Horst Völz / Peter Ackermann

Die Welt in Zahlen und Skalen

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Horst Völz/Peter Ackermann

Die Welt in Zahlen und Skalen

Mit 33 Abbildungen, 9 Tabellen und 61 Skalen

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg · Berlin · Oxford

Titelbild: © THE IMAGE BANK/Gary Chapman

Wir danken für die Abdruckgenehmigung der Abbildungen auf Seite 180.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Die Welt in Zahlen und Skalen/Horst Völz/Peter Ackermann.
– Heidelberg ; Oxford : Spektrum, Akad. Verl.
ISBN 3-86025-118-X
NE: Völz, Horst; Ackermann, Peter

© 1996 Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg · Berlin · Oxford

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, sind vorbehalten. Kein Teil des Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages photokopiert oder in irgendeiner anderen Form reproduziert oder in eine von Maschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Produktion: Myriam Nothacker
Einbandgestaltung: Kurt Bitsch, Birkenau
Reihengestaltung: Zembsch' Werkstatt, München
Satz, Druck und Verarbeitung: Druckerei Bitsch, Birkenau

Inhalt

1 Einführung **1**

2 Von der Wahrnehmung zum Vergleich – Zählen und Messen **5**
2.1 Von der Menge zur Zahl 5
2.2 Vom Vergleich zur Maßeinheit 12
2.3 Meßgeräte 16

3 Skalen **19**
3.1 Länge 23
3.1.1 Fläche 29
3.1.2 Volumen 32
3.2 Zeit 35
3.2.1 Frequenz 41
3.2.2 Geschwindigkeit 45
3.2.3 Beschleunigung 49
3.2.4 Volumenfluß 52
3.3 Masse 54
3.3.1 Massenfluß 60
3.3.2 Dichte 62
3.3.3 Kraft 65
3.3.4 Druck 68
3.3.5 Leistung 71
3.3.6 Leistungsflächendichte 74
3.3.7 Leistungsdichte 76
3.3.8 Leistungsmassendichte 78
3.3.9 Energie 80
3.3.10 Bestrahlung 84
3.3.11 Räumliche Energiedichte 86
3.3.12 Energiedichte 88
3.3.13 Dynamische Viskosität 90
3.3.14 Kinematische Viskosität und Diffusion 92
3.4 Elektrizität 95
3.4.1 Elektrische Stromstärke 97
3.4.2 Elektrische Stromdichte 101
3.4.3 Elektrische Spannung 104
3.4.4 Elektrische Feldstärke 107
3.4.5 Beweglichkeit von Ladungsträgern 110
3.4.6 Elektrischer Widerstand 112

3.4.7 Spezifischer elektrischer Widerstand ... 116
3.4.8 Elektrische Ladung ... 118
3.4.9 Elektrische Kapazität ... 121
3.4.10 Relative Dielektrizitätskonstante ... 124
3.5 Magnetismus ... 126
3.5.1 Magnetische Feldstärke ... 134
3.5.2 Magnetische Induktion ... 137
3.5.3 Induktivität ... 140
3.5.4 Relative magnetische Permeabilität ... 142
3.6 Stoffmenge ... 146
3.7 Temperatur ... 148
3.7.1 Wärmeleitfähigkeit ... 154
3.7.2 Spezifische Wärmekapazität ... 158
3.8 Lichtstärke ... 160
3.8.1 Leuchtdichte ... 166
3.8.2 Lichtstrom ... 168
3.8.3 Beleuchtungsstärke ... 170
3.8.4 Belichtung ... 172
3.8.5 Lichtausbeute ... 174
3.9 Energiereiche Strahlung ... 176
3.9.1 Aktivität ... 182
3.9.2. Spezifische Aktivität ... 184
3.9.3 Energiedosis ... 186
3.9.4 Exposition ... 188
3.9.5 Äquivalentdosis ... 191
3.10 Sonstige Größen ... 194
3.10.1 Informationsmenge ... 194
3.10.2 Datenfluß ... 200
3.10.3 Lineare Speicherdichte ... 202
3.10.4 Flächenspeicherdichte ... 204
3.10.5 Volumenspeicherdichte ... 206
3.10.6 Winkel ... 208
3.10.7 Lautstärke ... 211
3.10.8 Wirkungsgrad ... 214
3.11 Zahlen – Relationen – Wahrscheinlichkeiten ... 217
3.11.1 Relative Meßfehler ... 220

4 Verknüpfungen von Einheiten ... 222
4.1 Länge und abgeleitete Einheiten ... 224
4.2 Zeit und Frequenz ... 226
4.3 Masse und Ableitungen ... 228
4.4. Energie und Leistung ... 230
4.5. Elektrizität und Magnetismus ... 232
4.6 Temperatur ... 234
4.7 Lichttechnik ... 236

4.8 Ionisierende Strahlung 238
4.9 Information 240

5 Von der Welt der Zahlen zur Welt in Zahlen 242
5.1 Ziffern und Zahlen – Bedeutung und Deutung 243
5.2 Zahlen in der Mathematik 244
5.3 Zahlenbereiche 245
5.3.1 Binärer Zahlenbereich 247
5.3.2 Psychologischer Zahlenbereich 249
5.3.3 Anschaulicher Zahlenbereich 250
5.3.4 Naturgegebener Zahlenbereich 250
5.3.5 Kombinatorischer Zahlenbereich 251
5.3.6 Mathematischer Zahlenbereich 251
5.4 Die Welt in Zahlen – Widerspiegelung oder Fiktion? 252

6 Von der Mathematik zur Physik – Die Messung 255
6.1 Messen – Prozeß und Darstellung 255
6.1.1 Physikalische Größen 257
6.1.2 Meßprozeß 259
6.1.3 Meßwert, Meßfehler 262
6.1.4 Grenzwerte 265
6.2 Skalentypen 267
6.3 Maßsysteme, SI 271
6.3.1 Absolute Maßsysteme 272
6.3.2 Das Système International (SI) 272
6.3.3 Probleme des SI 274

7 Die vermessene Welt 277

Wichtige Konstanten 283

Literatur 285

Namen- und Sachverzeichnis 291

1 Einführung

Zahlen spielen im Leben der Menschen eine große Rolle. Tagtäglich werden wir in allen Lebensbereichen von ihnen überschüttet, beim Frühstück durch die Nachrichten, während der Arbeit, in der Freizeit, bei Sport und Spiel. Ein großer Teil unseres Lebens wird durch Zahlen bestimmt oder durch sie erfaßt.

Das Wesentliche unserer Geburt ist für die meisten Menschen nur die Angabe unseres Geburtsdatums. Wir selber werden schon im Mutterleib durch allerlei Zahlen charakterisiert, gleich nach der Geburt werden unsere „Koordinaten" (Zeitpunkt, Gewicht, Länge) festgehalten. Anhand solcher Zahlen werden wir unser ganzes Leben lang beobachtet und beschrieben. Es kommen im Laufe der Zeit weitere hinzu, wie Blutdruck, Herzfrequenz etc. Der erwachsene Mensch bestimmt seinen Tagesablauf durch die Angabe von Zahlen, z.B. durch Termine, Telefonnummern, Postleitzahlen (ein Brief ohne letztere benötigt ein Vielfaches der normalen Laufzeit).

Für viele wird unsere Existenz nur durch Zahlen charakterisiert, Personalnummern in Betrieben, Versicherungsnummern, Kontonummern, Pin-Nummern für Kreditkarten, Kundennummern u.ä. Schon mancher hat unter den Folgen einer falschen Eingabe solch einer Zahl gelitten, mancher Auftrag wurde mangels Angabe der entsprechenden Kundennummer nicht ausgeführt, Überweisungen wurden fehlgebucht, weil niemand mehr den Empfängernamen liest.

Mittels Zahlen bewerten wir Ereignisse und sogar Menschen. Der Erfolg von Fernsehsendungen wird durch die Angabe der Einschaltquote entschieden. Der Wert eines Menschen wird an der Größe der Zahl auf dem Gehaltsstreifen abgelesen, Wissenschaftler werden nach der Zahl ihrer Publikationen bewertet. Schönheitswettbewerbe benötigen Zahlentripel, Durchschnittswerte geben Normen vor. Wertungen richten sich an der Zahl aus, weil wir diese überbewerten.

Zahlen haben die Welt erobert. Aber wir können oftmals auch die Welt nur noch mittels Zahlen darstellen. Es geht nicht mehr um die verbale, ganzheitliche Beschreibung von Tatsachen und Vorgängen – eine „exakte", quantifizierte Beschreibung wird gefordert. Diese benötigt Zahlen, wer mit vielen Zahlen operiert erweckt den Anschein großer Exaktheit und Objektivität („Zahlen lügen nicht" – aber mit Zahlen kann man gut lügen!).

Es gibt aber auch eine andere, mystische Seite der Zahlen. In vielen Kulturen spielten und spielen bestimmte („heilige") Zahlen eine besondere Rolle. Im Abendland sind es die 3 (Dreifaltigkeit) und die 7 (Zahl der Planeten, Tage eines Mondviertels und Tage der Woche). Die 13 gilt in Europa als Unglückszahl. In der Kabbala spielt die Zuordnung bestimmter Zahlen zu Wörtern, die sich aus der Zahlbedeutung der hebräischen Buchstaben ergeben, eine wichtige interpretatorische Rolle (Gematrie). Die Besonderheit von Zahlen ist auch bei dem zunehmend zu beobachtenden Trend zur Esoterik und ähnlichen Strömungen zu verzeichnen.

Zahlen haftet etwas Widerprüchliches an, einerseits der Geruch von Mystik und Emotionalität, andererseits der Habitus von Exaktheit und Rationalität. Obwohl wir uns oft gegen die Vereinnahmung durch die Zahlen wehren, lassen wir uns andererseits durch sie in den Bann ziehen. Von alters her erzählen uns Zahlen Geschichten. So bedeutet auch das mittelhochdeutsche Wort „zal" noch sowohl Zahl als auch Erzählung. Die Bedeutungsverschiebung zur Exaktheit im Sinne von abzählen trat um 1400 mit der Lehnübersetzung aus dem Lateinischen auf.

In diesem Buch soll, auf der rationalen Seite der Zahlen, der Frage nachgegangen werden, was uns die Zahlen erzählen können und wie wir es besser verstehen lernen. Den Ausgangspunkt bilden dabei das alltägliche Leben genauso wie die uns umgebende Natur und Technik. Es wird Fragen nachgegangen wie

Wie groß ist die Gesamtmasse des Weltalls?
Wie schwer sind die Elektronen oder Neutrinos?
Wie stehen diese Werte in bezug zu Größen unseres alltäglichen Lebens?

Dabei reicht der Einzugsbereich der verwendeten Zahlen von der Wirtschaft, der Technik bis zu den spezialisierten Gebieten der Wissenschaft. Gerade auf den Querbezügen zwischen den verschiedenen Gebieten liegt ein Schwerpunkt. Er soll es auch ermöglichen, daß der Spezialist bei Zahlen aus anderen Gebieten Vergleichsbeispiele seines Gebietes findet. Das fördert den interdisziplinären Dialog und die Fähigkeit, den vernetzten Relationen unserer Welt geistig näher zu kommen.

Es kommt dabei oft gar nicht so sehr darauf an, wie groß die Zahlenwerte der einzelnen betrachteten Größen „exakt" sind, es genügen Größenordnungen, Richtwerte, bestehend aus einer gültigen Ziffer und der Zehnerpotenz. So ist die Reproduktionsgenauigkeit von lithographischen Halbleitern dadurch zu charakterisieren, daß Abbildungen auf 1 km millimetergenau übereinstimmen. Im täglichen Leben reicht uns meist diese Genauigkeit auf 100 m bezogen. Der Unterschied liegt also in der Größenordnung, weniger in der exakten Maßzahl. Warum dies so ist, wird in den Kapiteln 5 und 6 näher betrachtet.

Um die Geschichte zu verstehen, die uns die Zahlen erzählen, muß man ein wenig darüber wissen, wie man zu ihnen gekommen ist. Ursprünglich wurde alles in Länge und Zeit gemessen. Da die Maße aus dem täglichen Erlebnisbereich stammten (man denke an die territorial unterschiedlichen Längen des Maßes Elle oder Fuß, an die praktische Bedeutung des Flächenmaßes Morgen), mußten z.B. auch Längenangaben mit Hilfe von Zeitangaben gemacht werden (die Entfernung einer Tagesreise). Das war ein erster, auf der Erfahrung beruhender Querbezug zwischen Maßeinheiten. Heute gibt es, im Zuge der Entwicklung der Wissenschaften und der Technik, für die unterschiedlichsten Gebiete spezifische Maßeinheiten, deren Gültigkeit international vereinbart wurde. Das derzeitige Ende dieser Entwicklung stellt das *Système International d' Unités* (SI) dar. Es geht von sieben Basiseinheiten aus:

das Meter (m) für die Länge;
das Kilogramm (kg) für die Masse;
die Sekunde (s) für die Zeit;
das Ampere (A) für die elektrische Stromstärke;

das Kelvin (K) für die (thermodynamische) Temperatur;
das Candela (cd) für die Lichtstärke;
das Mol (mol) für die Stoffmenge.

Aus deren Kombination folgen dann ca. hundert spezifische, widerspruchsfreie Maßeinheiten. Diese Vereinheitlichung hat wesentlich zur Internationalität des Produkt- und Warenaustausches beigetragen. Auch für die Entwicklung der Wissenschaften ist diese Vereinheitlichung nicht zu unterschätzen, ist doch eines ihrer wichtigsten Prinzipien die Reproduzierbarkeit der erhaltenen Ergebnisse, was internationale Vergleichbarkeit voraussetzt. Im Kapitel 2 wird ein kurzer historischer Streifzug durch die Entwicklung des Zählens und Messens bis hin zu dieser internationalen Standardisierung gegeben.

Der Preis für diese Standardisierung und Vergleichbarkeit ist eine höhere Abstraktion der Maßeinheiten und damit ein Entfernen von den lebensweltlichen Erfahrungsbereichen. Das wird daran deutlich, daß man i.allg. mit der Angabe, daß ein neuer Klebstoff eine Zugfestigkeit von 50 000 N/m^2 hat, nicht viel anfangen kann. Erst der Vergleich mit der Zugfestigkeit von Stahl (etwa 10^9 N/m^2) macht die Leistung des Klebstoffherstellers deutlich. Es werden zum Vergleich Erfahrungswerte aus der täglichen Praxis benötigt, um die Bedeutung von Zahlen zu erkennen – letztlich um die Geschichte zu verstehen, die sie uns erzählen wollen. Diese Aufgabe wollen die 61 Skalen in Kapitel 3 – der Hauptteil des Buches – leisten. Sie zeigen einerseits die enorme Spannbreite der Zahlenwerte für einzelne Maßeinheiten. Auf der anderen Seite wird durch das Nebeneinanderstellen von Zahlenwerten gleicher Größenordnung aus unterschiedlichen Bereichen die Vergleichbarkeit mit individuellen Erfahrungswerten ermöglicht. Die ergänzenden Texte geben Informationen zur Definition der Maßeinheit, zum zugrundeliegenden physikalischen Phänomen und Meßprinzip, zu Fehlerbereichen, Extremwerten und zum Bezug zu anderen Einheiten der physikalischen Größe. Dabei wird auch auf historische Aspekte und auf das Vorkommen besonderer Zahlenwerte in Natur und Technik hingewiesen. Einige Einheiten, die im täglichen Leben durchaus in Gebrauch sind, wurden trotz ihrer Fremdheit gegenüber dem SI mit aufgenommen.

