton 25, B25, 32, B32, 39ff, B40, T71f
- tüchtige CCD 183
- tüchtiger Deskjet 273
- Valenz 29, 31f, 37, B40, 41ff, 213
- Verfälschung, Licht 34, 191
- Wahrnehmung 29, 34
Farbe, darstellbare 268
- druckbare 42
- Informationswert 43
- Kulturkreis 43
- Leuchtstoff 268
- physikalisch 29
- physiologisch 29
- sensorisch gleiche 31
- Sinneseindruck 29
- subjektiv unterscheidbar 32, 41f
- Symbolwert 43f
Faser-Bündel 147
- Zahl T72
fat zero 181
Faust, Sphärenklänge 152
Fax 179, 189, 191, 264, B264, B276, 277
Federwaage B297
feedback system 250
Fehlerschutz 299, B299
Fehlsichtigkeit T 30
Feinschmecker 70
Felder 307ff, T308
Feld-Effekt 118, 120ff, 133, T94, B165, 217
- Stärke, Zellemembran 10
Felsenbein 45, 47, 242
Fenster, rund\oval 45, 46, 47
Fern-Bedienung, Geschichte 196
- Schreiben 264, B264, 278
- Sehen 28, 41, 173, 177, 187, 193, 203, B214, 220, 301
- Tastsinn 62
ferroelektrisch 99, 107, B255
-e Folie 113, 133
-e Hysterese 146
-e LCD (FLC) 133
-e Membran 255
-e Molekül 285
Ferrofluid 246, 254
festgelegten Standardfarben 43
Festtintendrucker 276
Feuchte, relative
- Sensor 108ff
Feuern einer Zelle 14
Fields-Medaille 301
Filmbelichter 43, 272f, 273B
Filmscanner 192
Finger-Abdruck B5, 88ff
- Breite 298
- Eintauchtiefe 164
- Elektrode 108
- Form 88
- Gelenk 62
- Krümmung 158
- Kuppe B62
- Print 89
- Rücken T65, 158
- Spitze T61, 65, 159
Flach-Bett-Plotter 281, B282
- - Scanner 179, 189, T190, 192f
- Bildschirm 131, 206
-e-Bildröhren 216ff
- Lautsprecher 246
- Membran 246
Flaschenhals, Informations-übertragung 292, B292
Flatterecho 58
Fleck, blinder\gelber 23, 30
Flickenteppich 288f
Flimmern 28, B28, 134, 210f, B211, 215, 230
Flug-Platz 90
- Zeug, Höreinfluß 46
- - Landung, Duft 67
Fluoreszenz 110, B112, 128, B129, B132, 140, B146, B186, 205
Flüssig-keit, magnetische 147
- Kristall 128, 131ff, B132, B146, 188, 285
Focus, augengesteuerter 185
Folientastatur 96, 161
Footroom 262, B262
förderliche Redundanz 299
Fotokopierer 126
Fötuslage, Händigkeit 85
Fovia centralis B22, 23, 30, B30
foviales Sehen B30
Fragen, Ja\Nein\Klasse 302f
Fragestrategie 302f
Fraktal 127, 179, 203
Frau, alt\jung 44
Freiheitsgrad 156, 195ff
Freischwinger 166, 244
Frequenz-Auflösung B54
- Modulation 240, B296, B305
- Multiplex B305
- Sicherheit, Hören 53
- Weiche 252
Fresnellinse, Bildwand 220
Frontlautsprecher B260
frühe Schallreflexion 57
Frustation 81, 288
FS-Kamera, Farbe, Aufbau 184
fühlbare Rückmeldung 96
-r Druckpunkt 150
Fühlen 1, 3f, B5, T71, B71, 202, 226
Füllfederhaltertinte 275, 286
Funkenerosion B265, 280, B281
Fußboden, schallharter 170, B170
Füße, kalte 65
Fußprint 89

G

Gamma B43
- Korrektur B213
- Wellen 81, T81
Ganglion 22f, B22, B25, B47,B50
Gänseblümchen-Rad 278
Ganzes, Summe 293
ganzheitlich T2, 60, B265 288
Gas-Entladung 120ff, 191
- Gesetz 236
- Sensor 108ff
Gateelektrolyt 110
Gaumen B68, T78
- Segel B75, 76
Gebrauch von Farben 43
gebündeltes Licht 188
Geburt, Neuronen 11
Gedächtnis 7, B7, 82ff, B83, B84
- Effekt LCD 135
- Inhalt 86
gedackte Pfeife 45
Gefühl 67, T71, 80
- Farbe 43
- Unlust 66
Gegen-Farbe 25, T39
- Satz 130, B297
- - zu analog 297
- Wartsgedächtnis 83, B83, B84, 85, B88
Geheim-Botschaft 300
-er Shlüssel 300
- Haltung 298, 307
Gehirn 1f, B1, B3, 5, B6, 12, B15, 23ff, 51f, B63, B68, B92
- Ableitung 80ff, 92
- Erschütterung 84
- linkes\rechtes 51, 85
- Stimulation 92, 111
- Tumor 85
- Verletzung 85
Gehör s.a. Ohr\Schall B17, 45ff, B54, 248
- absolutes 53
- Frequenzanalyse 47ff
- Katze 50
- musikalisches 46
- Wanderwellentheorie 48
- Gang 45, B45, 172, 242, 254, B255
- Knöchelchen 16, 45ff
- Modell, Unterarm 48
- Schädigung 53

Gehör, Zeitkonstanten 52
geistiges Gut 294
gelber Fleck 23, 30
Geldautomat 90, 277
geleimtes Papier 283
Generatorpotential 16f
genetische Information 84
Genuß 86, 236
Geometrie, darstellende 228
- fraktale 203
- Fehler 209, 218, 271
geplante Raumakustik 260
Geräusch 5, B18, B52, T85, 93, 236, 261, 274
- Machen 203
- Reduktion 177
- Spannungsabstand 261f, B262
geregelter Zugang 88
gerichteter Luftstrom 112
Geruch s.a. RiechenlDuft B5, B17, T71, T72, B92, 111, 287
- erkennen am 90
- nicht Bewußtsein 68
- Überleben 67
- Blindheit 69
- Zelle, genetisch 69
Gesang s.a. Singen 5, B5, 75ff, B92, 95, 149f, 236
gesättigte Farben T256
Geschichte, Bildaufnahme 177
- DataGlove 158
- Drucker 278
- Fernbedienung 196
- Hardausgabe 263, B264,
- HMD 224
- Kryptographie 300
- Maus 152
- OCR 194
- Scanner 189
- SIRDS 230
Geschichte Sprachverarbeitung 174
- Stereoaufzeichnung 257
- Stereobilder 228
- Stereotechnik 171
- Tablett 160
- Tintenstrahldrucker 273
geschlossener Kopfhörer 254, B255
- s Gehäuse 250
Geschmack s.a. Schmecken B17, 69ff, T71, T72, 111, 287
- Alter 70
- Emotion 69
- genetisch 69
- Geruch 67
- Ort, Zunge 70
-s Zelle 202
- - Neubildung 70
Geschwindigkeitsprinzip 307
Gesellschaft, Information, Kitt 308
Gesetz, große Zahl 302
- Mäßigkeit 296
Gesicht 2, B5, B7, B63, 72, 80, T85
- individuelles 90
- Karikatur 90
- Religion 90
-s Feld 25
Geste 2, 92, B92
-n Steuerung 201
Gesundheitsgefahr 91, 210
Getragenes B290, 291ff, B291, B292
- Empfangssystem 293
- entsteht B292
Gewaltakt 300
Gewohnheit 82
Glanz, metallischer 34
Glanzfolie 278
Glaskörper, Auge 22, B22
glatter Muskel 73f
Glattheit, Papier 283
Gleichgewicht 4, B5, B17, 24, 45, 60, 62, 64
- dynamisches 122
Gliazelle 11f
Glidepoint 156
Glimmentladung 121f, B121
Glomeruli 67, B68
Glonass 198
Glossy-Papier 284
Goldener Schnitt 303
Gott 178, 202
Gourmets 70
Grafiktablett s.a. Tablett 161ff
graphische Oberfläche 201
graphologisches Merkmal 88
graue SubstanzlZelle 11f
-s Wissen 287
Graugans 82
Gravitationswellen T308
Grenzflächenmikrophon 165, 170, B170
Grimassenschneiden 91
Groß-Anzeige 131, 136
- Bildprojektion 95, 113, 128, 137f, 205, 218, 219ff, 223
-e Zahl, Gesetz 302
- Hirn B25, 50, 63, 65, 67
- - Hälften 85
- - Rinde 24, 80
Größe, Bildpunkt 267
-n Verteilung, Toner 285
Grundlage, Anzeige 126f
- Ausgabe 111ff
- biologisch-anatomisch 9ff
- Information 287ff
- physikalisch-chemische 92ff, 111,
Gruppenbildung, optimale T72, 87
gustativ B7
Gut, geistiges 294