Da die Skalen einen umfangreichen Fundus aus nahezu allen Gebieten aus Naturwissenschaft, Technik und dem täglichen Leben enthalten, bekommt der Leser hier auch schnell zahlenhafte und anschauliche Vorstellungen zu allen Gegebenheiten und Grenzen der Welt in ihrer vielfachen Ausprägung. Dabei wurde bewußt kein Guiness-Buch der physikalisch-technischen Rekorde angestrebt. Im Mittelpunkt stehen die üblichen Werte, die uns im täglichen Leben begegnen und erfahrbar sind.

An das Kapitel 3 schließt eine Betrachtung der möglichen Verknüpfungen zwischen den betrachteten Einheiten auf der Basis der zugrundeliegenden Naturgesetze an. Dadurch werden fast alle bedeutsamen Maßeinheiten in den Zusammenhang eingeordnet. Auch hier werden z.T. SI-fremde Einheiten mit einbezogen.

Es folgen dann zwei etwas theoretischere Kapitel, die einmal den Zahlen selbst und zum anderen dem Weg zu den aus Zahl und Maßeinheit bestehenden Größen gewidmet sind. Hier wird die theoretische Grundlegung der Skalen aus Kapitel 3 noch einmal dargestellt.

Das siebente Kapitel soll dann den Bogen zum Ausgangspunkt zurückschlagen. Nachdem die Vielfalt der Zahlen dargestellt wurde, ihre Struktur und ihre Querbeziehungen aufgezeigt und die theoretischen Grundlagen der rationalen Verwendung der Zahlen dargestellt wurden, soll noch einmal über unseren Umgang mit ihnen und den Maßeinheiten nachgedacht werden.

Diese Sammlung wird wohl niemand wie einen Roman von Anfang bis Ende durchlesen oder wie ein gutes Lehrbuch systematisch durcharbeiten. Sie ist eher wie ein Lexikon zu nutzen und bei Interesse kann man die Kapitel als Kommentare kursorisch zu den Skalen lesen. Darum sind bewußt Wiederholungen eingebaut, um ein zu häufiges Verweisen zu vermeiden.

Dem Buch ging ein vieljähriges Sammeln von Daten voraus. Dabei mußten häufig sich widersprechende Daten bereinigt werden. Teilweise konnten Daten aus Skalen anderer Autoren einbezogen werden. Trotzdem ist nicht gesichert, daß alle Daten korrekt sind bzw. dem neuesten Stand der Erkenntnis entsprechen. Autoren und Verlag sind für kritische Hinweise dankbar.

Im Laufe der Jahre haben viele Personen zu diesem Buch beigetragen, ihnen kann hier nur global gedankt werden. Durch die Gestaltung der Skalen im Rechner war es möglich, bis zur Fertigstellung des Manuskripts Aktualisierungen der Daten vorzunehmen. Danken möchten wir dem Spektrum Akademischer Verlag für die Ausstattung des Buches und für seine Geduld in der Phase der Manuskripterstellung.

2 Von der Wahrnehmung zum Vergleich – Zählen und Messen

Bevor wir uns den vielfältigen Skalen zuwenden, wollen wir einen kleinen Exkurs in die Geschichte unternehmen. Wie ist es eigentlich zu unserem Zahlensystem gekommen, mit dem wir unvorstellbar kleine und unvorstellbar große Anzahlen von Objekten oder Größen kennzeichnen können? Gibt es ein abstraktes Zahlgefühl des Menschen? Diese Fragen berühren auch die Grundlagen der Mathematik.

Und wie ist es mit den Maßsystemen, wie haben diese sich herausgebildet? Heute sind die Definitionen der einzelnen Maßeinheiten abstrakt und haben i.allg. keinen Bezug zum täglichen Leben der Menschen. Welchen Weg haben sie dabei zurückgelegt? Was waren Anlässe für die Herausbildung und die Weiterentwicklung von Maßsystemen?

Dies alles sind Fragen, denen in umfangreichen historischen Studien schon nachgegangen wurde. Wir wollen hier nur einen kurzen Abriß geben, um den Leser auf das folgende Kapitel einzustimmen. Gleichzeitig wollen wir zeigen, daß die heute so fremd erscheinenden Maßeinheiten ihren Ursprung im täglichen Leben der Menschen hatten.

2.1 Von der Menge zur Zahl

Zählen ist uns heutigen Menschen eine vertraute Tätigkeit, man könnte vermuten, daß wir dies instinktiv tun. Weil das Zählen bei den unterschiedlichsten Tätigkeiten der Menschen notwendig ist – sei es beim Landbau, beim Handel oder beim Schutz vor Diebstahl des Eigentums –, dürfte es in den primitiven Kulturen immer wieder erfunden worden sein.

Es stellt sich aber heraus, daß viele einfache Kulturen entweder gar kein Gefühl für das Zählen besitzen oder nicht über zwei hinaus zählen können. Dem steht scheinbar die Tatsache entgegen, daß es Tiere gibt, die aus einer einigermaßen kleinen Anzahl das Fehlen eines Jungtieres oder eines Nahrungsmittels bemerken. Es werden dabei anscheinend zwei Mengen in der Art und Weise verglichen, daß jeder Unterschied auffällt. Wird dieser Vorgang des Vergleichens im Kopf immer organisierter, so ist einmal der größte Schritt möglich – der von allen konkreten Mengen losgelöste abstrakte Zahlbegriff. Dieser Schritt wird aber damit erkauft, daß für große Zahlen das Gefühl für die durch sie charakterisierte Größe einer Menge verlorengeht. Wir können zwar mit unserem ererbten Zahlensystem beliebig große Zahlen aufschreiben, aber wer kann sich schon 40000 Menschen oder 45000000000 Mark vorstellen. Doch kehren wir noch einmal zu den Wurzeln zurück.

Die Anforderung des täglichen Lebens bestand darin, Mengen zu vergleichen. Bei solche Fragen wie „Wer hat die größere Viehherde?" war das noch relativ leicht, da man im direkten Vergleich jedem Tier der einen Herde ein Tier der anderen Herde zuordnen konnte. Hatte die eine Herde keine Tiere zum Zuordnen mehr, war sie die kleinere. Schwieriger wurde es schon, wenn ein Hirte wissen wollte, ob seine Herde am Abend noch genauso groß war wie am Vormittag, als er auf die Weide zog. Dazu mußte er sich Vergleichsmengen schaffen, z.B. Steinhaufen. Er legte früh für jedes Tier, das den Stall verließ einen Stein auf einen Haufen. Kam er abends zurück, nahm er für jedes Tier, das in den Stall ging einen Stein vom Haufen weg. War der Haufen verschwunden, wenn alle Tiere im Stall waren, so fehlte keines. Diese Verfahren waren alle entweder auf den direkten Vergleich oder auf den Vergleich mit Ersatzmengen angewiesen. Sie konnten keine Auskunft über die Anzahl der betreffenden Objekte machen. Wir erhalten also auf dieser Entwicklungsstufe immer nur Relationen zwischen betrachteten Mengen.

Ein nächster interessanter Schritt ist die Verwendung der Finger und Zehen des Menschen als Zählmarken. Sie sind über alle kulturellen Grenzen hinaus gleich und immer verfügbar. Die Reihenfolge der Verwendung der Finger und Zehen beim Zählen war festgelegt. Indem damit nun jedem Finger (und jedem Zeh, es gab sogar Kulturen, die so viele Punkte des Körpers belegten, daß sie bis zur 33 kamen) eine bestimmte Zahl zugeordnet wurde, konnte mit diesem System der Übergang von den Kardinal- zu den Ordinalzahlen[1] erfolgen. Sucht man in den Sprachen alter Kulturen nach der Bedeutung der Zahlwörter, so stellt sich ein enger Bezug zu den zugeordneten Körperteilen dar. Am längsten gehalten und am weitesten verbreitet hat sich das Zählen mit den Fingern. Das hängt auch damit zusammen, daß in bestimmten Regionen durch Klima und Mode bedingt die Zehen nicht ständig zum Zählen zur Verfügung standen (Schuhe). Außerdem war die Einbeziehung zu vieler Körperteile unbequem, die Finger sind leicht in Augenhöhe zu halten. In Europa war das Zählen mit den Fingern bis ins 16. Jahrhundert verbreitet. Die berühmteste erhaltene Darstellung der „Theorie" des Fingerzählens im frühen Europa ist die des 735 verstorbenen englischen Benediktinermönches Beda Venerabilis. Er kommt durch unterschiedliche Anordnung der Finger bis zur Zahl 9 000. Indem er dann Gesten verwendet, bei denen die Finger auf jeweils andere Körperteile gelegt werden, gelangt er zu Vielfachen von Hunderttausend. Eine spätere Abbildung des Schemas von Beda zeigt Abbildung 2.1. Heute findet man solche Nuancen der Handzeichen wohl nur noch bei Buchmachern auf Rennplätzen, wo genaue numerische Informationen in Situationen vermittelt werden müssen, in denen eine mündliche Verständigung erschwert oder mißverständlich sein kann. In der Zeichensprache der Taubstummen gibt es für die Ziffern 0 bis 9 bestimmte Zeichen. Die nächst größere Einheit (10) wird durch ein spezielles Zeichen dargestellt, wobei nun diese Einheit wieder wie im Dezimalsystem gezählt wird (20 ist das Zeichen für

[1] Es sei an den Unterschied zwischen Kardinal- und Ordinalzahlen erinnert. Der kardinale Aspekt bezieht sich auf die Gesamtzahl einer Menge von Objekten, der ordinale auf die Anordnung der Objekte dieser Menge, wie z.B. „erster", „zweiter" usw. Wir verwenden i.allg. für beide Aspekte dasselbe Symbol. Steht auf einer Packung Computerdisketten eine „10", so ist klar, daß sie zehn Disketten enthält (kardinaler Aspekt). Erhalte ich dagegen eine Parkkarte mit einer „10", so weiß ich, daß ich den 10. Platz in der Parketage habe (ordinaler Aspekt). Nur wenn der ordinale Aspekt hervorgehoben werden soll, wird üblicherweise hinter die Zahl ein Punkt gesetzt: „10." heißt der „Zehnte".

für Zwei verbunden mit dem Zeichen für die neue Einheit). Größere Zahlen werden dann entsprechend dem Stellenwertsystem (siehe weiter unten) gefingert.

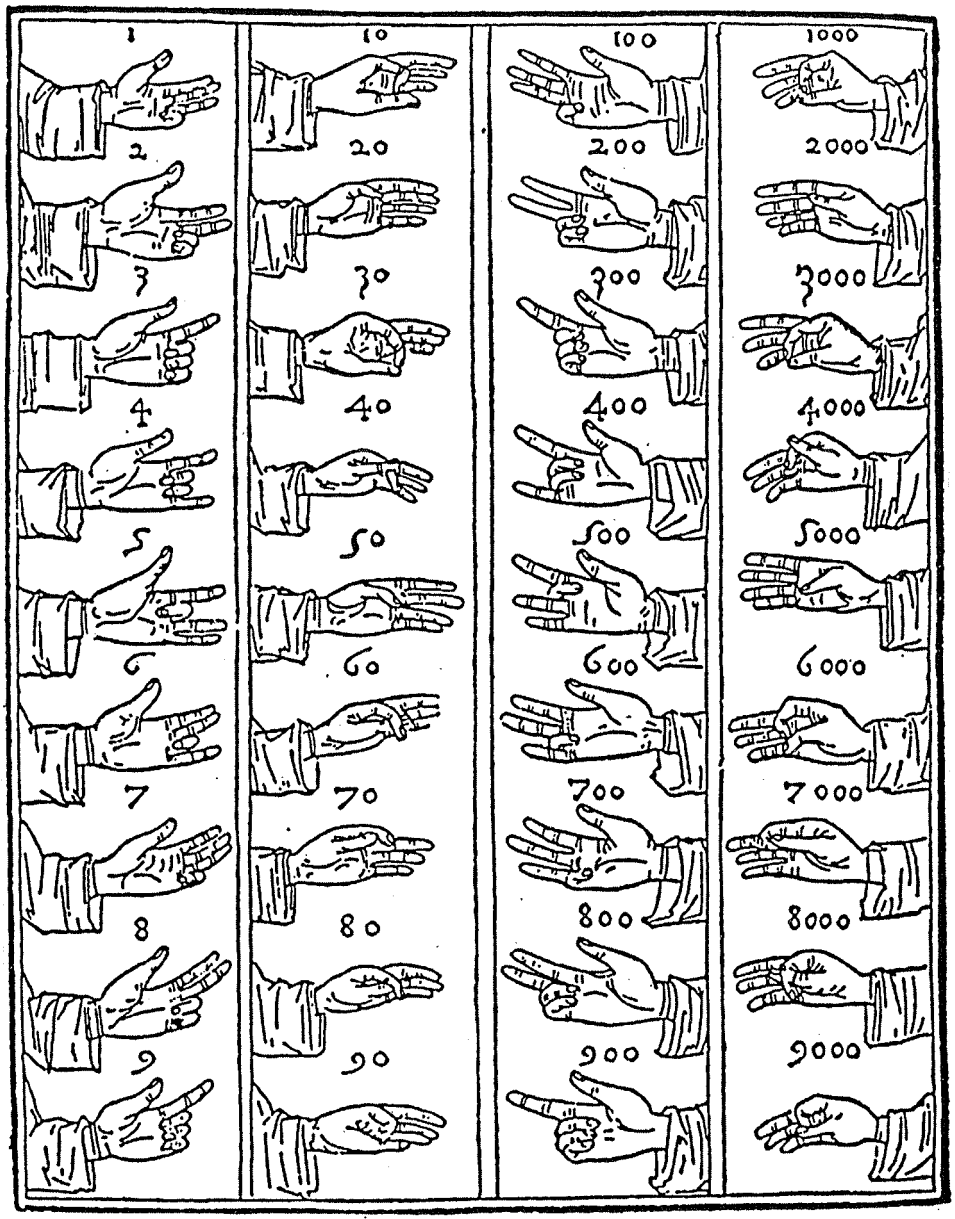


Abb. 2.1
Die Abbildung aus der Summa de Arithmetica des Luca Pacioli zeigt das von Beda Venerabilis entwikkelte System des Zählens mit den Fingern. Diese Zeichnung entstand etwa 800 Jahre nach Beda in Venedig und wurde dort veröffentlicht (nach Barrow 1994).

Das Zählen mit den Fingern fasziniert auch heute noch, weil es automatisch dazu führt, daß man ein Zählen zu einer Basis (die Finger einer Hand) nutzt. Zählt ein Hirte die Anzahl seiner Schafe mit der rechten Hand, so kann er nach fünf Tieren an der linken Hand einen Finger für diese „volle Hand" herausstrecken und mit der rechten Hand wieder von vorne beginnen. Hat er am Ende an der linken Hand drei Finger und an der rechten zwei herausgestreckt, so besitzt er „drei volle Hände und zwei" Schafe, was zur Gesamtzahl 17 ($3 \cdot 5 + 2 = 17$) führt. Die Basis dieses Zahlsystems ist die 5. Unser heutiges Dezimalsystem hat die Basis 10, eine sehr weit verbreitet Wahl, da man 10 Finger zur Verfügung hat, bis man die Menge der übergeordneten Einheiten zählen muß. Schaut man sich die Zivilisationen und Stammeskulturen der früheren Zeiten an, so findet man Zahlsysteme, die sich auf die Basis 2, 5, 10, 20 und 60 zurückführen lassen.

Das Zählen in Paaren (Basis 2) dürfte wohl das einfachste System sein. Es wurde aber in fast allen Kulturen durch andere Zählsysteme ersetzt. Die Systeme zu den Basen 5, 10, 20 werden durch das oben behandelte Zählen mit den Fingern (und Zehen) nahegelegt. Ohne hier die weitere Entwicklung der Zahlsysteme im einzelnen nachzeichnen zu wollen, soll noch ein Blick auf zwei offensichtlich aus der Reihe fallende System geworfen werden, die mit der Basis 60 und 12.

Die Sumerer, die in Mesopotamien ein ausgedehntes Reich mit hoher Kultur geschaffen hatten, entwickelten um 2400 v.Chr. ein Zahlsystem mit der Basis 60. Dies ist durch erhaltene Keilschrifttafeln (die Sumerer drückten ihre Schriftzeichen mit einem Griffel in feuchten Ton) belegt. Dabei überrascht, daß die Sumerer entsprechend ihrer mündlichen Zähltradition zuerst in Schritten von 5, 10, 20 bis zu 50 zählten. Ver gleicht man die den Zahlen entsprechend zugeordneten Zahlwörter, so fällt auf, daß 600 eine neue Einheit ist, mit der die größeren Zahlen angegeben werden. Die 600 selbst wird durch die 10 und 60 dargestellt. Eine systematische Zerlegung der sumeri schen Zahlen zeigt dann, daß ihr System aus den zwei komplementären Basen 10 und 60 aufgebaut ist. Die herausgehobene Stellung der 60 liegt vermutlich darin begründet, daß sie durch viele Zahlen (2, 3, 4, 5) teilbar ist. Interessant ist, daß die Sumerer etwa 100 Jahre später neben ihrem Mondkalender mit 354 Tagen noch ein 360 Tage dauerndes Sonnenjahr einführten (zum Ausgleich der Differenz mit dem natürlichen Gang der Sonne enthielt es alle 8 Jahre einen zusätzlichen Schaltmonat). Noch heute finden sich Reste dieses Systems in unserem Maßsystem. So sind im Winkelmaß 60 Bogensekunden eine Minute, 60 Minuten ein Grad und 360 Grad der Vollkreis. Auch teilen wir die Stunde in 60 Minuten, diese in 60 Sekunden (was damit zu tun hat, daß der Minutenzeiger für eine Stunde einen Vollkreis beschreibt). Danach beginnt interessanterweise die Dezimalteilung (da diese genauere Zeitmessung erst viel später möglich war, als sich das Dezimalsystem schon durchgesetzt hatte). Der historische Weg zum Erhalt dieser Elemente des 60er Systems führte dabei von den Sumerern über die Babylonier zu den Griechen, von denen wir diese Einteilung übernommen haben.

Obwohl die Zahlsysteme mit der Basis 12 in der Geschichte keinen Bestand hatten, finden wir heute noch Reste solcher Systeme im täglichen Leben. So wird eine Menge von 12 Objekten als „Dutzend" bezeichnet, eine solche mit 60 Objekten heißt „Schock". Manche Güter wie Eier oder Bestecke werden noch heute in 12er Packungen verkauft. Das Zwölfersystem war in der Geschäftswelt weit verbreitet. In England sagt

man noch heute „Gros" für 12 Dutzend, was sich aus dem französischen „grosse Douzaine", „starkes Dutzend" ableitet. Die sogenannten imperialen Maßeinheiten hatten ebenfalls die 12 zur Basis:

- 1 Shilling = 12 Pence in der alten britischen Währung des Pfund Sterling;
- 12 Zoll = 1 Fuß;
- das alte britische Pfund hatte 12 Unzen (heute 16).

Diese Beständigkeit beruht u.a. auf einem sehr praktischen Aspekt des 12er-Systems. In ihm lassen sich Größen problemlos dritteln, vierteln, halbieren (Teiler von 12 sind 2, 3, 4 und 6), ohne daß man Brüche benötigt (was im Zehnersystem mit den Teilern 2 und 5 nicht geht). Dies ist im Handel, wenn man mit dem Messen und Wägen zu tun hat, ein großer Vorteil. Will man hingegen nur Mengen abzählen, fällt dieser Vorteil nicht ins Gewicht.

Unser Zehner- oder Dezimalsystem, welches heute in der Welt am weitesten verbreitet ist, stellt einen glücklichen Kompromiß der in der geschichtlichen Entwicklung vorfindbaren vorhandenen Zahlsysteme dar. Einerseits leitet sich die Grundzahl 10 von der systemlosen Fingerzählung her. Andererseits ist 10 eine sozusagen handliche Größe (im Vergleich zu 5 oder 20). Wählt man eine zu große Basis, braucht man zu viele einzelne Zählmarken (Zahlwörter), ist die Basis zu klein, wird das System nicht sehr leistungsfähig, weil man zu viele verschiedene Zusammensetzungen benötigt. Das reine Dezimalsystem weist noch eine angenehme Symmetrie auf. Beginnen wir mit dem Zählen bei Eins, so ist die Zehn eine neue Einheit. Vielfache dieser Einheit werden wieder nach demselben System gezählt, bis zehn von ihnen voll sind, die dann eine neue Einheit definieren – Hundert usw. Aufgrund verschiedener, u.a. auch philologischer (es lassen sich viele Ähnlichkeiten der Zahlwörter in den indoeuropäischen Sprachen nachweisen) Untersuchungen wird die Hypothese gestützt, daß sich die Zahlsysteme von fortgeschrittenen kulturellen Zentren zu den primitiveren hin ausbreiten, wenn diese beginnen, Handel zu treiben. Sie lernen dann die Vorteile des raffinierteren Systems der wohlhabenderen Nachbarn kennen und schätzen. So konnte sich die fortgeschrittenere Sprachkultur mit dem in ihr enthaltenen Zahlsystem immer weiter ausbreiten.

Ein wichtiger Entwicklungsschritt für die praktische Nutzung von Zahlsystemen war die Einführung eines Stellenwertsystems. Man versteht darunter eine Schreibweise, die einzelnen Zeichen je nach ihrem Standort bestimmte Werte zuschreibt. Die Ziffernfolge 123 bedeutet in unserem Dezimalsystem $1 \cdot 100 + 2 \cdot 10 + 3$ (die Stellenwerte sind von rechts nach links gelesen „Einer", „Zehner", „Hunderter"). Mit den gleichen Ziffern geschriebene Reihenfolge 213 hat einen anderen Wert ($2 \cdot 100 + 1 \cdot 10 + 3$). Diese Stellenwertschreibung wurde von Mathematikern und Astronomen am Königshof in Babylon um 2000 v.Chr. entwickelt. Nicht nur die dadurch mögliche Schreibweise beliebig großer Zahlen wurde einfach, auch das Rechnen wurde bequem. Wir erinnern uns alle sicherlich, wie wir in der Schule zum Addieren mehrerer Zahlen diese entsprechend den Stellenwerten untereinandergeschrieben haben und dann leicht addieren konnten. Auch Multiplikation und Division wird durch diese Schreibweise sehr erleichtert. Damit war auch ein wichtiger Schritt für die weitere Entwicklung der

Mathematik getan. In Abbildung 2.2 sind die verschiedenen Zahlsysteme symbolisch zusammengefaßt.

In symbolischer Schreibweise lassen sich historische Zahlsysteme mit der Grundzahl B in drei Grundformen einteilen. Ein *additives* Ziffernsystem von Symbolen, wie das im alten Ägypten und frühen Griechenland verwendete, benutzt verschiedene Symbole zur Bezeichnung der Zahlen

1, 2, 3, ..., B–1, B, $2B$, $3B$, ... , $B(B–1)$, B^2, $2B^2$, $3B^2$ ... $B^2(B–1)$, ... etc.

Ein *multiplikatives* System, wie es die Chinesen verwendeten, ist sparsamer und braucht nur für die Zahlen

1, 2, 3, ... $(B–1)$, B, B^2, B^3, ...

eigene Symbole.

Das von den Indern entwickelte *Stellenwertsystem* ist noch sparsamer und kommt mit nur B verschiedenen Symbolen aus (darunter ist die Null):

0, 1,2,3, ... $(B–1)$.

Jede Zahl N läßt sich durch die Formel

$N = a_nB^n + a_{n-1}B^{n-1} + ... + a_2B^2 + a_1B + a_0$

ausdrücken und in einem Stellenwertsystem einfach als die Zahlenreihe

$a_n a_{n-1} ... a_2 a_1 a_0$

schreiben.

Abb. 2.2
Die symbolische Zusammenfassung verschiedenartiger Zahlsysteme (nach Barrow 1994)

Ein Problem bestand noch darin, wie mit nicht besetzten Stellen umgegangen werden sollte. Die verschiedenen Entwicklungen zur Einführung der Null sollen hier nicht im einzelnen nachgezeichnet werden. Am erfolgreichsten war das Stellenwertsystem indischen Ursprungs, weil es vier vorteilhafte Eigenschaften vereint:

- es hatte eindeutige Symbole für die Zahlen 1 bis 9, die abstrakt waren und keine bildliche Information über ihre Bedeutung vermitteln mußten;
- es war ein durchgehendes Dezimalsystem;
- es war ein Stellenwertsystem;
- es hatte eine Null.

Barrow (1994) bezeichnet das indische Zahlsystem deshalb als die erfolgreichste intellektuelle Neuerung auf unserem Planeten. Immer wieder wurde es bei Begegnungen mit diesem System übernommen. So durch die Chinesen im 8. Jahrhundert. Das Judentum lernte das System durch den reisenden gelehrten Rabbi Abraham Ben Ezra im 12. Jahrhundert kennen. Die arabischen Kulturen, die eine hochentwickelte arith-

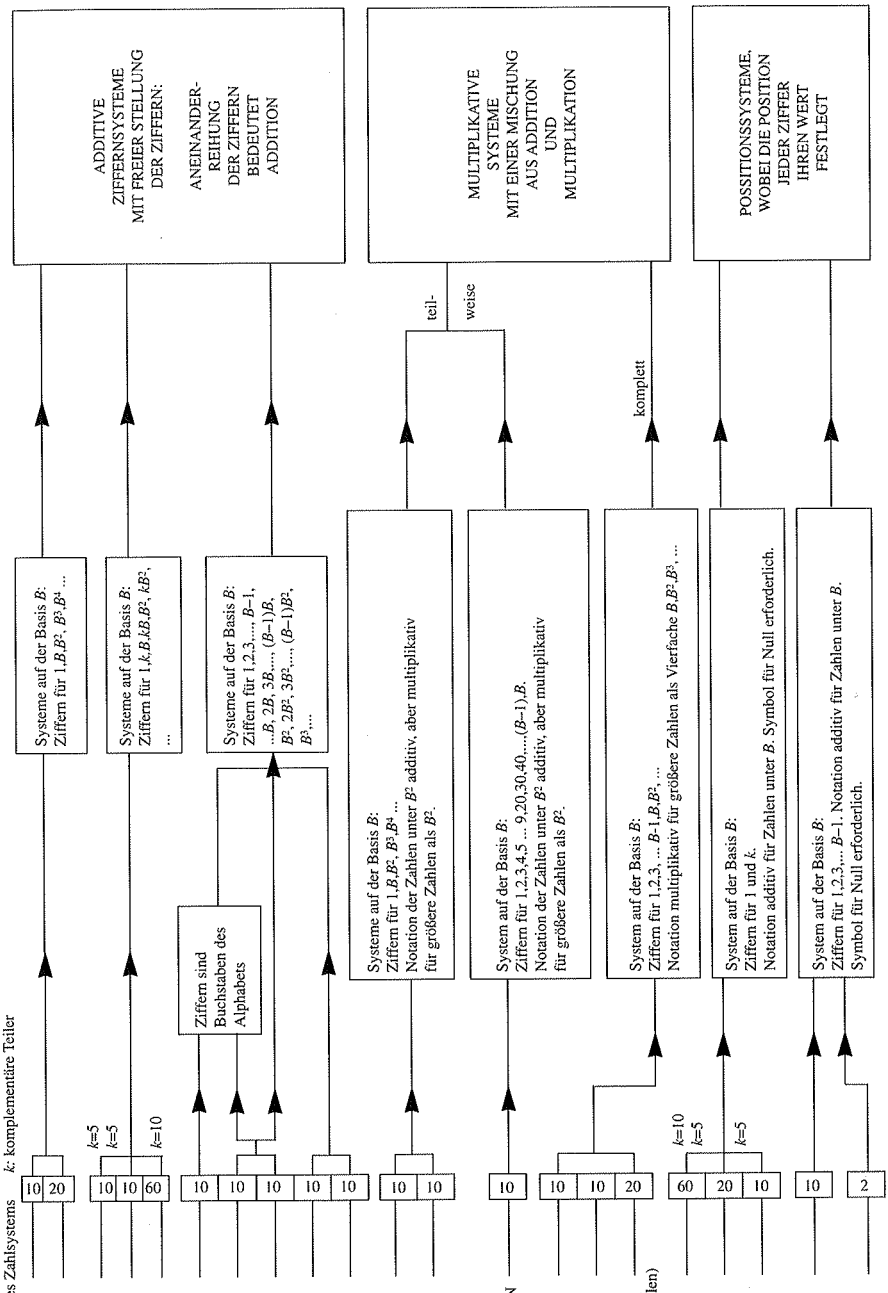


Abb. 2.3
Entwicklung geschriebener Zählsysteme und ihre Beziehungen untereinander (nach Barrow 1994)

metische Tradition hatten, veränderten ihre Zahlzeichen nach Begegnung mit dem indischen System allmählich. Trotz der im Arabischen üblichen Schreibweise von rechts nach links, wurde die indische Schreibweise der Zahlen von links nach rechts beibehalten. Die Ausbreitung des indo-arabischen Zählsystems in Europa wird i.allg. dem Einfluß des französischen Gelehrten Gerbert von Aurillac (945–1003), dem späteren Papst Sylvester II. zugeschrieben. Im 13. Jahrhundert war das indo-arabische Zahlsystem in Handel und Wirtschaft Europas verbreitet. Es gab aber auch Widerstände. So war in Florenz vorgeschrieben, in Verträgen und Dokumenten nur römische Zahlzeichen zu verwenden. Das hatte auch praktische Gründe. Mit den römischen Zahlzeichen wurden Zahlen so geschrieben, daß sie fälschungssicher waren. Ein beliebiges Hinzufügen eines Zeichens gibt in diesem System meist keine sinnvolle Kombination. Erst in der 2. Hälfte des 16. Jahrhunderts nutzte die Mehrzahl der Kaufleute Nordeuropas das indo-arabische System. Damit hatte eine wichtige Etappe der kulturellen Entwicklung der Menschheit, die Herausbildung eines universellen Zählsystems, ihren erfolgreichen Abschluß gefunden. Die Abbildung 2.3 gibt noch einmal einen Überblick über die Entwicklung der geschriebenen Zählsysteme und ihrer Beziehungen untereinander.