H

Haar-Balg 60, 79
- Follikel-Sensor 62
- Zelle Gehör 47, B47, 54
Halbleiter, Gas-Sensor 109
- Diode 106, 140
- DMS 97
- Laser 144
halboffener Kopfhörer 254
halliger Raum 58f
Hallradius 58, B58, 170, B170
Halogenlampe B26, B34, 191
Halteproblem 203
Hammer 45, B45
Hand, Moskauer 158
- Abdruck 90
Händeklatschen, akustisch 58
Handeln, bewußtes 4ff8
- erfolgreiches 288
Hand-Fläche T61, T65
- Form 88
- Schrift B5, 161
Händigkeit 85, T85
Handlungs-Aufwand 8
- Ziel 307
Handy-Scanner 179, 189, T190, 192f
haptisch 60
Hardausgabe 263ff
Harndrang 67
Häufigkeit, relative 302
Haut-Eigenschaft B92
- Falte 48
- - Ohrmuschel 56
- Oberfläche 60
- Sensibilität 53, T61
Haut-Sensor 62
- Sinn 60ff
- unbehaarte 61
- Wärmeregulierung 60
- Widerstand 5, B5, 8, 79, B80
- Zelle 16
Head-Room 262
- Set B92, 95, 127
Hebel, Gehörknöchelchen 46
Hefnerkerze B26
Heiz-Element B275, B276
- Wendel 109
Heizungsrohr 210
Helicotrema 47, B47, 48, B48, B50
Helligkeitssehen 22
hellwach 202
hemmender Transmitter 14, 20
Hemmung, rekurrente 20, 23
- rückwärtige 20

herabskalieren, Scannen 190
Herrschender 300
Herz-Flimmern B91
- Muskel 6, 73f
- Rhythmusstörungen 82
- Schrittmacher 6
hexadezimal B297, 298
Hidden-Markow-Modell 176
Hilfsenergie 17, 93f, B93, 165, 291, B291, B292
Hinter-das-Ohr-Gerät 242
- Grundstrahlung B33
Hinweiszeichen 126
Hippocampus 81, 83f, B83
Hirn-Gewebe, ohne Schmerz 66
- Potential, Reiz 82
- Stamm 81
- Tod 81
Histogramm 302
Hoch-Sicherheitstrackt 91
- Tonchassis 252
- Töner 244, 246f
- Ton-Kegel B245, 246
- - Lautsprecher 246
- - System 253, B253
Höhenstrahlung 120
Höhlenzeichnung 263
Hohlspiegel B220, 221, B222
Hologramm 127, 180, 186, B186, 193, 205, 227, B228, 231ff, B232
Holographie-Prinzip 307
hörbare Landschaft 237
Hören s.a. Ohr 1, 3f, B5, 45ff, B71, T72, 202, 226
- Amplitudenstufen 53ff
- analytisches 86
- Entfernung 56f
- Fläche 53, 258, B258, B262
- Frequenzsicherheit 53
Hören, Grenze, Alter 53, T53
- Klirrkoeffizienten
- Lästigkeit 53
- melodischen Ablauf 51
- Nase 56
- Ohrmuschel, Hautfalten 56
- Oktaven|Terzen 50
- Raum 56f
Hörer, fachkundiger 293
Horinzontalzelle B22, 23
Hörleistung, komplexe 256
Hörner 249, 254
Hornlautsprecher B249
Hör-Nervkreuzung B50
- Schwelle B19, 51, B52, 53, B53, 54, 55
- - international festgelegt 51f
- Verlust 52
Hot-Melt-Drucker 276
hufeisenförmige Kurve 31, 32, 268
Hunger 16, B17, 60, 67
- Riechschwelle 68
Husten 67, 269
Hydraulik 3, B4, 93, 112, T112, B112

I

ideale Modulation 306
-r Tiefpaß 296
Idee B292, 293
Identität von Personen 88ff
Ideologien 294
Igel 309
Immersion 227f, B228
Immun-Sensoren 110
- System 69
Impact-Drucker 278ff, B279
Impedanz, Schwingspule 247
- Kontrollring B245, 247
Implantat, Retina 226
implantierte Sonden 95
implizites Wissen 82
Implosionsgefahr 205
indirekte Ein|Ausgaben 95, 149
individuelle Kopfform 256
- Schallerfahrung 256
-s Display 223ff
-s Gesicht 90
-s Merkmal 88ff, 299
Information T2, 3, B83, B263, 289ff, B290
- an sich 291
- dritte Größe 289
- geistiges Eigentum 294
- gespeicherte 294
- keine 290
- Kitt der Gesellschaft 308
- kontinuierliche 307
- Stoff|Energie 289ff, B290
- und Verhalten 293
Information vervielfältigen 294
- Wahrheitswert 293
- Zeit 293
Informations-Begriff 301
- Definition 287, 290, 293ff
- Feld 307, B307
- Fluß 2, T2, 6, B21, T75, 240, 301, B303
- Theorie 7, 29
- Träger 3, 290, B290, 292, B292
- Übertragung, Flaschenhals 292
- Verlust 294
- Volumen 306
Infrarot-Kamera 90
- Kopfhörer 255
Inhibition, laterale 20, 23
Ink Optimizer 284
Inline-Bildröhre 205, 208
innen-bezogene Sinne 16
- Ohr 45, 52, B52, 242
Innen-Ohr-Prothese 242
- Sinne 60, 67ff
- weltbezogen 5, B6
innere Sicherheit 89
- Wahrnehmung 17
-r Photoeffekt 103, 183
Inohr-Hörer 242, 254
instrumentelle Konditionierung 82
Intelligenz, künstliche 287
- Quotient 85
Intellimouse 156
Intensitätsstereophonie 172
Inter-ferenz 27, 117, 143, 232, B232, 259, T308, 309
- - Mikrophon 169
- laced T214, 215
- line-transfer 182
- polierte Auflösung, Scanner 190
- zellular 9
Intervallhören 46
Interorezeotor 16
Intimbereich 5
Intraframe 216
Inzestschranke 67
Ionen-Lautsprecher 243f
- Pumpe 10, 13, 24
- Transport, aktiv 24
Irisscan 90

J

Jetlag 87
Joystick 149, B151, 156ff
Jucken B66, 67
Jumbo, Bildröhre 206

K

kabel-gebundene Erfassung Bewegung 196
- loser Stift, Tablett 160, 162
Kalotte 166, B245, 246, 249
kalt T64, B112, 130
-e Füße 65
-er Raum, akustisch 58
- Kathoden-Leuchtstoff-Röhre 133
- Lichtlampe 128
- Sensor 64f, B65
Kälte B12, B18, T20, T72, 202
kälter geworden 65, B65
Kamera, digitale 136, 185ff, 263
- - Vorteile 188
- Beobachtung 196, 201
Kanal, geheimer|öffentlicher|zu-verlässiger 300
- Kapazität 304, 306
Kantenglättung B267, B268
kapazitives Tablett 163
- Sensor 108
Kapockwolle 251
Karikaturen von Gesichtern 90

katalytisch 10, 108f, B109
Kathodenfall B121, 122
Kauflust, Duftstoff 67
Kehlkopf B75, 91
- Mikrophon 165, 171
Kerzenlicht 34, B34
Keule, Mikrophon 170, B170, 250
Key offlon B239
- Board 151, 239
- Words 174
kinästhetische Dissonanz. 63
Kinoraumklang 173
- Vorhänge 258
Kippung, AmboßlSteigbügel 46
Kissenverzerrung 27, 209, B209
Klänge 170, 252, 254
Klang-Bibliothek 241
- Bild 240
- im Raum steuern 198
- der Sprache 299
- Installation 237
- Landschaft 237
- Qualität 58, 248, 254
- Synthese, lineare 240
Klärpunkt 131f, B132
klassische Konditionierung 82
- Photographie 178, 185ff, 264
-r Buchdruck T266
Klavier-Spielen T75
- Stimmen 46
Kleeblatt-Charakteristik 117, B117
Kleidung wahrnehmen 61
Kleinhirn B63, 82
Klicken, Maus 153
Klingelkopf, Atombombe 290
Klirrfaktor 171, 253
Klischograph 189
Knäuelzellen 79
Kniehöcker 25, B25
Knöchelchenkette 248
Knochenleitung 234, 242
Koaxalstrahler 253
Kognition T2
kognitive Prozesse 83
Kohärenzlänge 143f, B144, 232f
Kohle-Mikrophon 166
- Papier, Schmutzwirkung 285
Kollaterale 11, 12, B12, 20
kollisionsfrei 203, 259
Kommandos auslösen Blick 201
Kommentar, Weaver 301
Kommunikation 202, B292
Kommunion 202
Kommunizieren, unbewußtes 5
Kompaktbox 251
Komplementärfarbe 32, B32, 38, 44, B213
Komplex, synaptischer 13
Komprimierung B215, 258f, B260, 298ff, B299, B299
Komprimierung, verlustbehaftete 42, 203, 298
- verlustlose 298f
kompromittierende Strahlung 210, 218
Kondensatormikrophon 165ff
Konditionierung 82
Konsolidierung 84
Konstruktion, unmögliche 44
Kontext 44, 83, 175, 298
kontinuierlich B238, 295ff, B296, B297, B307
-e Entropie 304
-e Information 307
Kontraktion, Muskel 74
Konus B249
- Durchmesser 244
- Lautsprechers 245f, B245
Konzertflügel 152
Köperlichkeit 16
kopf-bezogene Stereophonie 172, 254
- Form, individuelle 256
- Hörer B52, B92, 95, 113, 255, B225, 242, 254ff
- - digitaler 255
- - Infrarotübertragung 255
- - orthophoner 247
Kopiertechnik 264, B265
Körper-Abbild, Gehirn 63
- Bewegung 3f, 16, 24, 60, 80, 112, 149
- Farbe 34ff, B38
- gebundenes Merkmale 88
- Gefühl 4, B5, 60, 62
- Geruch 67
- Haftigkeit 1
- Haltung 2, 3, 4, 16, 60, 80, 149, 199
- Organ 4, 90
Körper-Resonanz, Mensch T61
- Schall 170f, 234, B262
- - Mikrophon 170
- schwarzer 33
korrekter Beweis 178
Korrelation Klang-Wort 175
Kortex 85
kortikalen Säulen 82
Kosmetik, Eigengeruch 67
kosmische Reststrahlung 33, B33
Kraft-Messer 18
- Sinn 62
- Weg-Diagramm 95f
Krawattenmikrophon 171
Kreativität 294
Kreiselkompaß, Maus 157, 198
Kreuzstichtechnik 264
Kriegführung, psychologische 237
Kriminalistik 89ff
Kristallmikrophon 166, 168
Kritik, gesellschaftliche 288
Kryptographie 299ff, B299
Kugel-Charakteristik 117, B117, B155, 165f, B165, B167, B170, 172
- Schreiber 282
- Welle 232, B232, 235, B235
Kühlung, Laser 145
- Laserdrucker 271
- Lautsprecher 246
Kulturkreis 43, 86, 293, 309
Kunst und Information 292
- Kopf-Stereophonie 172, 256
künstlerisches Wort 299
Künstlerknoten 171
Künstliche Intelligenz 203, 287
- Realität 203
- Welt 203f, B204
-r Nachhall 59
-r Wind 112
-s Leben 204, B204
Kunstlicht B34, 233
Kurz-Gedächtnis B84
- Schluß, akustischer 248, B249
- Zeitgedächtnis B7, 83ff, B83, B84
Kybernetik 289f, 307