Nicht betrachtet wurden an dieser Stelle die Einflüsse der herrschenden Religionen auf die Entwicklung von Zählsystemen. Die aus der religiösen Praxis resultierenden Anforderungen (z.B. Erhalt von Proportionen bei der Vergrößerung heiliger Gegenstände oder Bilder) mußten i. allg. über Zählverfahren als einfachste mathematische Operation befriedigt werden. Dies hat wichtige Impulse zur Vervollkommnung der Zahlsysteme und ihrer Struktur geliefert, die aber in den geschilderten Entwicklungsstrom einmündeten bzw. parallel liefen.

2.2 Vom Vergleich zur Maßeinheit

Mit der Herausbildung eines leistungsfähigen Zählsystems war es möglich geworden, die Menge von diskreten Objekten anzugeben und mit diesen Mengen unabhängig von ihrer gegenständlichen Existenz zu operieren. Doch sowohl der Handel wie auch die Religionen hatten es auch mit kontinuierlichen (bzw. quasikontinuierlichen) Objekten (z.B. Flüssigkeiten, Getreidekörner, Flächen) zu tun. Während die diskreten Objekte (z.B. Vieh) selbst ihre Basiseinheit darstellten, mußten für die kontinuierlichen „künstliche" geschaffen werden. Das führt uns zu dem Problem der Maße. Ursprünglich wurden darunter die Einheiten für die Länge, die Fläche, das Volumen und das Gewicht (oder Masse – eine Unterscheidung war damals noch nicht möglich) verstanden. Diese Größen spielten beim Handel, im Bauwesen und bei der Landvermessung eine wichtige Rolle. Diese Bereiche des gesellschaftlichen Lebens wurden vom Staat schon frühzeitig beaufsichtigt, das gesamte gesetzlich geregelte und staatlich beaufsichtigte Meßwesen wurde oft unter „Maß und Gewicht" zusammengefaßt. Eine etwas gesonderte Rolle spielte die Zeitmessung. Sie hat ihren Ursprung im Kalenderwesen, das i.allg. durch die herrschende Religion verwaltet wurde (wenn ihm auch praktische Erfordernisse zugrunde liegen konnten, wie bei der Bestimmung des Zeitpunkts der

Nilüberschwemmungen in Ägypten). Man denke nur an die Rolle der katholischen Kirche bei der Einführung des heute allgemein üblichen Gregorianischen Kalenders.

In vorgeschichtlicher Zeit begann das „Meßwesen" mit der Zeitbestimmung und der Wegmessung. Die Zeit wurde aus der Beobachtung der Höhe des Sonnenstandes ermittelt. Dazu bediente man sich der Länge des Schattenwurfs eines Gegenstandes und seiner Richtung. In einem dreitausend Jahre alten ägyptischen Papyrus findet sich z.B. die Textstelle: „Wenn dein Schatten 16 Fuß mißt, Berenike, erwartet Amasis dich im Olivenhain ..." Später hatte man als Schattenspender einen speziellen Stab, den die Griechen Gnomon nannten. Ab wann und wo begonnen wurde, diesen Schatten zu messen, ist nicht bekennt. Sicher ist nur, daß die Chinesen um 300 v.Chr. dazu schon spezielle Maßstäbe verwandten. Die Verbindung dieser Tageszeitmessung mit dem Jahreslauf und den astronomischen Beobachtungen führte dann zum Kalenderwesen.

Die ersten Längenmaße wurden von Körpermaßen des Menschen (Manneslänge, Hand- und Fingerbreite, Elle, Klafter [Strecke zwischen den ausgebreiteten Armen eines Erwachsenen]) und seinem Leistungsvermögen (Wegstunde, Tagesmarsch) abgeleitet.

Diese Maße hatten den Nachteil, je nach der Individualität der Menschen sehr verschieden auszufallen. Für den Handel und vor allem für die zu entrichtenden Abgaben an den Herrscher eines Staates waren aber vergleichbare Maße notwendig. So wurden diese i. allg. von den Maßen des Herrschers abgeleitet und von diesem festgelegt. Die älteste bekannte Längeneinheit ist der auf der Statue des Fürsten Gudea von Lagasch (um 2100 v.Chr. in Babylon) angegebene Fuß mit einer Länge von 26,45 cm. Er ist in 16 Fingerbreiten eingeteilt. Ein weiteres überliefertes Standardmaß ist die sogenannte „Nippur-Elle" (um 1950 v. Chr.), ein Kupferbarren mit einer Länge von 110,35 cm und einer Masse von 41,4 kg. Auf ihm sind verschiedene Maßeinteilungen vorhanden. Der gesamte Stab stellt eine Doppelelle dar. Weitere Einteilungen sind Fuß, Zoll (Fingerbreite), Hand sowie das Ziegel-Maß zu 19 Fingerbreiten. Die Abbildung 2.4 veranschaulicht die Verhältnisse.

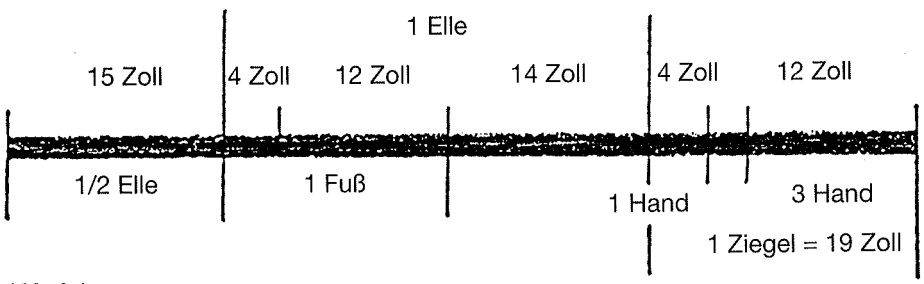


Abb. 2.4
Das Einteilungsschema der Nippur-Elle

Die ältesten Normale für die Masse (Wägestücke) waren aus Steinen mit Handgriffen oder in Form heiliger Tiere hergestellt. In Babylonien wurde um 2350 v.Chr. die Mine mit 477 g benutzt. Im 8. Jahrhundert v. Chr. gab es im gesamten assyrisch-babylonischen Reichsgebiet die leichte Mine mit 205 g für den Handel und die schwere Mine mit der doppelten Masse für die Abgaben an Könige und Priester. Im 6. bis 5.

Jahrhundert v. Chr. gab es noch eine recht große Einheit, das Talent. Es hatte ca. 32, ca. 28 oder ca. 24 kg, je nach der Füllung des würfelförmigen Hohlmaßes mit der Kantenlänge eines assyrischen Fußes (32 cm) mit Wasser, Öl oder Gerste. Die Normale dieser Maße wurden in den Tempeln aufbewahrt und standen somit unter göttlichem Schutz.

Die babylonischen Maße bildeten in der Folgezeit die Grundlage für die in den Staaten des Mittelmeerraumes entstehenden Maßsysteme.

Das Römische Reich verfügte zur Kaiserzeit zur Sicherung einheitlicher Maße und Gewichte in seinem Riesenreich über ein enges Netz von Stützpunkten für Normalmaße. Die genauesten Vergleichsmaße befanden sich in Rom auf dem Kapitol. Jede Legion erhielt Kopien und gab an die Kohorten Gebrauchsmaße weiter, mittels derer die Meßgeräte der Händler und Handwerker verglichen wurden. Dieser Zustand einheitlicher Maße und Gewichte konnte erst mehr als tausend Jahre später wieder erreicht werden.

Grundlagen des römischen Maßsystems waren die Libra und die Uncia, sie waren sowohl Gewichts- als auch Volumeneinheit. Als Hohlmaße waren sie fest bestimmt und unveränderlich. Die Werte als Gewichtsmaß ergaben sich je nach den Stoffen (Getreide, Öl oder Wein), die ein Hohlmaß füllten. Indem später oft unberücksichtigt blieb, daß die Römer als Normalfüllung zur Festlegung der Gewichtseinheit eine Ölfüllung benutzten, entstanden in vielen Städten von der Norm abweichende Gewichtseinheiten.

Die Grundlage des römischen Längenmaßes war der römische Fuß, Pes monetalis, mit einer Länge von 29,617 cm. Er war sowohl in 16 Digiti (Finger) von 1,851 cm Länge, als auch in 12 Unciae (Zoll) von 2,468 cm Länge unterteilt.

Mit dem Untergang des Römischen Reiches brach auch sein kontrolliertes Meßwesen zusammen. Im Jahre 789 schrieb Karl der Große die Benutzung gleicher Längenmaße und Gewichte im fränkischen Reich vor. Mit der Verleihung des Marktrechtes an die aufblühenden Städte ging auch die Aufsicht über die Maße und Gewichte auf sie über. Damit entstand eine große Vielfalt der verwendeten Maße, die durch die politische Zersplitterung Europas noch gefestigt wurde. So wurden in Deutschland bis zur Einführung des Meter Ellen von 55 bis 83 cm Länge benutzt. Der Scheffel als Hohlmaß schwankte zwischen 23 und 200 Liter. Noch im Jahre 1810 gab es in Baden 112 verschiedene Ellen, 92 Flächeneinheiten, 65 Hohlmaße, 163 Getreidemaße und 80 Pfunde. In der bedeutenden Handelsstadt Frankfurt am Main galten im 19. Jahrhundert gleichzeitig:

- Mark- oder Silbergewicht, zugleich Münzgewicht und Gewicht für unverarbeitetes Gold;
- Kronengewicht für verarbeitetes Gold;
- Dukatengewicht, für unverarbeitetes Gold mit dem Feingehalt von Dukaten;
- Leichtes Handelsgewicht;
- Schweres Handelsgewicht;
- Spezereigewicht der Stadtwaage;
- Speckgewicht der Stadtwaage, für Würste, Schinken, anderes Rauchfleisch etc.;
- Heugewicht;

- Mehl- und Malzgewicht;
- Wollwaagegewicht;
- Butter- und Fleischgewicht;
- Fischgewicht für frische Fische;
- Medizinal- oder Apothekergewicht;
- Juwelengewicht.

Das waren 14 gleichzeitig geltende Gewichtsarten in einer Stadt!

England hatte im Jahre 1215 neuzeitliche Standardmaße gesetzlich festgelegt. Als jedoch am 16.10.1834 das Gebäude des britischen Parlaments abbrannte, wurden die englische Urelle und das Urpfund vernichtet.

In Frankreich diente im 17. Jahrhundert die Toise du Châtelet in Paris als wichtigste Längeneinheit. Sie war ein eiserner Normalmaßstab mit zwei Vorsprüngen. Die Gesamtlänge betrug 1,95 m, diese war in 6 Fuß zu je 12 Zoll zu je 12 Linien geteilt.

Am 26. März 1791 beschloß der französische Nationalkonvent, das Meter als gesetzliche Längeneinheit einzuführen. Die Einheit sollte der zehnmillionste (10^7te) Teil der Länge eines Erdmeridians zwischen Nordpol und Äquator sein. Dazu sollte der Meridianbogen zwischen Dünkirchen und Barcelona vermessen werden. Als weitere Einheiten wurden das Ar als Flächeneinheit für Flurstücke (gleich einem Quadrat der Seitenlänge 10 m), das Ster als Raummaß für geschichtetes Brennholz (gleich 1 m^3), das Liter als Volumeneinheit für Flüssigkeiten und Schüttstoffe (gleich 1 dm^3) und das Gramm als Masseeinheit (gleich der Masse von 1cm^3 reinem Wasser bei der Temperatur des Eispunktes) festgelegt. Diese Einheiten konnten dezimal unterteilt und vervielfacht werden. Damals wurde auch die noch heute gültige Benennung der Unterteilungen bzw. Vervielfachungen durch griechische Vorsatzwörter eingeführt. Noch vor Beendigung der Gradmessung wurde das metrische Maßsystem per Gesetz vom 7. April 1795 eingeführt. Als Verkörperung des Meter und des Kilogramm dienten von Fortin aus Platinschwamm hergestellte Prototype: ein Endmaß von 25,3 mm × 4 mm Querschnitt und ein Zylinder von je 39 mm Durchmesser und Höhe. Sie wurden im französischen Staatsarchiv aufbewahrt und daher als mètre des archives und kilogramme des archives (populär als Urmeter und Urkilogramm) bezeichnet.

Aufgrund des Scheiterns der französischen Revolution konnte sich das metrische System in Frankreich erst 1840 durchsetzen. Vorher hatten schon die Niederlande (1816), Belgien (1816), Luxemburg (1816) und Griechenland (1836) das metrische System eingeführt. Es folgten 1859 Spanien und 1863 Italien. In Deutschland wurde 1868 durch die Maß- und Gewichtsordnung des Norddeutschen Bundes das Meter eingeführt. Diese Ordnung wurde durch Gesetz vom 16. April 1871 zum Reichsgesetz erhoben. In Österreich wurde das metrische System am 1. Januar 1876 obligatorisch eingeführt, die Schweiz folgte 1877. Obwohl in Großbritannien seit 1897 neben dem britischen auch das metrische System zugelassen war, ist erst seit 1.10.1995 im Zuge der europäischen Harmonisierung die Verwendung der metrischen Maße Pflicht. Für lose und flüssige Ware gilt noch eine Frist bis 1.1.2000 für das alte Maßsystem. Bestehen bleiben wird als Ausnahmeregelung das Maß Pint für das Bier im Pub und die nach Hause gelieferte Milch.

Zur Förderung und Vervollkommnung des metrischen Systems wurde am 20. Mai 1875 zwischen 17 Staaten die Internationale Meterkonvention abgeschlossen. Vertreter der Mitgliedsstaaten treten mindestens alle 6 Jahre zur Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) zusammen.

Die 9. Generalkonferenz beauftragte 1948 das Internationale Komitee für Maß und Gewicht „... die Schaffung einer vollständigen Neuordnung der Einheiten im Meßwesen zu prüfen, die darüber in Kreisen der Wissenschaft, der Technik und des Unterrichts aller Länder herrschenden Vorstellungen durch eine offizielle Umfrage in Erfahrung zu bringen und Empfehlungen über die Einführung eines praktischen Einheitensystems vorzubereiten, das zur Annahme durch alle Signatarstaaten der Meterkonvention geeignet ist."

Die 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht 1960 nahm den Namen Internationales Einheitensystem (Système International d'Unités) mit dem Symbol SI an. Sie gab Regeln für die Anwendung der Vorsätze, für die abgeleiteten Einheiten und Hinweise für den Gebrauch. Damit war eine Gesamtregelung für Einheiten im Meßwesen eingeführt.

Mit dem „Gesetz über Einheiten im Meßwesen" vom 2. Juli 1969 in der Fassung vom 22. Februar 1985 war dem SI in der Bundesrepublik Deutschland die gesetzliche Grundlage gegeben.

Damit war ein Maßsystem geschaffen, das im internationalen Rahmen die wichtigsten Forderungen an ein Maßsystem:

- Auswahl und Unveränderlichkeit der Maßeinheit,
- Einfachheit des Systems,
- Bequemlichkeit für den Gebrauch,
- leichte Wiederbeschaffbarkeit bei Verlust

auf einem hohen Standard erfüllt. Diese Forderungen hatten sich in der geschichtlichen Entwicklung als die wesentlichen herausgeschält. Natürlich kann das SI nicht alle Punkte gleichermaßen gut befriedigen, da es den Anspruch erhebt, für alle Bereiche des menschlichen Lebens – vom Alltag über das Wirtschaftsleben bis zur Wissenschaft – einsetzbar zu sein. Auf die damit verbundenen Probleme wird im Kapitel 6 eingegangen.