L

Lade-Coroton 269f, B270
Landschaft, hörbare 237
Länge aller Nerven 13
langfaseriger Stoff 251, 283
Langzeitgedächtnis B7, 83ff, B83, B84
Laser, Aufbau 144
- blau 145, 222
- -TV 222
- UV 145
- Drucker 264, B264, B265, T266, 269ff, B272, 280f, 283
- Aufbau B270
- Belichtung 270
- Engine 271
- Funktionsweise B270
- in Farbe 272
- Speicherkapazität 271
- Urkundenechtheit 270
Lästigkeit, Hören 53
laterale Inhibition 20, 21, 23
Laufzeit-Stereophonie 172
- Unterschied, Ultraschall 198
Lautheit 51, B52, 55
Lautsprecher 1, 3, B3, B92, 93, B93, 95, 113, 116f, 209, 240ff, B253, 261
- Aufstellung 172
- Box 250
- Chassis 242, 246, 252
- gegenphasig 172, 257

Lautsprecher-Gehäuse 242, 250
- Gruppe|Zeile B249, 250
- rückwärtiger 172
- System 242f, 250ff
- Weiche 252
- Wirkungsgrad 245
Lautstärkeskala 51
Lavaliere 165, 171
Le geometrie 178, 203
Leben, künstliches 204, B204
Leberparachym, ohne Schmerz 66
Leddicon T184
Lederhaut 22, B22, 23, 60, B62
Lehrbücher ohne Bild 178
Leiblichkeit 4, 5
Leica 177
Leinwand 220, B220
Leitduft 68
Lentikularverfahren 229
Lernen 82ff
- Dreistufentheorie 86
- Schlaf 6
- Sprache 85
Lesen, stumm T75
Leuchten, kaltes 130
Leuchtphosphor 35, 37, B121, 123ff, B124, 128ff, B129, 129f, 134, 191, 206, B206, B207, 217, B216, B218, 219f, 267
Leuchtstoff = Leuchtphosphor
- Farbort 129
- Stofflampe B26, B33, B34, 35, 121, 123, 128
- niedrige Spannung 217
Leuchtturm 26, B26
lexikalische Einheit 175
Lexikon aktives|passives 176
Lichtart 34
Licht-Bogen B26, 243, B243
- Emission 140
- Geschwindigkeit 140, 308
- Griffel 149, 160
- kohärentes 143f
- Leiter 3, 99, 103, 110, B141, 141f, 145, 147, 147ff, B159
- - Datenhandschuh 158
- Modulator 222, 230
- monochromatisches 143f
- Netz 210
- polarisiertes 143, 148
- Quant 24, 143, T308
- Reflexion 35
- Satz 273
- Schall Unterschied, 256
- Schranke 99, 141, 154, B155, 163, 196
- Sensor B136
- Stärke B26, 35, B35
- Strom in Lumen 26, B26, 121
Licht-Ventiltechnik B136, 137, 205, 220ff, B222
- Verstärkung 138, 142, 219
- Weg B270, B273
- Welle, stehende 143, B144
Life-Scanner Fingerprint 89
Lineal, Zirkel 303
lineare Klangsynthese 240
Linien/mm siehe lpi 186, T186, B186, 233
Liniulus 20
Linotronic 273
Linotype-Hell 42
Linse, Auge 22
-n Raster B228, 229, B229
Lippen ablesen 176
- Formung Sprache, Gesang 76
Lizenzgebühren 257
Löcherleitung 106, 139f
Lockruf, Vögel 290
Logik B307
lokalisierbarer Schmerz 66, B66
Lotterie-Spiel 304
Luftdruck, hinter Stimmbänder 75
- Hörverluste 46
- Röhre B75, B76
- Taschen, Datenhandschuh 158
Lügendetektor 2, 79
Lumen 26
Luminanz B28, 29, 30, 32, 39, 40
Lumineszenz 130, 140
- Diode 140ff
Lux 26
Lymphe 45, 46, 49, 64

M

M/S-Stereophonie mono-stereo|Mitte-Seite 172
Macht und Bild 178
Magentbürste 270, B270
Magic Eye (Buch) s.a. SIRDS 230
magisches Auge (Rundfunk) 125
Magnet-Diode T94, 100, 102
- Drucker 147, 281ff, B281
- Feld, Gehirn 82
- - schmetterlingsförmig 64
- Walze 270, B270
magnetische Flüssigkeit 147
-r Sensor 100ff
-r Toner 281
-s Mikrophon 165f
magneto-dynamischer Lautsprecher 244
- elastisch 97, B101, 116
- -er Kraftmesser 102
- resitiv 100, 102
- statischer Lautsprecher 247
- striktiv 100, B101, 102, 113, 116ff
Malerei, stereoskopische 230
Manipulation, Psyche 6
manuelles Schreiben 263, B263
markarm|-haltig|-los|-reich 12, B14, 15
Markieren, Maus 153
Markscheide 12, B12, 15
- Bildung 12
Maschinen-Bau 92, 112
- Schreiben 6, 75, T75
Massen-Medien 294
- Veranstaltung 243
Maßzahl B249
Mastzellen 66
Materialismus, dialektischer 289
Materie, Bewußtsein 289
- Wellen T308
Mathematiker, kein Bild 178
Matrix-Ansteuerung 134, 219
- Anzeige 126
Matrizierung Stereoverfahren 172
Mattscheibe 30, B31, B35, 36, 220, B222, 229, B229
Maus 2ff, B3, B4, 92, B92, 95, 149, 152ff, B155, 174, 195, 287
- 3D- 156ff
- Anklicken 153
- Aufbau 154ff
- Ausführungen 154
- Auswählen 153
- ähnliche Systeme 155ff
- Cursor 153
- Doppelklick 153
- drahtlose 196
- Einteilung Leistung 153
- Führen 153
- Geschichte 152
- kabellose 156
- Klicken 153
- Kreiselkompaß 157
- Markieren 153
- mechano-optische 155
- optische 155
- Mauspad (optisches) 155
- Pen 156
- physikalische|virtuelle|dynamische Auflösung 154
- Reinigung 155
- Rückmeldung 157
- Taste 153
- Zeiger, taucht unter 137
- Zeichnen 154
- Ziehen 154
- zusätzliches Rad 156
Mavica 178, 185
Maximum B146
McInstosh 153, 178,
mechanische Anzeige 145
- Energie B265
- Erschütterungen 271

mechanische Sinne 60
- Stabilität, Aufnahme, Hologramm 233
- Verformung 98
-r Aktor 112ff
-r Reiz 16, 66
-r Sensor 66, 95ff
Medienkünstler 237
Medikamente 82
Meditation 81
Medium, Druck 282
Medizin 5, 88, 147, 176, 193, 302
mehrere Subwoofer 253
Mehrfach-Betätigung, Tasten 152
- Reflexion, Schall 57
Mehr-Frequenzmonitor 212
- Spurtechnik 172
- Wegesystem 250, 252, B253
Mehrung B7
Meisterschaften 75
mel B48, 54
Melodieverlauf 51 T71,76
Membran 9, 10, B12, B47, 108, B161, B169, B171, 235, 238, B238, 243, B243, B245, 246, B249, B255
Membran-Amplitude 252
- Ankopplung 243
- Antrieb, flächiger 247
- Ausfaltung 23
- Auslenkung 254
- Bewegung, linearisiert 253
- Dicke 10
- Eigenschaft 10
- Fläche 245
- flache 117
- Hub 245, B249
Membran-Kapazität 10
- Material 245
- massebelegte 99
- Oberfläche 13
- Permeabilität 10ff, 16
- Potential 13, B14, 15, 24
- Rückstellkraft 250
- tectorische 47
- Teilschwingungn 245
Memoration B7
Mensch 1, B1, T2, 3ff, B5, B6, 16, B17, B92, B93, B127, 202, B288
- ändert sich fortlaufend 293
- bleibt sich ähnlich 293
- Umwelt 7
- Zellenzahl 9
- Maschine|Rechnerschnittstelle 1
- Technik-Schnittstelle 1, 5ff, 16f, 75, 79, 86ff, 92f, 95, 99, 107, 112, 116, 126f, 131, 144, 149, 168, 173, 233, 238, 287, 289, 298, 309
Mensch-Technik-Schittstelle
- Definition 2
- Gefahren 91ff
- historisch gewachsen 151
Menschen, Ab|Anströmen 309
- Begegnung 309
- darstellen 178
- Töten 294
menschliche Ausstattung 288
- Stimme 91, 236, 238
mental unterscheiden 72
Merkmal, individuell 88
-s Raum, Abstand 176
Mesophase 131, B132
Meß-Elektrode B109
- Lichtquelle 30
- Methode der Physiologie 18
- Prinzip mit Primärfarben 31
- Technik, akustische 59
Messung, Modell, Schall 58
metakognitiv B201
metallic 38
metallisch B206
metallischer Glanz|Effekt 34, 36
Metallpigment B35
Metapher 175
metaphysische Erscheinung 291
metastabil 128, 143
Methode, axiomatische 178, 203
Metronom 87, B88
Micky-Mouse-Effekt 241
Micro-Dot-Verfahren 274
- Dry-Verfahren 278
- Spiegel B223
- Switch 97
- Tip B216, 217
Migräne 82
Mikro-Elektronik 265, 282, 295
- elektronisches Mikrophon 166, 171
- mechanischer Klappspiegel 219
- - Halbleiterchip 222
- organismus 108
- Schalter B96, 97, B157,162
- Taster B161
- Träger, Toner 270
- Welle 109, 111
Mikrophon 3, B3, B92, 93, B93, T94, 113, 116f, 149, 165ff, B165, B170, B170, 242f, 261, 298, T308
- Aufstellung 170
- array 177
- draht-|schnurlos 167
- Körperschall 170
- passives|aktives 165
- Referenz 166
- rauschen 262
- typen 166ff
Mikroskop B214Milieu B292
Mikrovilli 70
Milieu der Zelle 9
- sozial-kulturelles 293
Militärtechnik 131
Mimik 2
Mimose 290
Minderheit 5
Miniatur-Anzeige 136
- Display 219, 223
- Drucker 280
- Lautsprecher 242
- Kamera, in Brille 226
minimale Energie 292
Minoritätsträger 139, 180
Minute B28, B54, B88
- Rhythmus B88
miotisches Feld 308
Mischfarbe 37f, 268
Mischung, additiv|subtraktiv 31, 37ff, 268
Mitläufer 292
Mitlaut 76ff, B77
Mitochondrium 9, B9
Mitose 11
Mitralzelle 67, B68
Mittelalter 263
mittelbare Ein|Ausgaben 95
Mittelohr 45, 52
- geschädigtes 242
- Kombinationstöne 46
- Töner 246f, B245, 247
- Tonlautsprecher 246
Mittenlautsprecher 257
Mitte-Seite-Stereophonie 172
Mixturtrautonium B152
Mnemotechnik 87
Modell B204, B287, B290, 297, B297, B299
Modell, Chemie 289
- dreidimensionales 180
- Information 289
- inneres 8
- Mensch 289
- Messung, Schall 58
- Physik 289
- Unterarm, Gehör 48
- Wissenschaft 288
Modulation, ideale 306
Modus, Bildtelefon T214
möhrenrot 34
Moiré 42, 191, 209, 211, 266
- Alaising 210
monaural 171
Mond B26, B34, 87, 184
Monitor s.a. Anzeige|Display|Bildschirm|Farbbildröhre 2f B4, 28, 42f, B43, B92, B93, 113, 125ff, 136, 199, B201, 205, 209, B211, B213, 225