2.3 Meßgeräte

Mit der Entstehung bestimmter geltender Normale für die zu messenden Größen mußten auch Verfahren und Geräte zum Vergleich des Gegenstandes mit dem Normal geschaffen werden – die Entwicklung der Meßgeräte begann. Diese Geräte waren fester Bestandteil der herrschenden Kultur. Ihre kunstvolle Gestaltung weist oft auch auf die religiösen oder kulturellen (Zünfte) Zusammenhänge hin. Die schon in der alten Welt verwendeten Meßgeräte haben ihre Namen bis heute behalten. So messen wir die Zeit mit einer Uhr (unabhängig von ihrer Realisierung – sei es eine Sand- oder eine

Atomuhr), vergleichen wir Massen mit einer Waage (interessanterweise erhalten auch andere Größen vergleichende Meßgeräte oft den Zusatz „waage") und messen Längen im täglichen Gebrauch mit dem „Zollstock" (früher der Elle – beim Stoffkauf in Läden ist das Meter heute oft noch in der früheren Form der Elle gestaltet). Auch viele moderne Geräte weisen durch die Nachsilbe „meter" auf ihren Meßgerätecharakter hin (z.B. Voltmeter, Thermometer, Kalorimeter usw.). Heutige moderne Meßgeräte sind (dem Zeitgeist entsprechend) funktional und technisch-sachlich gestaltet. Für viele Vorgänge sind sogar Meßapparaturen oder ganze Meßkomplexe notwendig. Die Gründe dafür sind verschieden. Einmal sind viele Größen nur über die Messung von mit ihnen im Zusammenhang stehenden (Funktionsgleichung) anderen Größen bestimmbar. Andererseits fordern die Technik und die Wissenschaft oft relativ genaue Bestimmungen der Zahlenwerte. Der Aufwand steigt mit jeder weiteren Stelle hinter dem Komma überproportional. Auch die Genauigkeit der Grundmaße des SI für den internationalen Vergleich erfordert in diesem Zusammenhang einen erhöhten Aufwand.

Der hier geschilderte Weg der Entwicklung der Maßsysteme aus den lebenspraktischen Erfordernissen (Handel, Wirtschaft) heraus hat zwei Facetten ausgeblendet.

Einerseits ist in den frühen Entwicklungsstadien die impulsgebende Rolle der religiösen Praxis für die Herausbildung bestimmter Maßsysteme nicht zu unterschätzen. Besonders sei hier nochmals auf die Frage der Zeitmessung (Sicherung der periodischen Wiederkehr religiöser Riten) und die der Massen- und Größenbestimmung (Opfergaben) erwähnt. Sehr bald mündeten diese Impulse in die Erfordernisse der täglichen Lebenspraxis ein und es kamen keine neuen Impulse seitens der Religionen.

Eine zweite wichtige Facette ist die Herausbildung der Wissenschaften. Mit ihrer Entwicklung zu den sogenannten „exakten" Wissenschaften, die ihr Selbstverständnis auf die jederzeit und allenorts mögliche Reproduzierbarkeit ihrer quantitativ formulierten Erkenntnisse aufbaute, waren allgemein anerkannte Maßsysteme notwendig. Sie sollten dabei ihre theoretische Begründung in den grundlegenden Gesetzen ihres Fachgebietes haben. So gab es eine ganze Reihe speziell entwickelter Maßsysteme, die zum Teil in ihrer theoretischen Fundierung bis zu grundlegenden erkenntnistheoretischen Fragen der jeweiligen Disziplin zurückgehen. Dazu wird in Kapitel 6 noch weiteres zu sagen sein. Mit dem zunehmenden Eindringen der Wissenschaft via Technik in das Alltagsleben war eine Harmonisierung der unterschiedlichen Einheitensysteme notwendig. Dies mündete letztlich in der geschilderten Entwicklung des SI.

Die Übersicht in Abbildung 2.5 versucht die Zusammenführung dieser verschiedenen Wege zu einem Einheitensystem und die dabei wirkenden Einflußfaktoren zu verdeutlichen.

Abb. 2.5
Entwicklungsstränge der Maßsysteme mit den wirkenden Einflußfakt

3 Skalen

Das vorliegende Kapitel stellt den Kern des Buches dar. Hier ist die Fülle des vorhandenen Zahlenmaterials strukturiert worden, indem es zu bestimmten, i.allg. physikalischen Größen und damit ihren Maßeinheiten zugeordnet wurde. Damit haben sich bestimmte Skalen gebildet, auf denen jeweils Zahlenwerte ein und derselben Maßeinheit aus den verschiedensten Bereichen unseres Lebens – vornehmlich aus Natur und Technik – dargestellt werden. Zu jeder so entstandenen Skale gibt ein Text weitere interessante Informationen und weist auf Besonderheiten hin.

Die Reihenfolge der Skalen folgt einer logischen Ordnung. Man kann die Bereiche der Physik, die als die messende Wissenschaft per exellence die Grundlagen für die Gewinnung der meisten Daten gelegt hat und auch selbst eine Vielzahl von Daten gewinnt, so in eine logische Folge ordnen, daß in jedem neuen Bereich infolge des Auftretens neuer Begriffe nur *eine neue Basisgröße* zusätzlich erforderlich wird, um diesen Bereich beschreiben zu können. Diese Folge beginnt mit der Geometrie (als Grenzbereich zur Mathematik) und endet schließlich nach einer Verzweigung in der Physik der Stoffe, bei der wieder der Grenzbereich zur Chemie erreicht wird (vgl. Abb. 3.1).

Es fällt dabei auf, daß man zu den Basisgrößen der einzelnen Bereiche auf ganz unterschiedlichen Wegen kommt, was auch den Zugang zu den Maßeinheiten beeinflußt. So stehen uns in der Geometrie und in der Kinematik die beiden Basisgrößen *Länge* und *Zeit* quasi als fundamentale Kategorien unseres Denkens a priori zur Verfügung. Auch die zugehörigen Maßeinheiten haben sich entsprechend der Abstraktion dieser Wissensgebiete aus der täglichen Lebenspraxis heraus entwickelt. Beginnend mit der Dynamik und der Elektrizitätslehre folgen dann Bereiche, bei denen Naturgesetze am Anfang der Gebiete stehen, welche zur Einführung neuer Basisgrößen führen. Hat die Entwicklung der Maßeinheit der Masse auch noch ihren Ausgangspunkt in den tagespraktischen Problemen der Menschen genommen, so ist doch bei weiteren Gebieten die Meßvorschrift und damit auch die Maßeinheit von wichtigen Größen klar durch geltende Naturgesetze definiert.

Kommt man auch in den in Abb. 3.1 nicht erwähnten weiteren Gebieten der Physik (wie z.B. der Akustik, der Optik, der Quantenmechanik u.a.) i.allg. mit den Basisgrößen aus, so sind doch zur Bewältigung der in ihnen anstehenden Aufgabe der Erhebung exakter vergleichbarer Daten spezielle Maßeinheiten nützlich. Im Rahmen des SI lassen sich diese eindeutig aus den Basiseinheiten ableiten. Trotzdem haben sich in einigen Gebieten noch SI-fremde Einheiten gehalten, einfach weil sie in ihrer Dimensionierung dem Gegenstand adäquat sind. Dies kann bei einer vollständigen systematischen Ableitbarkeit nicht erreicht werden. Aus diesem Grund sind auch solche Maßeinheiten hier mit Skalen vertreten.

Einen Sonderfall bildet das technisch und damit praktisch so wichtige Gebiet der Lichtmessung. Während in anderen Gebieten objektiv anzeigende Meßgeräte verwen-

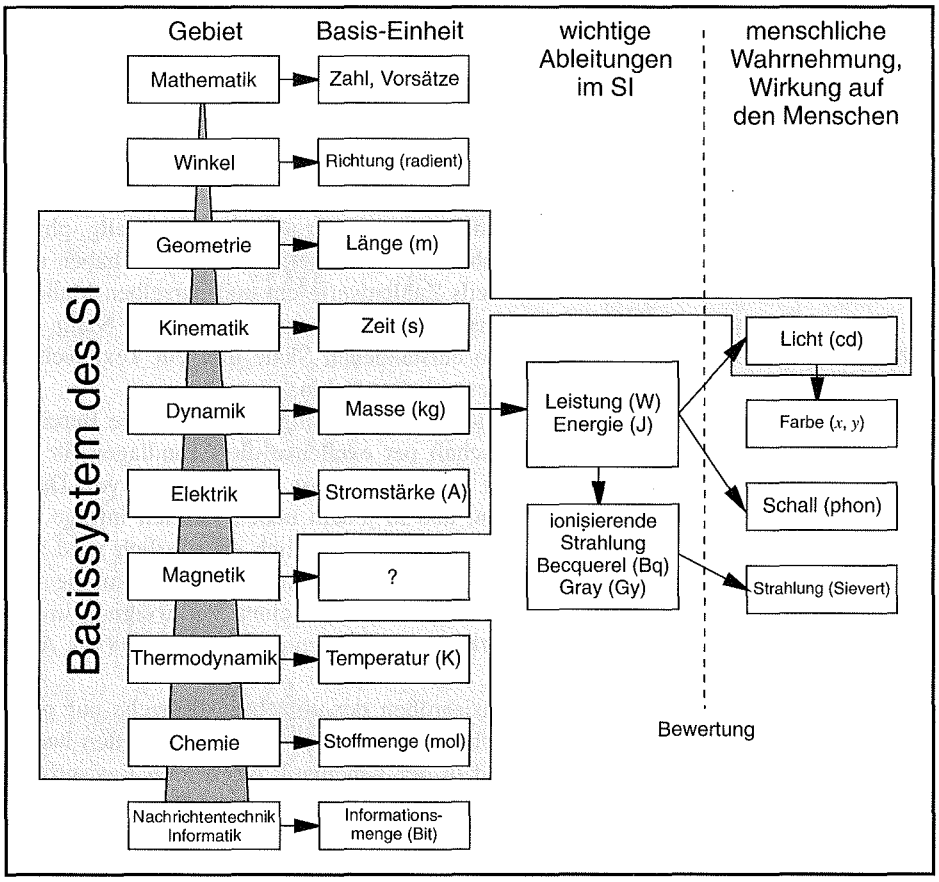


Abb. 3.1
Struktur des Zusammenhanges der Maßeinheiten in ihrem Bezug zu Bereichen der Physik. Die helle Unterlegung charakterisiert das SI. Der dunklere Keil unter den Wissenschaftsgebieten soll verdeutlichen, daß ein wachsender Umfang an Basisgrößen zu ihrer Beschreibung notwendig ist.

det werden, deren Anzeige den zu messenden Größen quantitativ entspricht, so ist in der Lichttechnik das Lichtreize nur selektiv wahrnehmende menschliche Auge das Meßgerät. Das erforderte die Definition spezieller, an diese Problematik angepaßter Einheiten.

Es wurden nicht für alle Maßeinheiten Skalen angegeben, weil die vorliegenden Daten dies nicht sinnvoll erscheinen lassen. Da dies auch bei der SI-Basiseinheit für die Stoffmenge der Fall ist, wurde ihr trotzdem ein beschreibender Textabschnitt gewidmet.

Die Skalen sind bevorzugt auf den in Natur und Technik maximal möglichen Bereich ausgelegt. Dadurch gehen häufig Details verloren, die aber auch meist nur bei speziellen technischen Aufgaben von Interesse sind. Betont technische Materialdaten wurden i.allg. nicht berücksichtigt, für diese gibt es eine umfangreiche Speziallitera-

tur.[1] Auch konnte eine Vielzahl physikalischer Effekte und Gesetze nicht berücksichtigt werden. Für diese sei ebenfalls auf die Spezialliteratur verwiesen. Durch die notwendige Auswahl gehen leider in wenigen Fällen auch für den alltäglichen Gebrauch interessante Feinheiten verloren – der Schwerpunkt wurde bewußt auf einen breiten Überblick gelegt.

Beachtenswert ist die Tatsache, daß es bei fast allen Maßeinheiten naturgegebene Ober- und Untergrenzen für die Zahlenwerte gibt. Dies ist der bei Zahlen gewohnten Denkweise deutlich unterschieden. Bei den Zahlen gibt es zu jeder Zahl mindestens einen Nachfolger (man denke an die Definition des Bereichs der natürlichen Zahlen, bei den ganzen Zahlen gibt es sogar immer einen Vorgänger und einen Nachfolger). Der hier geschilderte Umstand verdeutlicht die Tatsache, daß Maßzahlen etwas Reales über eine Eigenschaft des gemessenen Objektes aussagen. Durch den Meßvorgang wird der Objekteigenschaft aus dem Zahlenkontinuum eine bestimmte Zahl zugeordnet. Die Möglichkeit der Zuordnung wird dabei durch das dem Meßvorgang zugrundeliegende Naturgesetz bestimmt und somit die Menge der möglichen zuordenbaren Zahlen i. allg. eingeschränkt.

Trotzdem ist der überstrichene Zahlenbereich so groß, daß eine sinnvolle Darstellung nur mittels logarithmisch geteilter Skalen möglich wird. Dies wird für die meisten Leser gewöhnungsbedürftig sein. Da wir normalerweise in unserem Alltag oder Beruf immer nur einen kleinen Ausschnitt der hier in Gänze vorgestellten Skalen betrachten, sind wir an eine äquidistante Darstellung von Zahlendifferenzen gewöhnt. In der Natur ist aber diese logarithmische Teilung gar nicht so ungewöhnlich. So finden wir oft neue Qualitäten, wenn wir um bestimmte Größenordnungen (das sind in der Regel Schritte in Zehnerpotenzen) weiterschreiten. Eine sehr anschauliche Darstellung dieses Sachverhaltes gibt das Buch „Zehn$^{\text{Hoch}}$“ von Morrison u.a. Stellt man diese Qualitätssprünge in einer äquidistanten Reihenfolge dar, wird man zu einer logarithmischen Skale geführt. Auch unsere Sinnesorgane bewerten logarithmisch. Für sie gilt das Weber-Fechnersche Gesetz. Dies stellt einen Zusammenhang zwischen der physikalisch-chemischen Reizstärke R (z.B. Temperatur, Schalldruck, Leuchtdichte) und dem subjektiven Empfinden E her:

$$E = k_x \log(R/R_0),$$

wobei k_x eine für die Reizart (Wärme, Schall, Licht) typische Konstante und R_0 ein Bezugswert sind. Nur durch diesen Verlauf der Funktion des Zusammenhangs zwischen Reizstärke und unserer Reaktion sind wir überhaupt in der Lage, in einem sehr großen Bereich von Reizstärken mit Empfindungen zu reagieren. Würde dieser Reaktionsverlauf linear sein, so würden wir z.B. – die vorhandene untere akustische Wahrnehmungsgrenze als vorhanden vorausgesetzt – täglich durch die Geräusche der uns umgebenden technischen Geräte vor Lärmempfinden wahnsinnig werden. So machen eben für uns zwei Autohupen oder Straßenbahnen nicht doppelt soviel Lärm wie eine, sondern dafür sind etwa 5 notwendig und für den zehnfachen Lärm benötigt man schon über hundert. Dementsprechend sind auch viele technische Maße, die sich auf

[1] Beispielhaft für solche Datensammlungen seien hier genannt: Ardenne 1973; Ardenne, Musiol, Reball 1988; Beilstein; Gmelin; Landolt-Börnstein.

die Reizempfindlichkeit des Menschen beziehen, wie phon, dB oder Np, diesem logarithmischen Verlauf angepaßt.