monochromatisch 41, 143f, B144, 268, B268
-e Primärfarbe 30
monophon 171
Morphem 174
Morphing 91, 205
morphisches Feld 307
morphogenetisches Feld 307
Morphologie 11, 94, 297
Moschusartig T69
Moskauer Hand 158
motional feedback system 250, B253
Motor B92, 112f, B220, B223, 243, B273, 289, B290
- Baß-Lautsprecher 246
- getriebener Handyscanner 189, 192
Motorik B92
Motorik, eingeschränkte 200
motorische Einheit, Muskel 74
- Endplatte 12, 74
- Sehrinde 24
-s Gehirn 63
-s Nervensystem 6
-s System 82
-s Zentrum 81
M-Signal, monophone 172
Müdigkeit 269
Multifrequenzmonitor 205
multiple Sklerose 15
Multiplex 125, 135, 137, B255, B305, 306
Multiscan-Monitor 212
Mundschreiber 200
Musik- Erfahrung 293
- Erkennung 173, 180
Musik-Erlebnis 292
- für Maschinen 237
- gedächtnis 203
- genießer|kenner 85, 292f
- Musikgenre 255
- - optimale Nachhallzeit 58
- Instrument 6, 16ff, 236, 238f
- polyphone 203
- Qualität 56
- Therapie 236
- unbekannter Genres|Kultur 86
musikalische Note 301
-r Ablauf 86
-r Klang 239
-s Gehör 46
-s Rezipieren 50
musique-concrete 237
Muskel 1f, B1, B3, B6, 9, T10, 12, B12, 15f, B17, 45f, 60, B66, 73ff, B73, 79
- Aufbau 73
- Einzelreiz 74
- gestreifter|glatter 73f
Muskel, Insekten 74
- Sehne 74
- Ermüdung 74
- Faser B14, B25, B73,74
- - Nerv 74
- Spindel 74
- Wirkungsgrad 73
Muskulatur B7, B88
Mustervektoren 175
Mü-Welle 81, T81, B81
Myofibrille B73, 74
Myogramm 79

N

Nachbar, Wand 262
Nachbildung, Sprachtrakt 238
Nachführung, Schallquellen 256
Nachfüllen, Tinte 275
Nachhall B58
- Entfernungshören 57
- künstlicher 59
- Formel, Sabine-sche 57
- Zeit 57, 58, B59, 259
- - Musikgenre 58
nachleuchtender Schirm 129, B129
Nachpotential 14, B14
Nachrichtentheorie s. Shannon-Theorie 301
Nacht B26, B28
- Sehen B26, 27, B28, 29, B30
- Sichtgerät 106
Nachweis, Feld T308, 309
Nacken B63
Nadel-Abstand B279,280
- Drucker 264, B264, 278ff, B284
- - Kompatibiltät 280
Nahbesprechungseffekt 171
Naheinstellung, Auge 22
Näherungssensor 97, 99f
Nahtastsinn 62
Nanotube B216, 218
Narkose 81, B84
Nase B25,B30, B63, T65,67, 80, 92, B92, 202
- Hören 56
- Schallabstrahlung 76
- Hohlraum 45, 67, B75, 76, 91
- - Schall 111, 256
- Schleimhaut 202
Nationalsprache 238
Naturgeräusch 236
natürliche Perle 36
Naturwolle 251
Navigation 198
Nawi-Membran 245, B245, 253
n-dimensionaler Raum 306
negative Lichtquelle 30
-s Glimmlicht 121
nematisch 132, 137f, B132
Nerv B12, B12, 13, B22, B25, B45, B47, 60, B64, B92
- Muskelfaser 74
- Endung, freie 66
- Faser 10, B47
- Stimulation 4, 16, 111,
Nervensystem 1f, B1, B3, 5, B6
- Ableitung 92
- afferentes|animales|autonomes|efferentes 6
- Einteilung 6
- innenweltbezogenes|para-sympathisches|sympathisches|vegetatives 5, 8
- zentrales|zerebrospinales 6
Nervenzelle s. Neuron
Netz, neuronales 91, 176
Netzhaut 15, 22ff, B22, B25
- Projektion 223
- Verschaltung 22
Netzwerkdrucker 263, 280
Neubildung, Geschmackszellen 70
neue Entropie-Formel 304
Neurit s. Axon
Neuron 6, 9, 11ff, 15f, B18, B21,50, 202
- akustisches 50
- bei Geburt 11
- hemmendes 20
- mittleres 10f, 14
- Schaltung, Übersicht B15, 20
Neuro-Rezeptor 13
- Sekret 9
Newton(Gerät) von Apple 161
Nicht-abstreitbarkeit B299, 301
- analog B297
- deklaratives Wissen 82
- Lambertsche Rückstrahlung 36
nicht-lineare Verzerrung 14, 252f
- lokalisierbar 257
- strahlender Übergang 140, 142
Nicken B197
niederwertiges Bit 300
Nierencharakteristik 81, 117, B117, 165, B165, B167, 170, B170, 172, B173
Niesen 67, B88
Nocizeptor 66
Nomogramm 266
Noname-Produkt, Bildröhre 208
Non-Impact-Drucker 278
- interlaced 211, 215
- verbal T85, 202
normal farbtüchtige Person 30f
-e Glimmentladung 121
- Farbenwert 31
- Spektralwertfuktion 31, 34, 38
Normenstreit DVD 257
Norm-farbanteil 31
- Lichtquelle B33, 34, 37, B141

Note, musikalische 301
- erkennen 150, 173, 194
Notepad 161
Notwendigkeit analoger Technik 298
Nucleolus B9
Nucleus cochlearis 50, B50, 242
numerische Apertur 147
nutzbare Systemdynamik 262
Nutzen der Spracheingabe 174
Nutz-Stör-Leistung 305
Nylonfarbband 286

O

Oberbegriff 289
Oberfläche, graphische 201
- Neuron 11
- Schmerz 66, B66
- Sensibilität 60
- Spannung, Tinte 286
- Term 142, 181
- Flächenwelle 113ff, 164, 235, T308
Obergrenze, Entropie 302
Oberhaut 60ff
Oberwelle, Hören 51
- Anteil 168
- reiche Schwingung 240
- Sonde 100
Objekterkennung 80, 197
Objektiv B186, B192, B220, B270
objektive Wahrscheinlichkeit 304
Off-Effekt 23
offener Kopfhörer 254
öffentliche Wahlen 301
-r Kanal|Schlüssel 300
Öffentlichkeit B91, B299
Off-Neuron B18
Öffnung B28
- akustisch 235
-s Winkel 145, 188
Off-Rezeptor 18
Offsetdruck B38, 272
Ohr s.a. Hören|Schall|Gehör 16, T71, T72, B92, 242, T308
- Druckausgleich 45
- Drucküberhöhung 46
- Empfindlichkeit 46
- Hörer 95, 113, 242, 254, B255
- Muschel 45, B45, B255
- - zwei Hautfalten 56, 256
- - Hörschwelle 51
- - Richtungshören 56
- zumachen 126, 202
oktal B297, 298
olfaktorisch B7
Olivenkern B50
one shot 187
On-Effekt 23
On-Neuron, Rezeptor 18, B18
open air 243, 254, 256
operante Konditionierung 82
operatives Gedächtnis 83f, B83
Operator DX7 240, B241
optical image stabilizer 187
Optik, Laserdrucker 269
- LEEP 228
- vorhandene 188
Optimal-Abstand 309
- Codierung B7, 303
-e Gruppenbildung 87
-e Verzögerung 260
optische Abbildung 232
- Bewegungserfassung 196
- Dichte 138
- Faser s. Lichtleiter 147
- Maus 155
-r Sensor 103ff
-s Gitter 116
- thermischer Drucker 278
Orchestermusik B59
Organ, analoges 297
- Jacobsonsche 68
Organisation 288
Organtransplantation 67, 81
Orientierung, Raum, akustisch 243
Originaldynamik 261
orthophoner Antrieb 244
- Kopfhörer 247, 254
- Lautsprecher 247
Osmoserezeptor 67
osmotischer Druck 10
- Reiz 66
Otolith 64
ovales Fenster 45, B45,46, 47, B48, B64
Overheadprojektor 136, 219, 282
Overscan 215