Die Übersichten mit den Skalen sind so aufgebaut, daß sich in der Mitte der Übersicht ein Zahlenstrahl befindet, an dem rechts in logarithmischer Teilung die Zahlenwerte zu der der Größe entsprechenden Basis-Maßeinheit aufgetragen sind[2]. Endet der Zahlenstrahl mit einem waagerechten Strich, bedeutet dies eine echte Grenze. Ein offenes Ende weist darauf hin, daß die Grenze veränderlich ist, z.B. durch den technischen oder den Erkenntnisfortschritt. Pfeile deuten einen weiteren Verlauf der Skalen an, der aber entweder spekulativ oder so dünn mit Daten belegt ist, daß dieser Skalenbereich nicht dargestellt wird. Auf der linken Seite findet man sowohl die durch Vorsätze gebildeten Vielfachen der Maßeinheit wie auch die Werte anderer gebräuchlicher Maßeinheiten für die Größe. Dieser Skale werden dann auf beiden Seiten Gegenstände oder Phänomene aus Natur (auf einer Seite) und Technik (auf der anderen Seite) entsprechend den von ihnen angenommenen Zahlenwerten zugeordnet (in einigen Fällen konnte diese Zuordnung aufgrund der Datenfülle nicht durchgehalten werden). Dabei bedeutet ein Punkt, daß der entsprechende Wert etwa an dieser Stelle zu finden ist, Linien weisen hingegen einen möglichen Wertebereich aus. Zuweilen gibt es innerhalb einer Skale Aussagen aus recht unterschiedlichen Gebieten. In diesen Fällen wurden innerhalb der Skale Gruppierungen vorgenommen.

Zu den einzelnen Skalen gibt es erklärende Texte. Diese geben, wo immer es sinnvoll und möglich ist, zu folgenden Punkten weitere Informationen:

- Definition und Erklärung der Maßeinheit;
- Geschichtliches;
- physikalisches Grundphänomen (Wirkprinzip, Meßprinzip);
- Fehlerbereiche, Grenzen;
- Extremwerte, Besonderheiten;
- Bezug zu anderen Einheiten.

[2] Zur Definition einer physikalischen Größe und dem Zusammenhang zwischen Zahlenwert und Maßeinheit sei auf Kapitel 6 verwiesen. Für das weitere Verständnis muß hier nur bemerkt werden, daß eine physikalische Größe a sich wie folgt darstellen läßt:

$$a = \{a\} \cdot [a],$$

wobei $\{a\}$ den Zahlenwert der Größe und $[a]$ die Maßeinheit repräsentieren.

3.1 Länge in Meter ([Länge] = m)

Die Länge zählt zu den ältesten gemessenen Größen überhaupt. Fast alles wurde ursprünglich über die Länge gemessen. Auch heute zeigen noch viele (nichtdigitale) Meßinstrumente die gemessenen Werte über den Ausschlag eines Zeigers, also mittels einer Länge an.

Entsprechend der langen Geschichte gab es vielfältige und unterschiedliche Längenmaße und Arten ihrer Definition. Nach der Orientierung am Menschen wurde mit dem Fortschreiten der technischen Entwicklung schließlich eine exakte, allgemeinverbindliche Definition notwendig.

Die heutige, von der XVIII. Generalkonferenz der Meterkonvention am 20. Oktober 1983 festgelegte Definition lautet:

> Die Basiseinheit 1 Meter (1 m) ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Zeit 1/299 792 458 s durchläuft.

Damit ist das Meter auf die Naturkonstante Vakuumlichtgeschwindigkeit zurückgeführt, deren Wert gleichzeitig durch die Meterdefinition festgelegt wird. Voraussetzung für diese Definition ist dabei natürlich die von einer Länge unabhängige Definition der Sekunde als Zeiteinheit. Hätte man den Wert der Naturkonstanten c_0 mit $3 \cdot 10^8$ m/s festgelegt (was sicherlich bequemer gewesen wäre), hätte man keinen kontinuierlichen Anschluß an die früheren Meterdefinitionen gehabt, das so definierte Meter wäre etwa 0,7 mm kleiner als das durch die vorherigen Definitionen festgelegte.

Der historische Weg zu der heute gültigen Definition spiegelt die jeweiligen technischen Möglichkeiten recht deutlich wieder. Während sich der Versuch von Chr. Huygens (1629–1695), die Länge des Sekundenpendels als Längennormal zu nutzen, nicht durchsetzen konnte, wurde 1791 das Meter als der vierzigmillionste Teil der Länge des durch die Pariser Sternwarte gehenden Erdmeridians festgelegt. 1889 wurde die Definition durch ein in Paris aufbewahrtes Etalon vorgenommen, das sich unter definierten Bedingungen befand (Gleichgewichtstemperatur zwischen Eis und luftgesättigtem Wasser und dem Druck einer physikalischen Atmosphäre).

Die seit den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts rasch zunehmende Entwicklung interferrometrischer Längenvergleichsmethoden führte dazu, daß sich Längen genauer miteinander vergleichen ließen als mit dem Meternormal. So bestand der Wunsch des engeren Anschlusses des Meters an Naturkonstanten. Als geeignet erwies sich die Wellenlänge des von einem Atom ausgesandten Lichts. Das führte 1927 zu der Definition des Meters als gegeben durch 1 553 164,13 Wellenlängen des roten Cadmiumlichtes bei einer Temperatur von 15 °C, einem Luftdruck von 760 Torr, in trockener Luft mit einem CO_2-Gehalt von 0,03%. Da die Vermessung der roten Cadmiumlinie wegen deren Hyperfeinstruktur problematisch ist, wurden 1960 als Meterdefinition die 1 650 763,73 Vakuumwellenlängen der Strahlung festgelegt, die dem Übergang zwischen den Niveaus $2p_{10}$ und $5d_5$ des Atoms Krypton 86 entspricht.

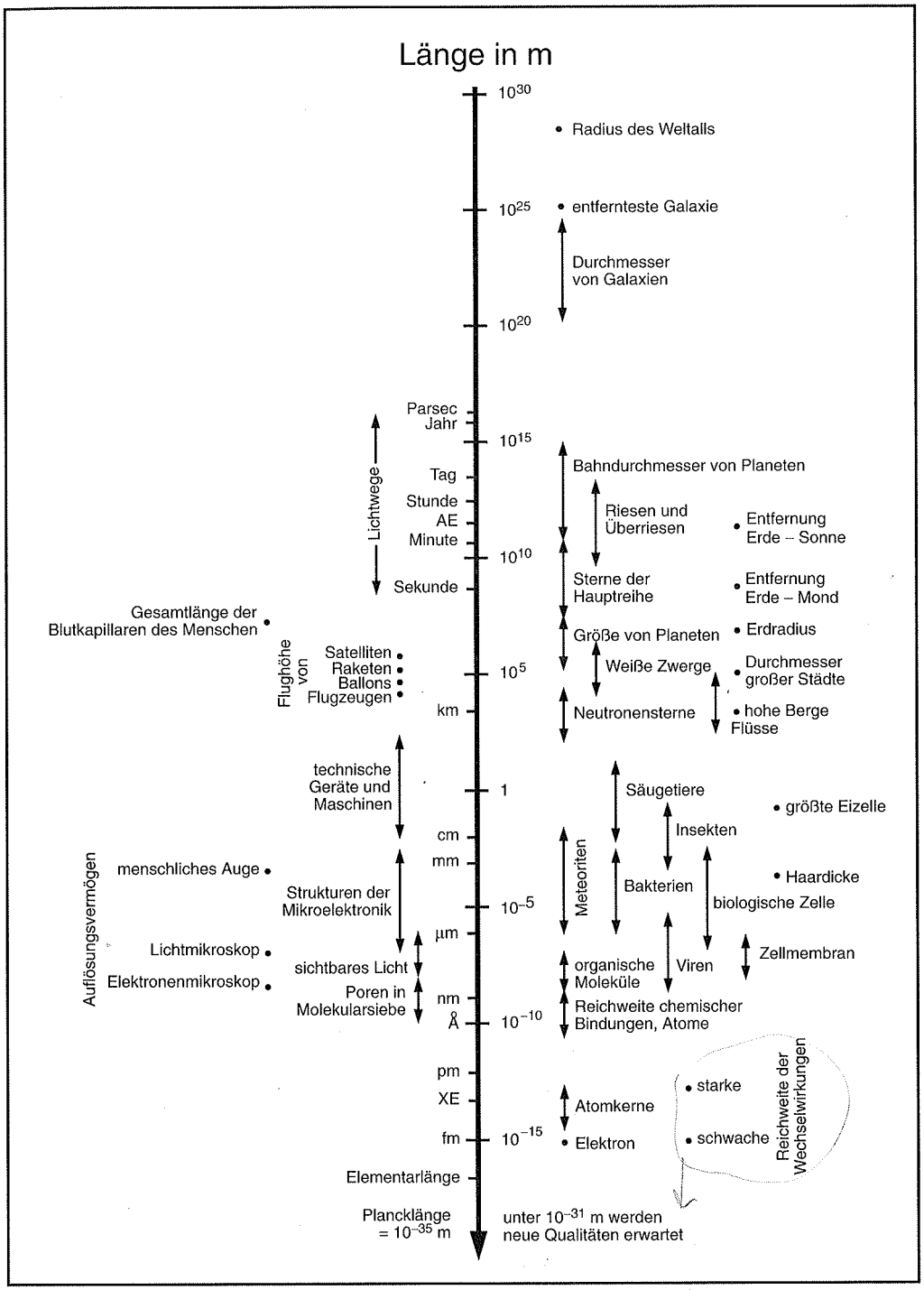
Damit war auch die Meterdefinition wie die der Sekunde (siehe Abschn. 3.2) durch

einen überall reproduzierbaren Energieübergang von Atomen festgelegt. Die Unsicherheit dieser Meterdefinition liegt bei $\pm$ $4 \cdot 10^{-9}$m und ist damit immerhin fünf Größenordnungen größer als bei der Sekunde. Die Gründe dafür sind optische. Strahlengänge in Interferometern sind stets seitlich begrenzt, wodurch Beugung auftritt. Auch sind ebene Wellen ein experimentell nicht zu realisierender Idealfall. Es lag natürlich der Wunsch nahe, die Definition des Meters ähnlich wie die der Sekunde von solchen Beschränkungen zu befreien. Das erlaubte die Laserphysik, die es gestattet, aus Strahlungsübergängen unabhängig voneinander die Wellenlänge λ und die Frequenz ν des emittierten Lichtes zu bestimmen und daraus mittels $c = \lambda\nu$ die Vakuumlichtgeschwindigkeit zu ermitteln. Der 1973 mit einer Genauigkeit von $\pm$ 1,2 m/s ermittelte Wert von 299 792 458 m/s führte dann 1983 zur heute gültigen Meterdefinition. Die damit z.Z. erreichbaren relativen Genauigkeiten liegen bei 10^{-9}.

Längen existieren in vielfältiger Gestalt. Am anschaulichsten ist die Länge einer geraden Strecke, sie ist auch am einfachsten zu bestimmen. Entsprechend der Definition, daß die Länge genau der geometrische Abstand zwischen den Endpunkten der Geraden ist, vergleicht man diesen mit dem „Normal" und erhält ein – i. allg. gebrochen rationales – Vielfaches davon als Maßzahl für die Länge in Meter. In diesem Sinne spricht man auch bei der Entfernungsangabe zwischen Orten von der Luftlinie.

Auch die Entfernungsmessung in der Astronomie gehorcht den soeben genannten Bedingungen. Das Licht breitet sich – von den im Verhältnis kleinen Effekten der Allgemeinen Relativitätstheorie abgesehen – geradlinig aus. Jedoch ist bei diesen Entfernungen kein direkter Vergleich zwischen Strecke und Normal möglich, so daß man über bekannte mathematische Zusammenhänge mit anderen – meßbaren – Größen die Entfernungsbestimmung vornehmen muß. So mißt man z.B. die Veränderung der Lage eines Sternes am Himmel aufgrund der Bewegung der Erde um die Sonne (Bestimmung der Parallaxe). Die sich dabei ergebende Winkeldifferenz führt zu der Maßeinheit Parsec. Ein Parsec ist die Entfernung, von der aus eine astronomische Einheit (die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne) unter einer Parallaxe von einer Winkelsekunde erscheint. Je kleiner die Parallaxe eines Sternes ist, um so weiter ist er von uns entfernt. Andere Verfahren nutzen die Rotverschiebung des uns erreichenden Lichtes. In den meisten Fällen wird die Entfernung mittels der Zeit angegeben, die das Licht zum Durchmessen der Strecke benötigt (Lichtjahr). Über die Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante kann dann die Länge berechnet werden. Im täglichen Leben nutzen wir dieses Prinzip bei der Entfernungsbestimmung von Gewittern. Wir messen die Zeit (in Sekunden), die zwischen dem Sehen des Blitzes und der Wahrnehmung des zugehörigen Donners verstreicht. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft bei etwa 340 m/s liegt, genügt es, den für die Zeit gemessenen Zahlenwert einfach durch 3 zu teilen, um die Entfernung des Gewitters überschlagsmäßig in Kilometern zu erhalten.

Schwieriger wird die Bestimmung der Länge bei gekrümmten Wegen, wie z.B. Straßen oder Schienensträngen. Hier müßte der Weg eigentlich integral, d.h. der wirklich zurückgelegte Weg bestimmt werden, in dem Sinne, wie das mathematische Kurvenintegral definiert ist. Da der gekrümmte Weg aber i.allg. nicht analytisch darstellbar ist, bleibt oftmals nur die Möglichkeit einer direkten Vermessung oder die Anwendung von Näherungsverfahren.