P

Pad, Maus 155
Paddel s.a. Joystick 157
Pagemaker 178
Pager 4, 224
Panal s.a. Bildschirm 218
Panoramakino 228
Papier 277, 283ff
- digitales 285
- geleimtes 283
- gestrichenes 283, 285
- Glossy 284
- Kosten 276
- langfasriges 245
- optisch aufgehellt 36
- Qualität 276
- randperforiertes 281
- Seite 285
- wärmeempfindliches 277
Papillarlinien 70, B70, 89
Pappe 282
Papyrus 265
Parabolmikrophon B169, 170
Parallaxe 187
Parktickets 280
particle tracing 259
Partikel, Dualismus Welle 308
Paßbild 90
passiver Decoder 260, B260
- Wandler 243
-s Display 128, 137
-s Lexikon 176
Paßwort 5, B5, 88, 91
Patientenüberwachung T184
Paukenhöhle 45, B45
Pedal B88, 149, 239
Pellistor 109
Pencomputer 161
Penetrationsröhre 207
Pen-Mouse 156
Perkussionsensemble 237
Perle B35, 36, 38
Perlwand B35
Perspektive 177, 180, 226f, B228
perspektivische Entzerrung 185
Pfeife, gedackte 45
Pfeilschwanzkrebs 20
Pförtner 88
Phantasiegebilde 204
Phantomschmerz B66
Phase-Change-Drucker 276
Phaserjet 276
phasisch B18
phasisch-tonischer Verlauf 18
pH-Messung B92, 108
Pholithographie 285
Phonation 76ff
Phonem T77, 176, 174, 176, 238
Phonetik 76ff
phonetische Schrift 203
Phonon 140, T308
Phoshoreszenz 128, B129 140
Photo-Abzug 233, 278
- ähnliche Qualität 276
- Anfühlen 284
- Apparat, digitaler 179
- Bild 36
- CD 41, 177, B214, B267
- Diode T94, 103, 104ff, B104, T195, B160, 163, B163, B194
- Effekt, innerer|äußerer 103, 183
- Element T94, 103, 104f
- Emission 118
- Empfänger 147, B155, B194
- Kopiergerät 193
- Leiter 103, B104, T105, 107
- Lithograpie 186
- Multiplier 103, 105
- nahe Qualität 275
- Papier B186, 284
- Patrone, Tintendrucker 284

Photo-Plotter 281f
- Qualität 185, 264, B264, B265, 274ff
- realistisch 43, 233
- Scanner 189
- Sensor B98
- SEV 105
- Thyristor 103, 105, T105
- Transistor 103, 105, T105
- Trommel 269ff, B270, B272 , 281
- Widerstand T94, 103f, B104
- Zelle 103, B104, 105, 177, T308
Photographie, digitale 177, 185, 278
- klassische, Einteilung 185, 188, 264
- Religion 90
Photonenstrom, superschwacher 308
pH-Wert B4, 9, B17
Physik, Zeitpfeil 87
physikalisch-chemische Grundlagen 92ff, 111, 128
-e Stimmbildung 76
-er Reiz 13
-es Farbmodell T39, 39,
-es Gesetz 302
physiologische Farbmessung 30
- Grenze 299
- Meßmethode 18
-r Schall 51
-s - Modell 259
Pictogramm 126, 153, 178
- einrastendes 150
Piezo-effekt 98, 113, 115ff, 274
- elektrische Folie 116
- Element 274
piezoelektrischer Empfänger 162
- Tintenstrahldrucker 273f
Piezo Geber B92
- Material T94, 99, 115, 166, B167, 244, 274, B275
- Mikrophon 165
- resistiv 99
- Sensor B161
- Technik 98ff
Pigment 36, B146, 274, 284, 268
Pigment, Epithelzelle 23
Pilz-Papille B70, T71
Pitch Bend B151 152, 239, B239
Pitch-Abstand B156, 207, B207, 211, B211, 219
Pixel/mm B211
- Anordnung T266
- Aanzahl 134, 205, B214, B267
Pixelfrequenz B211, 212, T212
Plasma B121, 122, 128, 131, 137
- Kanal B218
- Membran 9
Plasmapanal 118, 123, 128, 205, 216, 218f
Plastfaser B148
Plastikstreifen, leitende Tinte 158
Plotter 95, 179, 263, 265, B265, 281ff
Pneumatik 3, B4, 93, T112
Pochen, Schicksal 292
Polarisation, eingefrorene 133, 138
Polarisation, Licht 29, 133, 143, 148
- Brille 229
- Ebene 99
- Filter|Folie B132, 133f, 136, B136, B144, 148, B222, B229
- Strahlteiler 137, 221
Polhemus-Sensor|Würfel|Zeiger 197
Polygonrad|spiegel B192, B194, B222, 269, B270, 271
polymere LED 142
Polymikrophonie 172
polymodaler Schmerz 66
polyphone Musik 203
Popschutz 171, B171
Population, menschliche 85
Positionsbestimmung 157f, 164
Postskript 38, 40, 41, 42, 265
Postsynapse 13, 16, B16
Potential, postsynaptisches 16
Potentialtopf 138, B139, 181, B181
potentielle Energie 289
- Information 294
Potentiometrie 108f
Prädiktionsdaten|Bilder B215,216
Präfix-Code 301, 303, B303
Pragmatik 174
pragmatisches Erkennen 287
Prägung 82
Präsentation 44, 178, 205, 233
Präsynapse B12, 13
Pre-Scan 190
primäre Hörrinde 50
- Sinneszelle 15
- Gedächtnis 83
Primzahl 288, B288, 300
Prisma, dichroitisches 183f, 221
Prisma, verformbares 187
Privat Eye 223
pro logic Varianten B258
Programmoberfläche 2
Projektion auf Bildschirm 127
- Netzhaut 223
- Schmerz 66
- Fläche, spiralförmige 230
- Optik B222, B223
- Röhre 220
- Wand 36, B223
- Zentrum B7
Projektor B229
ProLogic-Varianten 258, 261
Proofs 277, 280
Propriorezeption Dissonanz 63
Prozeßfarbe 36f, 42f, 266, 268, 276f
Pseudoquadrophonie 172
Psi-Phänom 291
psycho-Galvanische Reaktion 79
Psychologie 5, 7, 34, 79, 304
psychologischer Schmerz 67
Publizieren, elektronisches 178
Puck 149, 159f, 162, B160
Punkte/mm 205, 266
Punktzuwachs 43, B43
Pupille 8, 22, 24, B25, B28, B28, 79f, B186, 187, 196
- Schwankung 90
- Weite 5, B5, 26f, B26, B27, 29
Purpurgerade 31
Pyramidenzelle 80
pyroelektrisch 99, 106f, T184
Pyrosensor 93

Q

Qsurround 258
Quadrophonie 172, 257
Quanten-Ausbeute 24, 104f, B184
- System 138, B294
- Theorie 29, 138, 143
- Trog B144
Quantisieren 295f, B296, B297
Quellencodierung B303
- Entropie 301
querschnittsgelähmt 199

R

R/L-Stereophonie rechts/links 172
Rachen B75, 91
Radar 198, 215
- Schirm 129
Ranvierscher Schnürring 12, B12, 14, 15
rasche Augenbewegung 81
Raster T172, 178, 266, 278
- Image-Prozessor s. RIP 273
- Schirm 229, B229
Raum, schalltoter 59, 256
- virtueller 2, 4, 173, 202
- Akustik 57ff
- Ansicht, verschiedene 227
- Atmosphäre 58, 172
- Bild 200, 226ff
- - Vor|Nachteil 233
- Eindruck 172
- Fahrt 63
- Größe, akustische 57
- Hören 56f
- Impulsantwort 259
- Klang 257

Raum-Ladung 43, 123ff
- Mikrophon 172
- Resonanz 235, 257
- Sensor 158
- Simulation, akustische 173, 261
- Winkel 25, 26
- - Immersion 228
räumlich, zwei Bilder 227
-es Schallfeld 225
Rauschpegel B186
Raytracing 258f
Reaktion, chemische 107
Reaktion, menschliche 7
Realität, künstliche 203
- virtuelle 4ff, 8, 64, 156, 158f, 203f, 223, 258
Recherche, Datenbank 301
rechtes Gehirn 51
rechts|links-Stereophonie 172
- Unterschied 90
Rechtschreibung 176
Rechtsprechung 297
Redox-Elektrode 108
Redundanz 298ff, B299, B303
Referenzwelle 232, B232
reflektierendes Display 137
Reflex, bedingter 82, 86f
- Folie 133
- Hologramm 233
- Marke 80, B80, 197
Reflexion, Welle 309
-s Lichtschranke 99
Regelhaftigkeit 298
Regenbogen-Haut 22, 90
- Hologramm 231, 233
Reiz-Art 15ff, T20
- bewirkt Hirnpotentiale 82
- elektrisch Gehirn 63
Reiz-Stärke 17, B18, 19, B21
- Vibration 61
- Wahrnehmung, Einteilung 18
Rekombination 103, 122, 140, 181
rekurrente Hemmung 20, B2123
relative Entropie 305
- Feuchte
- Häufigkeit 302
release 239, B239
relevante Information 294
Relevanz 298ff, B299
Religion, Gesichter, Photo 90
Rendering 180, 227, 258
Rendering, akustisches 261
Repräsentation B63
repräsentativ 302
resistive Technik, Tablett 161f
Resonanzfrequenz, Gehörgang 45
- Lautsprecher 246f
- Mund-Rachen-Raum 76
- Raum B75, 76, 235
Ressource, Information 294
Reststrahlung 33, 294
Retikulum 9, B9
Retina B5, B15, 22, B28, B30
- Display 224, 230
- Plantat 226
retrograde Amnesie 84
Rezeption, aktiver Prozeß 293
Rezeptor-Anzahl T72
- Osmose 67
- Potential 17, 47
- Transmitter 13
- Typ B18
Rezipient B292
Reziprozitätstheorem 35, 117, 253
Rhema B66
Rheobase 14
Rhythmus T71, 87, B88, 152
Ribosom 9, B9
Richtcharakteristik B47, 116ff, B165, 165f, 250, 257
- Haarzellen 47
- LED 142
Richt-Farbe 32, 39
- Mikrophon 59, 170
Richtungs-Hören 19, B19, 45, 50, 56f
- Sehen 23
- Wahrnehmung 253
Richtwirkung 166, 249ff, B249
Riechen s.a. Geruch|Duft 1, 4, B5, 60, 67ff, T71, T72, 202
Riech-Schleimhaut 67ff, B68
- Schwelle Hunger|satt 68
- - Alter 68
- Zelle, Neubildung 67
Riesenaxon B14
Roboter 195
- Arme, gesteuerte 158
Robotik 158
Röhrenprojektor 220
Rohrlautsprecher 251, B253
Rohrrichtmikrophon 169
Rollenplotter 281, B282
Rollkugel 156
Röntgen-Bild 188, B214
- Strahlen 17, 93, 206, 210, T308
Rot-grün-Brille|Filter 227, B229
Rückantwortschein 301
Rückbilden von Synapsen 84
Rückkopplung B239, 240, B241
- akustische 250
Rückmeldung, Joystick 157
- Datenhandschuh 158
- fühlbare 96
Rückprojektion 36, 220, 223
Rückwand, digitale 188
rückwärtige Hemmung 20, B21
- Strahlung 248
- Lautsprecher 172
Ruhe-Aktivität 17, B18
Ruhepotential B14, 17, 47
rundes Fenster 45, B45, 46, 47, B48, B64
Rundumblick 233