Länge in m
10^{30}
Radius des Weltalls
10^{25}
entfernteste Galaxie
Durchmesser von Galaxien
10^{20}
Parsec
Jahr
10^{15}
Bahndurchmesser von Planeten
Tag
Stunde
AE
Minute
Riesen und Überriesen
Entfernung Erde – Sonne
10^{10}
Sekunde
Lichtwege
Sterne der Hauptreihe
Entfernung Erde – Mond
Gesamtlänge der Blutkapillaren des Menschen
Größe von Planeten
Erdradius
Flughöhe von
Satelliten
Raketen
Ballons
Flugzeugen
10^{5}
Weiße Zwerge
Durchmesser großer Städte
km
Neutronensterne
hohe Berge
Flüsse
technische Geräte und Maschinen
1
Säugetiere
größte Eizelle
cm
Insekten
mm
Meteoriten
Bakterien
Haardicke
biologische Zelle
menschliches Auge
Strukturen der Mikroelektronik
10^{-5}
Auflösungsvermögen
µm
Lichtmikroskop
sichtbares Licht
organische Moleküle
Viren
Zellmembran
Elektronenmikroskop
Poren in Molekularsiebe
nm
Å
Reichweite chemischer Bindungen, Atome
10^{-10}
pm
XE
starke
Reichweite der Wechselwirkungen
Atomkerne
fm
10^{-15}
Elektron
schwache
Elementarlänge
Plancklänge
$= 10^{-35}$ m
unter 10^{-31} m werden neue Qualitäten erwartet

Wie kompliziert die Längenbestimmung bei natürlichen Entfernungen werden kann, ist uns erst seit den achtziger Jahren mit dem Entstehen der Fraktalen Geometrie bewußt geworden. Bereits 1961 fiel es Lewis Richardson auf, daß die Grenzlängen zwischen zwei Ländern von beiden Seiten unterschiedlich angegeben werden. Die Grenze zwischen Spanien und Portugal beispielsweise mit 987 km bzw. 1214 km und zwischen den Niederlanden und Belgien mit 380 km bzw. 449 km. Allgemein stellte sich heraus, daß solche Längenmessungen stark vom jeweils gewählten Maßstab abhängen. Mißt man z.B. die Küste der USA auf einem Globus, so erhält man etwa 3 000 km, auf einer großen Karte werden es bereits 7 000 km, während Seekarten ca. 17 000 km ausweisen. Würde man sie zu Fuß ablaufen, wären es etwa 24 000 km. Dieser Effekt ist relativ einfach zu erklären. Natürliche Grenzen sind stark strukturiert, „zerklüftet". Je genauer man sie betrachtet, desto deutlicher wird dies (theoretisch kann man die Auflösung so hoch wählen, daß jeder Stein mit seiner Struktur berücksichtigt werden muß). Je nach dem gewählten Maßstab beim Messen werden dann unterschiedliche Längen der „zerklüfteten" Linien durch gerade Strecken ersetzt. Diese Länge der Näherungsstrecken definiert man vorteilhaft über einen Kreisradius, mittels dem man von einem Meßpunkt zum nächsten fortschreitet. So wird die gemessene Länge L eine Funktion dieses Radius R:

$$L = L_0 R^{1-D}.$$

Hierin ist L_0 eine Kenngröße der Dimension Länge und D ist eine für den jeweiligen Weg spezifische Konstante, die sogen. Hausdorff-Dimension. Je größer ihr Wert ist, desto mehr ist die fraktale Kurve „zerklüftet". Gemäß dieser Formel existieren damit für natürliche Wege, Grenzen, Küsten etc. keine eindeutigen „absoluten" Längen mehr, man muß immer den zugrundegelegten Maßstab angeben.

Längen werden auch zur Charakterisierung anderer physikalischer Phänomene genutzt. So gibt die Wellenlänge den Abstand zwischen zwei periodisch wiederkehrenden Zuständen einer Welle an (am anschaulichsten durch die Wellentäler oder -berge zu verdeutlichen). Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit (bei elektromagnetischen Wellen die Lichtgeschwindigkeit) kann man zur Frequenz der entsprechenden Welle gelangen. Auch die Eigenschaften von Gasen werden durch die Angabe der mittleren freien Weglänge charakterisiert. Dies ist die Strecke, die ein Gasatom oder -molekül zurücklegen kann, ohne mit einem anderen Teilchen zu kollidieren.

Eine wichtige Länge ist die Reichweite bestimmter Phänomene. So ist die Reichweite von Funksendern für deren Verbreitung sehr wichtig, und man versucht, die natürlichen Grenzen (Leistung, geographisches Profil) durch technische Entwicklungen nach oben zu schrauben (Relaisstationen, Satelliten). Auch für die grundlegenden Kräfte unseres Universums gelten solche Reichweiten. Dabei haben diese Reichweiten nicht unbedingt etwas mit der Stärke dieser Kräfte zu tun (vgl. Tab. 3.1)

Der Variationsbereich der Werte für Längen ist beachtlich, er umfaßt etwa 45 Zehnerpotenzen. Zu den kleinsten Längen hin nimmt man heute – ähnlich wie für die Wirkung in der Quantentheorie – eine nicht unterschreitbare Quantelung an. Die zugehörige Elementarlänge dürfte bei etwa 10^{-17} m liegen. Die größte Länge ist durch die Ausdehnung unseres Weltalls mit ca. 10^{26} m gegeben. Man bezeichnet den Bereich der sehr kleinen Längen als den Mikrokosmos, für ihn sind die Gesetze der Elementar-

Tabelle 3.1
Die vier Kräfte der Physik und ihre Reichweiten

Kraft	Reichweite	relative Stärke	wirkt auf Teilchen
Gravitation	unendlich	10^{-39}	alle Teilchen
schwache Wechselwirkung	$< 10^{-18}$ m	10^{-5}	Leptonen Quarks
elektromagnetische Kraft	unendlich	1/137	geladene Teilchen
starke Wechselwirkung	$< 10^{-15}$ m	1	Hadronen Quarks

teilchenphysik maßgebend. Der Bereich der größten Werte, dem sich wesentlich die Astrophysik widmet, ist der Makrokosmos. Der dazwischen liegende, dem Menschen unmittelbar zugängliche Bereich vom Millimeter bis zu einigen Kilometern wird Mesokosmos genannt. Leben selbst spielt sich vom Nanometerbereich der Moleküle und Mikroorganismen bis zum Meterbereich von Großlebewesen ab. Die technische Entwicklung hat eine Ausweitung des direkt zugänglichen Bereichs für den Menschen bewirkt. Jedoch wird in der Skale deutlich, daß der Sprung zu den Bereichen, in denen wesentliche neue Qualitäten zu erwarten sind, sowohl im Kleinen wie im Großen noch nicht erreicht ist. Auffällig ist eine Lücke zwischen den Durchmessern von Planetenbahnen und den Durchmessern von Galaxien. Gibt es hier einen echten Qualitätssprung bei den beobachtbaren Längen oder verbergen sich dahinter noch nicht entdeckte Strukturen?

Prinzipiell kann der gesamte Variationsbereich der Längen mit den genormten Vorsätzen und dem Einsatz von Zehnerpotenzen abgedeckt werden. Das ist aber für spezielle Bereiche unpraktisch, so daß Sondereinheiten zugelassen sind.

Spektroskopie
1 X-Einheit = 1 XE = $1{,}002\,06 \cdot 10^{-13}$ m
1 Angström = 1 Å = 10^{-10} m = 0,1 nm

Astronomie
1 Astronomische Einheit = 1 AE = $1{,}495\,89 \cdot 10^{11}$ m
1 Lichtjahr = 1 Lj = $9{,}460\,55 \cdot 10^{15}$ m
1 Parsec = 1 pc = $3{,}083\,74 \cdot 10^{16}$ m

Schiffahrt
1 Seemeile = 1 sm = 1 852 m

Optik
1 Dioptrie = 1dpt = 1/m (der reziproke Wert der Brennweite von Linsen gemessen in Metern, auch als Brechkraft oder Brechwert bekannt)

Obwohl im SI nicht ausgewiesen, werden in der Typographie weiterhin die historisch entstandenen Sondermaße verwendet. Nachteilig ist dabei das Nebeneinander eines europäischen und eines amerikanischen Grundmaßes. Die erste Festlegung geht 1737 auf Fournier zurück. Sie wurde 1787 von Didot weiterentwickelt und verwendet den typographischen Punkt als kleinste Einheit. Die zugehörige größere Einheit ist das Cicero. Im amerikanischen Einzugsbereich existiert dagegen das Pica-Maßsystem. Es gelten folgende Zusammenhänge:

1 Punkt	= 0,376 mm	1 Point = 1/12 Pica	= 0,351 mm
1 Cicero = 12 Punkte	= 4,5 mm	1 Pica = 12 Point	= 1/6 Zoll = 4,218 mm

Die vielfach genutzte Angabe 1 Geviert ist gleich der Schriftgröße plus Durchschuß.

Weiterhin sollen noch einige heute teilweise in Gebrauch befindliche Längeneinheiten angegeben werden:

1 englische Meile	= 1,6093 km
1 fath	= 1,8288 m
1 franz. Seemeile	= 5,556 km
1 hand	= 0,1016 m
1 in	= 25,4 mm
1 internat. Meile	= 7,420 km
1 Londoner Meile	= 1,542 km
1 mil	= 25,4 µm (= 1/1 000 in)
1 rod	= 5,029 m (auch pole oder perch genannt)
1 russische Meile	= 7,467 km
1 russischer Sachen	= 2,133 m
1 russischer Werst	= 1,0668 km
1 yd	= 0,9144 m (= 3 ft)

Zur Illustration der regionalen Vielfalt der Definitionen der früheren Maße, seien zum Abschluß verschiedene Möglichkeiten für die Länge „Fuß" aufgeführt. Von dem operettenhaften Pariser Füßchen kann nach dieser Definition wohl nicht die Rede sein.

1 fot (Schweden)	= 0,2969 m
1 Frankfurter Fuß	= 0,28657 m
1 ft (England)	= 0,3048 m
1 Fut (Rußland)	= 0,3048 m
1 Hannoveraner Fuß	= 0,29221 m
1 karolingischer Fuß	= 0,288 m
1 Nürnberger Fuß	= 0,27837 m
1 Pariser Fuß	= 0,324 m
1 Pé (Brasilien)	= 0,3439 m
1 Pied (Brasilien)	= 0,2868 m
1 preußischer Fuß	= 0,31385 m
1 ungarischer Fuß	= 0,31608 m
1 Voet (Niederlande)	= 0,2831 m

3.1.1 Fläche in Quadratmeter ([Fläche] = m^2)

Flächen treten uns zumindest in viererlei Gestalt entgegen:

- Bei Körpern mit betont zweidimensionaler Ausdehnung; Musterbeispiele sind das Papier, Folien, Glasscheiben und textile Stoffe.
- Ebene Flächen, die man für etwas benutzten kann, wie Tafel, Leinwand oder Plakatwand sowie landwirtschaftliche und bebaubare Fläche. Auch die nutzbare Fläche einer Leiterplatte oder eines Siliciumchips sind hier einzuordnen.
- Oberflächen von beliebig geformten Körpern, wie Würfel, Kugel, Gebäude u.ä.
- Querschnitte von meist betont eindimensionalen Körperformen, wie Drähte, Fasern und Rohre. Aber auch die Wirkungsquerschnitte der Atom- und Elementarteilchenphysik sind hier einzuordnen.

Allen gemeinsam ist, daß für die Nutzung des Gebildes die Ausdehnung in zwei Richtungen interessant ist.

Als Fläche bezeichnet man ein zweidimensionales Gebilde, dessen beide Dimensionen Längen sind. Damit ist die Möglichkeit der Maßbestimmung durch die Definition des Längenmaßes vorgegeben.

Die SI-Einheit für eine Fläche A ist das Quadratmeter ($[A] = m^2$).

Für die Fläche existiert praktisch keine Möglichkeit zur direkten Messung. Eine Ausnahme sind die mechanischen Planimeter. Bei ihnen wird der Rand der Fläche abgetastet und dabei das Ergebnis mittels eines mathematischen Algorithmus, ähnlich wie beim mathematischen Kreisintegral gewonnen. Eine andere sehr einfache Methode ist das Übertragen der Fläche auf Karton und anschließendes Ausschneiden. Über das Gewicht und den Vergleich mit dem Gewicht einer bekannten Fläche auf demselben Karton ist dann recht gut die Fläche zu bestimmen.

Die überwiegende Mehrzahl der Methoden zur Flächenbestimmung geht von Längenmessungen aus und bestimmt mittels mathematischer Zusammenhänge die Fläche durch Rechnung. Bei regelmäßigen Gebilden, wie Kreis, Quadrat und n-Eck, genügt dann sogar eine Messung.

Die Genauigkeit der Flächenbestimmung hängt damit von der Genauigkeit der jeweiligen Längenbestimmungen ab. Werden zur Flächenberechnung Näherungsverfahren benutzt, so geht deren Fehler noch zusätzlich in den Fehler der Flächenbestimmung ein.

Dem erreichbaren Wertebereich der Maßzahlen für Flächen sind keine eigenständigen Grenzen gesetzt, sie hängen von den Grenzen der möglichen Längen ab. Es fragt sich allerdings, ob es für reale Flächen insofern Grenzen gibt, daß ihre Entstehung und Stabilität überhaupt gegeben sind. Die Skale gibt Werte in einem Bereich von 28 Zehnerpotenzen wieder.

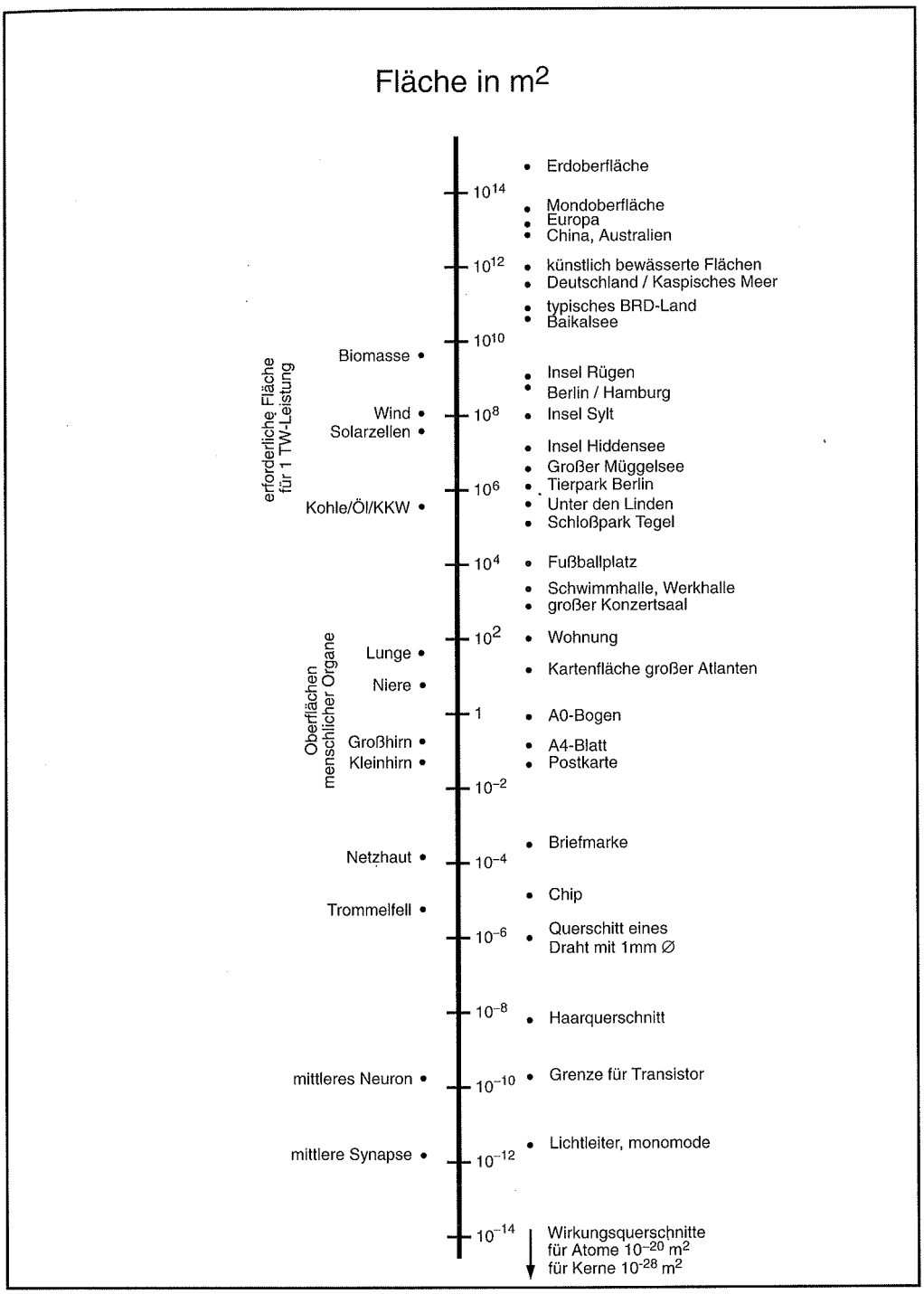
Die folgende Auflistung weiterer Flächeneinheiten zeigt am Beispiel des Morgen auch wieder die territoriale Variabilität der alten Maße.