S

Saccaden Auge 75
saltatorische Ausbreitung 15
Sampling B296, B297
- Rate B296
- Theorem 304
Samt 38
Sandwich-Bauweise 246, 251
Sarkolemm 74
Sarmomer B73
Satellit Lautsprecher 196, 246, 253, B253
Sättigung, Farbe 268
-s Gebiet 123f
- Spannunglstrom 104, 120, B121
Satzbelichter 272
Saugsystem 200
Säule, Cortische 47
- kortikale 82
- positive 120, 123
Scala media|tympani|vestibuli 47ff, B47
Scannen 178, B179, B192, 205, 300
- 3D: 193, 227
- große Vorlagen 193
Scanner B4, 43, B43, 95, 127 149, 178, 189ff
- High-End T190
- physikalisch|elinterpolierte Auflösung 190
- Trommel 106
- Urhebergesetz 195
schädigende Information 294
Schädigung, Gehör 53
Schall als Rohstoff 237
Schall s.a. Gehör|Hören|Ohr B19, T20, 51, B92, 126, 195, B253, B262
- impulsartiger 51
- Absorber 58f, 250
- Abstrahlung 238, 243
- - Nase 76
- Angriff 237
- Aufbereitung 236ff
- Ausbreitung 234ff
- Ausgabe 234ff
- - Einteilung 242
- Bewertungskurve 51
- direkter 57
- Erfahrung, evolutionäre 256
- Erzeugung 75, 234ff, 243ff
- - elektronische 238
- Feld, räumliches 225
- - Simulation 256ff

Schall-hallharter Fußboden 170
- Modell, Einteilung 259
- Licht Unterschied, 256
- Lokalisierung 172, 254
- Pegel 51, B58, 262
- Platte 171, 292
- Reflektor 59
- Reflexion 198, 259
- - frühe 57
- Schnelle 166, 234
- Schutz 256
- Strahl 259
- toter Raum 59, 256
- Wand 148ff
- Wandler 242
Scharfeinstellung 27
Schärfentiefe 185
Schattenmaske 207
Schicksal pocht 292
Schielen 227
Schlaf 6, T81, 80f B88
Schlaf, EEG T81
Schlaganfall 85
Schleimhaut 269
Schlierenoptik 221
Schließmuskel 75
Schlitzmaske B297, 208
Schlucken 45, B88
Schlüssel, geheimer\öffentlicher 300
Schmecken s.a. Geschmack 4, B5, 60, 69ff, 202
Schmerz B17, B18, T20, 29, B66, 66ff, T71, B71, T72, B200
Schmerz, Hören 53
schmerzähnlich 67
Schmerzsinn 60
Schmetterling, Duft 68, 290
schmetterlingsförmiges Magnetfeld 64
Schnecke 16, 45, B45, 47ff, B47, B48, 52, B64
Schnecke, Flüssigkeit, Tiefpaß 48
Schneiden von Grimassen 91
Schneidplotter 281f
Schnitt, Goldener 303
Schnittmenge, Informationsträger 291
Schreib-Druck 89, 159
- Geschwindigkeit 89
- - Plotter 282
- Maschine 237, 263f, B264, B265, 278
- - elektrische 278
- - elektronische 279
Schrift, phonetische 203
Schubtraktor 283
Schulbeginn B266
Schutz-Abstand 262, B262
- Würdigkeit 300
Schwankung, Pupille 90
schwarz/weiß B214,B265, B267
- Bild 179, 190
- Bildröhre 209
- Fernsehern 40
schwarzer Körper\Strahler 33, 145
Schweiß 5, 79, B79, 149
- Absonderung 89
- Ausbruch 64, 66
- Drüse 79, B79, T79
Schwere 4, T20, 64
- Feld 115
- Losigkeit 63f
- Sinn 62
Schwerhöriger 242
Schwindel 4, 64
Schwing-Spiegel 191, B222
- Spule T94, 243ff, B245
Schwingung, Trommelfell 46
ScratchScreen 162
Sechseck, Farbe 268
Seekrankheit 63
Sehen s.a. Auge 3f, B5, 21, 22ff, B30, T71, B71, T72, 202, B214, 226, T308
- Auflösungsschwelle 28ff
- binokulares 25, 95, 228
- extra-foviales 23
- Farbe, Verschaltung 25
Seh-Feld B25
- Geschädigter 199, 223
- Nervenkreuzung 25, B25
- Rinde 25, B25, B63
- Schwacher 202, 225
- Übungen 228
Seidenglanz 277
Sekretion, Verdauungssäfte 69
sekundäre Sinneszelle 15
Sekundärelektron 103, 105, 118, B119, 120, 125, 217
sekundäres Gedächtnis 83
selbstähnlich 179
selbstleuchtenden Panals 218
semantisch B7, 174f, B201
Semiotik 301, 307, B307
semipermeabel 10
Sensibilität,53, 61 82
Sensoren 106ff
Sensor, biologischer 108, 110ff
- mechanischer 66, 95ff
- MOS-FET 108, 110ff
- optischer 103ff
sensorisch gleiche Farbe 31
-es Gedächtnis 63, 83, 85
-es Nervensystem 6, 63
- Typ in Haut 61
sequentielle Verschachtelung 298
-s Gedächtnis 83
Shutterbrille B228, B229
Sicherheit, statistische 88
Sicherheits-Abstand 309
- Attribut 300
Sicke B245, 246f
Siebbein B68
Signal, Arecibo B288
- digitales 93
- kontinuierliches 301, 304ff
- Statistik 302
Signatur 301
Signierstift 36, B36
Silben, sinnlose 83, 85
- Verständlichkeit 56, B56
Singen s.a. Gesang 75, 77, 203
single pass 187
Sinne 1ff, 5f, B1, B3, B6, B7, 16ff, B17, B19, 60ff, T72, 83, 92
- Enteilung 15, 16, 60, T71
Sinnes-Eindruck 4, 15, B15, B287
- - unmittelbarer 287
- Empfindung, Unlust 66
- Härchen 64
- Modalität 202
- Nervenzelle 16, B16
- Physiologie 15ff, B15
- Täuschung 63
- Zelle 9, 12f, 15, B15, B16, 17ff, B21, 22, 47, 60, 64
- - unspezifisch 16
sinnlose Silben 83, 85
Skalenlänge T72
Skatspiel 302
Skelett B7
Sklerose, multiple 15
smektisch 131, B132
Solarisation 43, B43, 187
Sommer B26
Son 51, B52
Sonde, implantiert 95
Sonic Assault 237
Sonne B26, 33f, B33, B44, T164
Sonnenauf\untergang 34, B34
Sonnenuhr B297
Sonogramm B214
Sound designer 237
sozialisierter Empfänger 293
Sozialisierung B15, 150, 288, 293
sozial-kulturelles Milieu 293
Soziologie 302, 307, 309
Spaceball\maus 157
Spaltfunktion 296
Sparta 300
Speicherkapazität 85, 271, 274, 298
Speichern, Information 263
Speiseröhre B75
Spektralfarbe 31, B32, 141
spektralrein 30, 268
Sphärenklänge zu Faust 152
Spiegel-Kabinett, akustisch 259
- Quelle B258, 259, 261

Spike 14, 79, B65, 84
Spionage 174, 300
spiralförmige Projektion 230
Spitzensekretärin 175
spontane Emission 143, B144
Spotting 174
Sprache s.a. Sprechen 5, B5, B7, B53, 56, 75ff, B77, T75, T85, B92, 95, 203, 236, 238
- Betonung 299
- Eingabe 149, 200, 242
- Erkennung 91, 173ff
- - Videotechnik 176
- - Nutzen 174
- Gesteuerte Befehlseingabe 173
- Klang B5, 238, 299
- Lexikon 174
- synthetische 238
- Trakt, Nachbildung 238
- Verarbeitung, Geschichte 174
- Verständlichkeit 58, 171, 254
Sprechen s.a. Sprache
- artikuliert 175
- fließend 175
Sprecherabhängigkeit 175
Squawker 246
Stäbchen 15, B15, 22ff, B22, B24, B26, B28, 29, 30, B30, 38
Stachelwalze 283
Stammhirn 65
standardisierte Hörschwelle 52
statistische Sicherheit 88
- Schallmodell 259
Statokonie 64, B64
Staubsauger, Tonerstaub 285
Staubschutzkalotte B245, 246
Steganographie B299, 300
Steigbügel 45, B45, 48, B48, 52
Stenographie 75, 90
Stenotypistin 199
Stereo-Bild s.a Raumbild 25, 127f, 218, 224, 226ff, B228
- - Betrachter 228
- - Betrachterzahl 227
- - Einteilung 226
- - Geschichte 228
- - unbewaffnet 205, 227
- - Zufall, s.a. SIRDS 230
- Box 257
- Brille 127, 227
- Hören 165, 242
- - Geschichte 171, 257
- Hörfläche 172
- Übertragung 171
- Schallplatte 257
- skopische Malerei 230
- Technik 171ff
- Verfahren 205
Steuerknüppel s.a. Joystick 157, B157
Steuerrad B44
Steuerung durch Gesten 201
Stiftcomputer 161
Stille, absolute 237
Still-Video 178
Stimm-Band 75, B75, B76, 77
- Bereiche 168
- Bildung, Modell 76
- Erkennung 5, 88
stimmhaft B53, 76f, T78
Stimmlippen T78
Stimmung, Mensch 293
Stimulation, elektrisch|magnetisch 16, 92, 112
stimulierte Emission 142f, B144, 145
Stoff|Energie|Information 289ff, B290
stofflich-energetischer Träger 293
- - Wirkungsgrad 292
- Träger 263
Stör-Nutz-Leistung 305
Störung, thermodynamisch 306
Stoßemission 118, 120ff
Strahlung, gesundheitsschädliche 17, 93, 106, 120, 210
- kompromittierende 210, 218,
- Monitoren 210
- Messung, physikalische 26
- Übergang, direkter 140
Stratosphäre, Ozon 269
Streifenfilter B181
Streuung, Lambert'sche 35
Strich-Code 194
Stroboskop 188
Stromstärke, Mensch 91
strukturelle Information 307
Stück eines Hologramm 233
Stützmikrophon 172
Stützzelle 22, 67, B68
Stylus 162
Subharmonische 152, B239, 240
Sublimation 277, B284
Subsonic-Filter 250f
Substanz, grauelweiße 12
subtraktive Farbel|Mischung 37ff, B37, 41, B239, 268, B268
subtraktive Synthese 240
Subwoofer 246, 251ff, B253, 257f, 261
Sucher, digitale Kamera 187
Superniere B165, B170
superschwacher Photonenstrom 308
Superzeichen 86ff
Supraleiter 100, 107
Surfman 157
Surround, Dolby 257, B258, B260
- Klang 173, 255
- Kopfhörer 242, 255, B255
Surround-Lautsprecher 257, B260
- Signal 257
Sustain 239, B239
Symbol, fachsprachlich 126
sympathisches Nervensystem 5, B6
Symphonie Les Echanges 237
Synapse 11ff, B12, b21, 24, 84
- Geburt 85
Synergist 73
Syntax 174
Synthese, additivelsubtraktive 240
Synthesizer 151f, 239
- DX7 240
synthetische Sprache 238
Systematik s. Einteilung
Systemdynamik 262, B262

T

Tablett s.a. Grafiktablett 2f, B4 149, 159ff, T164
- akustisches 164
- drucksensibles 89, 161
- Geschichte 160
- kabelloses|drucksensibles 160ff
- ähnliches System 162
Tabus 178
Tachistoskopie 230
Tagessehen B26, 27, B28, 29, B30
Tag-Nacht-Zyklus 87
tagträumend 202
taktil B7
taktiles Wiedererkennen T85
Taktstrich 173
Talgdrüse 79, B79
Talking Glove 159
Tapetenmuster 231
Taschenfernseher 136, 216, 224
Tastatur 1ff, B3, B4, 92, B92, 96f, 100, 149ff, 195f, 199, B200, 239, B239, 287
- drahtlos 196
- Gefühl 152
- Befehl 153, 174
Taste 2, B92, 95ff, 149ff, B155, B160, 239, B239
Tasteninstrument 151
Tast-Haare 62
- Sinn B17, 60, 62
Taubstummen-Zeichensprache 159
Tauchspule B168, B255
- Mikrophon 168
Technik, breit eingeführte 174, 264
- Sprachgebrauch 1
tectorische Membran 47, B47
Teichmuschel 75
Teilschwingungen, Membran 245f
Telefax 189, B264
Telegraphie 278, 301
Telephon 166, 242, 248, 301

Telephonhörer 244
Teleskop B288
Tele-Tact-System 158
Telex 264
Temperatur-Sinn 16, 60, 64ff
- Strahler 34
Terzen, Hören 50
Tetanus B73, 74
Text, fließend gesprochener 175
- Gesamtzusammenhang. 175
- vorlesen 201
- Erkennung 180
- Grafik 265
Textur 38, B60, T71, 132
Thalamus 24, B25, 80
Thema, musikalisches B88
thermischer Aktor 111
- Drucker 276ff
- Sensor 106f, 110
- Strahler 33
- Tintenstrahldrucker 273f
thermo-dynamische Entropie 295, 302
- Diagramm 133
- Diffussion B276, B284
- Diffussiondrucker 276
- Dynamik 17, 111
- Emission 118ff, 205
- Graphie T184
- Papier B265, 276f, B276, 280, 282, B284, 285
- Streifen, Bildröhre 208
- Sublimation/Transfer B284
- -s Drucker 276
Theta-Wellen 81, T81, B81
Thrombozyten 66
Tiefenschärfe 185
- räumlich sehen 226
Tiefen-Schmerz 66, B66
- Sensibilität 60
- Sensorik 62
Tief-Paß, idealer 296
- Schlaf T81
- Töner 243, 246
- Ton-Chassis 252, B253
- - Lautsprecher 244, 246
Tinte 265, B265, 268, 274, B275, 283ff, B284, B284
- ausbluten 284
- Behälter B275
- digitale 285
- eigenschaft 286
- Fisch B14, 297
- Füllfederhalter 275
- leitende 158
- Oberflächenspannung 286
- Patrone 275
Tintenstrahldrucker 264, B264, T266, 273ff, B275, 277, 280f, 283, 285f
Tintenstrahldrucker, Geschichte 273
- Photopatrone 284
- piezoelektrischer 273f
- thermischer 273f
- Vorteile 274
Todesstrafe 292
tödlich B91
Tomographie B214
tönende Wand 197
Toner 265, B265, 269f, B281
- Aufladbarkeit 286
- Größenverteilung 285
- Magnetdrucker 281, 286
- Partikel B270
Tonheit B48, 53
Tonhöhe T71, T72, 76f, 152, 173, B241, B239
- Verlauf 175
tonischer Verlauf 17, B18
Tonnenverzerrung 27, 209, B209
Tonwertzunahme 43
Totalreflexion 142
Töten von Menschen 294
Touchscreen s.a. Tablett 162ff
Trackball 149, 156
Trackingssystem 195, 197
Tractatus logico-philosophicus 203
Träger, materieller/stofflicher 263
Trajektorie 203
Traktor 278, 281, 283
Tränenapparat 22
Transfer-Corotron 269, B270
Transformation, Farbraum 32, 39
Transformator, unmöglicher 226
transmission line 247, 251
Transponieren 152
Transport in der Zelle 9
transversale LCD 133
Transversal-Filter 180
- Wellen 235
Trap 128
Trapping B88
traubenartige Drüsen 79
Traum 204, B204
träumend 202
Trautonium 152, B152, 240
Treiberprogramm, Scanner 195
Tremor B88
Treppenbildung 209f, 267
trial-and-error 6
Trichter, gefalteter 249
- Länge 249, B249
- Öffnung B249
Trigeminus 68
Trigramm 176
Trigramm, Entropie 304
Trinität, Dreifaltigkeit 177
Trinitron 205f, B207, 208
Tripelprisma 99
Tristimulus-Theorie 31, B31
Trittschall 171
trockenes Klangbild 58, 170
Trockentinte 278
Trommel-Fell 16, 45ff, B45, 51
- - zerstörtes 242
- Plotter 160
- Scanner 106, 179, 189ff, T190
Tumor, Gehirn 85
Tweeter 246
twisted 132, B132
twisted nematic 132
Typen-Hebel 264, B264, 278f
- Korb B264, 278
- Rad 264, B264, 278f, B279
- - Drucker B265, 279
Typist 195

U

$U^{3/2}$-Gesetz 125
Übelkeit 64, 66f
Überblick s. Einteilung 202
Übergang, direkter/indirekter 140
- strahlender 140, 142
-s Sehen B26, B28
- Wahrscheinlichkeit 176
Übergreifen, Stimmungen 309
Überleben und Geruch 67
Übersetzung von matter 289
- automatische 174
Übersteuerungsreserve 262, B262
Überwachung 72, 174
Ultraschall B4, B98, 164, 187, 196, 224, 244
- Schranke 99
- Sender, Laufzeitunterschied 198
- Sensor, Bildschirm 157
- Übertragung 156
U-Matic 185
Umfrage, soziologische 301
Umgang, gefährliche Substanzen 158, 225
Umgebungsschall 93, 175, 242
Umrechnung Farbsysteme 41
Umschlagbild 44
Umwelt, erscheint konstant 25
- Mensch 7
- virtuelle 4
unbehaarte Haut 61
unbunt 32, B32, 33, B33, 37, 39, T39, 40, 179, 268f, 269
Uneingeweihter 300
Unentscheidbarkeitsbeweis 203
unerkannt bleiben 301
Unicode 126, 203
unmittelbare Erfahrung 287
unmögliches Objekt 44, 226, B226
unphysiologische Erregung 14f
unscharfe Abbildung 27

Unschärfe-Relation, Heisenbergsche 304
unselbständige Entladung 121
unspezifisch Sinneszelle 16
Unterarm, Gehör, Modell 48
Unterhaut 60, 89
unterkühlt B65
unterscheidbare Amplitude 305f
- Farbe 32, 41f
- Frequenz 54, T256
- Richtung T256
- Silbe 175
- Stufe T20
Unterschied, Licht|Schall 256
- mentaler 72
-s Flächen, Hören 53
-s Schwelle 19, B28
Unterschrift 88
- elektronische 301
- persönliche digitale 89
unterschwelliger Reiz 14
unverhalltes Signal 259
unverlierbares Merkmal 88
Unverwechselbarkeit 89
unwillkürliche Kopfbewegungen 256
Unwohlsein 64
update-Rate 196, 198
Urheberrecht 294, B299, 301
Urheberschutz 298
Urknall 33, 294
Urkundenechtheit, Laserdrucker 270
Urne 302
Ursache-Wirkungs-Relationen 307
Uterus 74

V

Valenzband 128, B129, 138ff, B139, B181
Vandalismus 89, 164, T164
Vario-Optik 184, B184
Vase|Gesicht 44
vegetativ 5, B6, B25, B88
-e Wirkung, Schall 56
-es Nervensystem 8, 24
Ventilator 112, 116, 271
Veranschaulichung, graphische 178
Verarbeitung, neuronale 26
verbal B83, T85
verbotenes Band 138, B139
Verbrechensbekämpfung 174
Verdeckungseffekt 49, 54, B55
verdrillt cholesterisch 133
Verdunsten, Schweiß 79
Verfahren, konstruktives 303
verfälschen von Information 301
verformbares Prisma 187
Vergeltung 292
Vergleich s.a. Einteilung
- Licht|Schall T236
Vergrößern, Abhörraum 260
Verhältnis Bild|Schall|Text 203
Verkehr, bargeldloser 88
Verlauf, Zellpotential 14
Verletzung Gehirn 85
Verlust, Diskretisierung 298
- freie Komprimierung 298f B299
- Information B83, 294
- behaftete Komprimierung 42, 203, 298, B299
Vernunft B15, 297
Verschachtelung, sequentielle 298
Verschaltung, Netzhaut 22
- Sehzellen, Farbe 25
vertauschen Sender|Empfänger, 196
vertrauenswürdig 293
Vertraulichkeit B299, 300
Vervielfältigung B127, 294
verwertbare Dynamik 261f
Verwirrungsphase 86
Verzerrung, Bildgeometrie 193
- Doppler-Effekt 248
- nichtlineare 252f
- perspektivische 228
Vesikel B12, 13
Vestibular-Membran 47
- System 24, B25, 64
Vibration, Hören 71
Vibrator B3, 4, 113
Victory 292
Video-Aufnahmeröhre 183ff
- Kamera 91
- Kassette 294
- Printer 278
- Projektor 220
- Recorder 126, 185, 188
- - programmieren 194
Vielflieger 90
vielspurige Magnetköpfe 281
Vierfarbenmodell 38
Vierhügel 24, B25
Virtual Dolby Digital 258
- - Surround 258
- Environment 203
- Sonic 258
- World 203
virtuelle Primärfarben 31
- Realität 64, 156ff, 193, 203f, 223, 258
- - Dissonanz 63
- Schallquelle 258f
- Welt 203, 224, 233
-r Raum 173, 195
-r Schallraum 258
-s Bild 271
-s Display 201
-s Raumbild 227
Virtuo-Vue 224
viscerale Sensibilität 60, 67, B66
-r Schmerz 66
Vögel von Hitchcock 152
Voicetype 175f
Völlegefühl 60, 67
Vollmondlicht B26
Volumen, Information 306
- Wellen 115
Vomeronasal-Organ 68
vorgedrucktes Formulare 264
Vorhaben von Bewegung 81
Vorionisierung B121, 123
Vormachen 203
Vorsatz als Touchscreen 162
Vorscan 190
Vorstellen von Bewegung 81
Vorteile Bar|Strich-Code, 194
- digitaler Kamera 188
- Tinstrahldrucker 274
Vorwärtsbahnung 20, B21

W

Wabenstruktur 245f, B245
Wach-EEG T81
Wachsdrucker 276
Wackeln, Cursor optische Maus 155
Waco (Texas) 237
Wahlen, öffentliche 301
Wahrheit, Vergleich 293
wahrnehmungsbebasiertes Farbmodell T39, 39, 42,
Wahrscheinlichkeit 138, B139, 140, 176, 295, 301, B303
- apostori|apriori 302
- objektive|subjektive 304
-s Dichte 304
Walkman 255f
Wallpapille 70, B70, T71
Wand, kalt|warm 111
- Raumakustik 57
- tönende 197
- Pore B262
- Reflexion 257
Wanderwellentheorie 48, 49ff, 53, 54
Wandler 93, B93, 130, B161, B165
- Art B165
- passiver 243
- Verlust 262, B262
Wanze, Mikrophon 171
warm geworden B65, T65, B112
Wärme-Abstrahlung 147
- Bild 188
- empfindliches Papier 277
- Faser B18
- Regulation 60, 79
- Schutz B222

wärmer B112
- geworden 65, B65
warmer Klang 254
- Raum, akustisch 58
Warm-Punkt 65
- Schwelle B65
- Sensor 64f, B65
Wasser-Haushalt 67
- Leitungsrohr 210
- Zeichen, digitales B299, 301
Wavelet 127
Wavetable 240f
Weg des Erkennens 287, B287
- individuell dornenreicher 288
- kürzester 307
Weghören|sehen 202
Weißabgleich 34, 187
Welle, Dualismus Partikel 308
- elektromagnetische 196
- Gravitation T308
- stehende 143
Wellen-Bild, eingefrorenes 232
- Form 234ff
- Front 232, B232, 248
- Leiter B144
- Paket 143
- Widerstand, Anpassung 46, 248
Welt, erkennbare 1
- erzeugte komplexe 287
- künstliche|virtuelle 203, 233
- Formel 287
Wende, DDR 294
Wettbewerb 6, 75
Widerspiegelung 17
Wieder-Belebung 81
- Erkennen T85, 86
Wiedererwachen des demokratischen Lebens 292
Willkürbewegung T85
willkürlich 2, B5
Wind 112, 236
Windows 95, 153, 156, 261
Windschutz 171, B171
Winter B26
Wirbelsäule T61
Wirkstoff, Tablette 274
Wirkung des Reizes 15, 17
- Energie 289
- Feld 309
- Informationsträger 291, B291
Wirkungsgrad B116, 130, 142, 246, 248, 250, B291, 292
- Hilfsenergie 292
- Lautsprecher 245
- LED 142
- Leuchtstoff 128
- Muskel 73
- stofflich-energetischer 292
Wissen, Gedächtnis 83
- graues 287
Wissen, individuelles 5
- schaftliches Modell 288
- schaftsgebiet 287
Wohnung, akustisch 262
Woofer 246
Wort, künstlerisches 299
Wörter, abgesetzte 175
Wortschatz 150, 176
Writehander 200
Würfel 302
Würgereiz auslösen 70

X/Y

X/Y-Stereophonie 172
Xeropraphie 264

Z

Zahl, große, Gesetz 302
Zahlenbasis B297, 298
Zahn B63, B75, 242
- Abstand, Gesang 76
- Arztbohren 237
Zäpfchen 15, B15, 22ff, B22, B24, B25, B26, B28, 29, 30, B30, 38
- Bewegung 27
- Gaumen T78
- R T78
Zebragummi 136, B136
Zehnfingerprint 89
Zeichen "|" 1
Zeichenbrett, elektronisches 160
- Piezosensoren 161
Zeichen-Darstellung 128
- Erkennung 194
- Qualität 279
- Sprache, Taubstumme 159
Zeichenstift 162
Zeigefinger 201
zeigende Bedienung 159
Zeilen-Frequenz 211, B211, T212
- Rücklauf 212
- Sprung 211, 215
Zeit|Amplitude B296
- Konstante, Gehör 52
Zeitpfeil 87
Zeitungsdruck B38, T190
Zelle 9ff, B17, B22, B25, B68, 108, 130, B136, 297
- Ersatzschaltbild 10
Zell-Kern B9, 11, B12, B47, B73
- Körper 11, B12, B47
- Membran 9, 13ff, B9, B11
- Organelle 9f
- Potential 10ff, 11, 14ff, B 15, 22, 24, 29
- Stoff, langfasriger 283
- Teilung 9
zentrales Nervensystem 6
Zentralfurche 63, B63
Zentrierspinne B243, 245f, B245
Zerstreuungslinse, akustisch 250
Zertifizierungsstelle 89
Zeusdisplay 216
Ziel, widersprechendes 8
- Abstand 307
- Genauigkeit 75
Zilien 16, 67, B68, 69
Zirkel, Lineal 303
- Spitze 60
Zivilisation 287
- klänge 236f
Zone, entblößte 140, 180f
- erregte 15
Zonenlinse 232, B232
Zoom 169, 178, 184f, 187, 220
Zuckung, Muskel 74
Zufalls-Stereobild, s.a. SIRDS 230
Zufallszahl 85
Zugang geregelter 5, 88
Zugtraktor 283
Zugwaggon kennzeichnen 194
zulässiger Fehler 88
Zunge B5, B63, B68, B75, B101, 111, B238
- Gesang 76
- Geschmacksort 70
- Form 77
Zungen-Maus 200
- R T78
- Spitze T61, T78
Zusammenschaltung, Operator 240
Zusammenwirken 2
Zusatzbildschirm 201
zusätzlich B36
Zusatzstoff, Druck 285
Zusatztaste 151
Zustände, Speicher 302
- unterscheidbar 294, 302
Zustimmung B92
zuverlässiger Kanal 300
Zuverlässigkeit 90, 145, T164, 196, 254
Zuverlässigkeit, statistische 88
Zweier-Entscheidung 302
- Schritt 302f
Zwei-Jähriger 287
- Kanal-Stereo 260
- Punktschwelle 61
- Wegesystem 250, 252f
Zwillinge, eineiig 67, 90
zwischenmenschliche Beziehungen 90
Zwischenzeilenflimmern|verfahren 215
Zylinderlinse 191, 229
Zytoplasma 9, B9, B11

NEUERSCHEINUNGEN

Prof. Dr. Horst Völz

Informationsspeicher

Grundlagen - Funktionen - Geräte

319 Seiten, 390 Bilder, 156 Literaturstellen,
DM 78,--, öS 569,--, sfr 79,90
Reihe Technik
expert ISBN 3-8169-1287-7
Linde ISBN 3-85122-569-4

Die Vielfalt der modernen technischen Speicher ist nahezu unübersichtlich groß. Immer mehr setzen sich die digitalen Varianten, insbesondere der Rechentechnik, durch. Aber an vielen Stellen, wie Audio-, Video- und Diktiertechnik, sind immer noch die analogen Varianten unübertroffen effektiv. Aus ihnen sind ja die meisten neuen Varianten hervorgegangen.

Das Buch erfaßt die heute verwendeten Speicher aus einer allgemeinen, systematischen und betont technisch-physikalischen Sicht. Neben vielen technischen Details wird dadurch ein tieferes und grundlegendes Verständnis aller, auch zukünftiger, Prinzipien vermittelt. Die Hauptgebiete sind: Halbleiterspeicher, Magnetbandspeicher sowie rotierende magnetische, optische und magnetooptische Speicher. Ihre Anwendungsvorteile und Grenzen werden herausgestellt und erleichtern so Technikern und Anwendern die Entscheidung für den Einsatz.

Das Buch richtet sich vor allem an Entwickler und Anwender von Speichern. Für Studierende der Fachrichtungen Informatik, Elektronik und Nachrichtentechnik ist es ein unentbehrliches Grundlagenwerk mit Vertiefungscharakter. Großer Wert wurde auf didaktische Klarheit und übersichtliche Bilder gelegt. Auf betont mathematische Aussagen wurde verzichtet.

Prof. Dr. Horst Völz (1930) war über vier Jahrzehnte wissenschaftlicher Leiter eines großen Teams der Grundlagenforschung zur Speicherung an der Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Unter seiner Leitung wurden u.a. fast alle Speicher für die russischen Forschungssatelliten entwickelt und gefertigt. Von ihm existieren mehrere Bücher vor allem zur Elektronik, Information und Speichertechnik, sowie über dreihundert Fachpublikationen. Zur Zeit übt er Lehrtätigkeiten an der Freien und an der Technischen Universität Berlin aus.

expert verlag GmbH · Postfach 2020 · D-71268 Renningen

Linde Verlag Wien Ges.m.b.H., Scheydgasse 24, A-1210 Wien