1 Ar = 1a	= 100 m^2
1 acre	= 4046,86 m^2
1 Barn = 1b	= 10^{-28} m^2
1 Hektar = 1ha	= 10^4 m^2
1 Morgen, üblich	= 2 500 m^2
1 Morgen, badisch	= 3 600 m^2
1 Morgen, bayerisch	= 3 407 m^2
1 Morgen, preußisch	= 2 553 m^2
1 Morgen, sächsisch	= 2 770 m^2
1 Morgen, württembergisch	= 3 125 m^2
1 rood	= 1,011 71 m^2
1 sq chain	= 404,7 m^2
1 sq foot	= 0,0929 m^2
1 sq inch	= 6,451 cm^2
1 sq mile	= 2,59 km^2
1 sq rod	= 25,29 m^2 (auch pole oder perch genannt)
1 sq Yard	= 0,8361 m^2

Aus den praktischen Erfordernissen u.a. der Druckindustrie erfolgt die Strukturierung der Papierflächenmaße nach einer besonderen Gesetzmäßigkeit: Die nächst kleinere Fläche hat als Längsseite die kürzere Seite der vorgehenden Fläche und als kürzere Seite die Hälfte der längeren Seite des Vorgängers. Ausgangspunkt ist dabei die Fläche A0 (im Druckereiwesen ist der A0-Bogen auch die Ausgangsbasis für Papierbedarfsrechnungen).

A0 = (841 × 1188) mm	
A1 = (594 × 841) mm	
A2 = (420 × 594) mm	
A3 = (297 × 420) mm	
A4 = (210 × 297) mm	
A5 = (148 × 210) mm	
A6 = (105 × 148) mm	(gleich Postkartenformat)
A7 = (74 × 105) mm	

Es haben sich dann in der Folge die sogenannten B- und C-Reihen entwickelt, die hauptsächlich für Umschläge u.ä. gelten.


Fläche in m2
erforderliche Fläche für 1 TW-Leistung
Biomasse
Wind
Solarzellen
Kohle/Öl/KKW
Oberflächen menschlicher Organe
Lunge
Niere
Großhirn
Kleinhirn
Netzhaut
Trommelfell
mittleres Neuron
mittlere Synapse
10^14
10^12
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
1
10^-2
10^-4
10^-6
10^-8
10^-10
10^-12
10^-14
Erdoberfläche
Mondoberfläche
Europa
China, Australien
künstlich bewässerte Flächen
Deutschland / Kaspisches Meer
typisches BRD-Land
Baikalsee
Insel Rügen
Berlin / Hamburg
Insel Sylt
Insel Hiddensee
Großer Müggelsee
Tierpark Berlin
Unter den Linden
Schloßpark Tegel
Fußballplatz
Schwimmhalle, Werkhalle
großer Konzertsaal
Wohnung
Kartenfläche großer Atlanten
A0-Bogen
A4-Blatt
Postkarte
Briefmarke
Chip
Querschitt eines Draht mit 1mm Ø
Haarquerschnitt
Grenze für Transistor
Lichtleiter, monomode
Wirkungsquerschnitte
für Atome 10-20 m2
für Kerne 10-28 m2

3.1.2 Volumen in Kubikmetern ([Volumen] = m^3)

Das Volumen ist der Inhalt eines dreidimensionalen Gebildes, dessen Dimensionen allgemein Längen sind. Damit ist auch hier die Möglichkeit der Maßbestimmung durch die Definition des Längenmaßes gegeben. Da es um den durch die äußeren Begrenzungen des Gebildes umfaßten Inhalt geht, nennt man die das Volumen messenden Maße auch Hohlmaße. Diese Bezeichnung wird anschaulich, wenn man an die im Haushalt zur Volumenbestimmung verwendeten Meßbecher denkt.

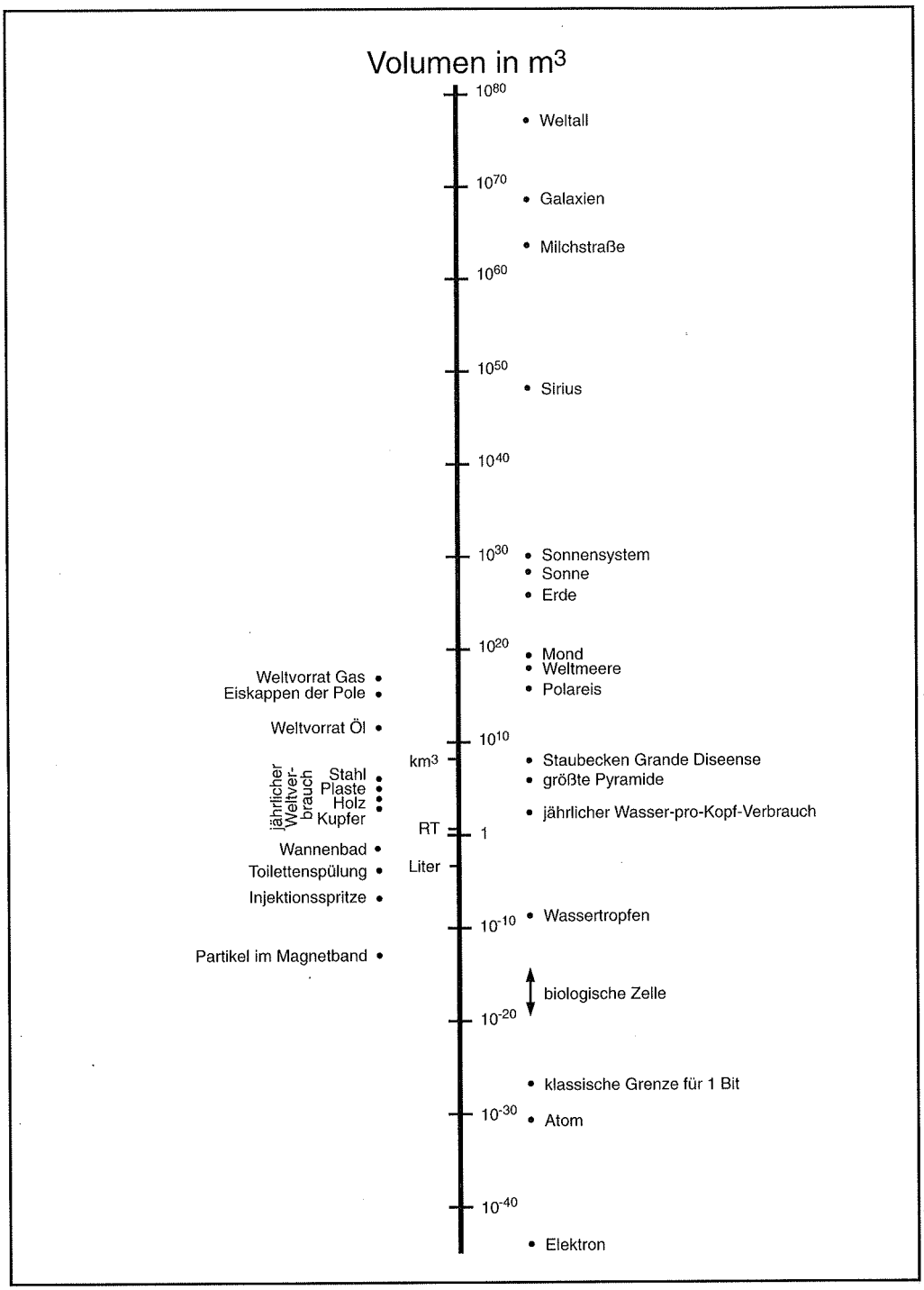
Die SI-Einheit für ein Volumen V ist das Kubikmeter ($[V] = m^3$).

Da die Bestimmung von Volumen für die Menschen schon sehr lange von großer Wichtigkeit ist, hat die Entwicklung der entsprechenden Maße und ihre Bestimmung eine lange Geschichte. Sie verlief zu Beginn unabhängig von den Längenbestimmungen und orientierte sich an den täglichen Fragestellungen. Mit der zunehmenden Systematisierung der physikalischen Erkenntnisse und der einhergehenden Systematisierung der Maßsysteme wurde das Volumenmaß auf die Längenmaße zurückgeführt.

Besonders kompliziert ist die Bestimmung des Volumens von unregelmäßigen Körpern. Hier fand Archimedes (ca. 287 v. Chr. – 212 v. Chr.) schon in der Antike eine Lösung. Nach der Legende hatte König Hieron II von Syrakus den Verdacht, daß eine für ihn gefertigte Goldkrone mit Silber gefälscht war. Das Gewicht der Krone entsprach aber genau dem des zur Verarbeitung bereitgestellten Goldes. Hieron übertrug die Aufgabe Archimedes und dieser fand die Lösung beim Baden, als das Wasser beim Einsteigen überlief. Mit dem Ruf „Heureka“ (Ich hab 's!) soll er nackt nach Hause gelaufen sein, um den entsprechenden Versuch mit der Krone sofort durchzuführen. Er konnte die Fälschung der Krone nachweisen. Der uns hier interessierende Grundgedanke ist der, das Volumen der Krone durch das Volumen des durch sie verdrängten Wassers zu bestimmen. Mit Hilfe des so bestimmten Volumens und des Gewichtes konnte man die Dichte des für die Krone verwendeten Materials bestimmen. Ein Vergleich mit der für reines Gold machte dann die Fälschung deutlich.

Es bestehen für die Bestimmung des Volumens grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

- Bei regelmäßigen Körperformen, wie Würfel, Quader, Zylinder, Kugel usw., erfolgen Längenmessungen, an die sich dann Berechnungen entsprechend den mathematischen Beziehungen für das entsprechende Körpervolumen anschließen. Dieses Verfahren kann auch für aus regelmäßigen Körpern zusammengesetzte Körper angewendet werden.
- Das Volumen von Flüssigkeiten, Gasen oder auch von Schüttgütern läßt sich durch Überführung in regelmäßige Körperformen bestimmen. Dies geschieht i. allg. dadurch, daß die Stoffe in geeichte Gefäße gefüllt werden (Hohlmaße).
- Bei unregelmäßigen Körperformen bestimmt man das Volumen durch Verdrängung einer Flüssigkeit, deren Volumen leicht zu bestimmen ist.


Volumen in m3
10^80
Weltall
10^70
Galaxien
Milchstraße
10^60
10^50
Sirius
10^40
10^30
Sonnensystem
Sonne
Erde
10^20
Mond
Weltmeere
Polareis
Weltvorrat Gas
Eiskappen der Pole
Weltvorrat Öl
10^10
km3
Staubecken Grande Diseense
größte Pyramide
jährlicher Weltverbrauch
Stahl
Plaste
Holz
Kupfer
jährlicher Wasser-pro-Kopf-Verbrauch
RT
1
Wannenbad
Toilettenspülung
Liter
Injektionsspritze
10^-10
Wassertropfen
Partikel im Magnetband
biologische Zelle
10^-20
klassische Grenze für 1 Bit
10^-30
Atom
10^-40
Elektron

Bezüglich der Grenzen und Fehler der Volumenbestimmung gilt das bei der Fläche Gesagte in der entsprechenden Erweiterung auf drei Dimensionen. Die gegenwärtig erreichbare relative Meßunsicherheit liegt bei einigen 10^{-5}.

Zusätzlich zur Einheit Kubikmeter und der durch die gesetzlichen Vorsätze des Meter gebildeten Volumenmaße existieren im SI:

1 Hektoliter	$= 1\text{hl} = 10^{-1}\ \text{m}^3$
1 Liter	$= 1\text{l} = 10^{-3}\ \text{m}^3$
1 Deziliter	$= 1\text{dl} = 10^{-5}\ \text{m}^3$
1 Zentiliter	$= 1\text{cl} = 10^{-6}\ \text{m}^3$.

Weitere gebräuchliche Maße für Volumen sind:

1 bbl (USA)	$= 0{,}1159\ \text{m}^3$	(barrel)
1 bbl Bier	$= 0{,}1638\ \text{m}^3$	
1 bbl Erdöl	$= 0{,}158\,984\ \text{m}^3$	
1 bu (GB)	$= 3{,}6537 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^3$	(bushel)
1 bu (USA)	$= 3{,}52391 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^3$	
1 cran	$= 0{,}1705\ \text{m}^3$	
1 cu ft	$= 0{,}028\,3166\ \text{m}^3$	(cubic foot)
1 cu in	$= 1{,}6387 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^3$	(cubic inch)
1 cu yd	$= 0{,}764\,555\ \text{m}^3$	(cubic yard)
1 Fm	$= 1{,}0\ \text{m}^3$	(Festmeter, in der Holzwirtschaft)
1 gallon (GB)	$= 4{,}546 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$	
1 gallon (USA)	$= 3{,}785 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$	
1 gill	$= 1{,}829 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$	
1 Kubiksashen	$= 9{,}712\,68\ \text{m}^3$	
1 fluid ounce (USA)	$= 2{,}957\,37 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^3$	
1 fluid ounce (GB)	$= 2{,}8413 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^3$	
1 peck	$= 8{,}8097 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$	
1 petrobarrel (USA)	$= 0{,}159\ \text{m}^3$	
1 pint	$= 5{,}5061 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^3$	
1 quart	$= 1{,}1011 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$	
1 Rm	$= 1{,}0\ \text{m}^3$	(Raummeter, in der Holzwirtschaft)
1 RT	$= 2{,}832\ \text{m}^3$	(Registertonne, in der Schiffsvermessung)
1 Ster	$= 1{,}0\ \text{m}^3$	(geschichtetes Holz)

Besondere Bezeichnungen für Volumina sind noch bei den Weinflaschen üblich. Das hängt auch damit zusammen, daß das Fassungsvermögen der Flasche Einfluß auf die Alterung des Weines hat und damit auf seine Qualität. Je größer eine Flasche, desto langsamer und besser altert der Wein. Auch regional sind unterschiedliche Bezeichnungen üblich. Zwei Beispiele seien angeführt.

Im Bordelais:
halbe Flasche: 37,5 cl
Normalflasche: 75 cl
Magnum: 2 Flaschen = 1,5 l
Marie-Jeanne: 2,5 l
Doppel-Magnum: 4 Flaschen = 3 l
Jeroboam: 6 Flaschen = 4,5 l
Impériale: 8 Flaschen = 6 l

In der Champagne:
Viertelflasche: 20 cl
halbe Flasche: 37,5 cl
Normalflasche: 75 cl
Magnum: 2 Flaschen = 1,5 l
Jeroboam: 4 Flaschen = 3 l
Rehoboam: 6 Flaschen = 4 l
Methusalem: 8 Flaschen = 6 l
Salmanazar: 12 Flaschen = 9 l
Balthasar: 16 Flaschen = 12 l
Nebuchadnezar: 20 Flaschen = 15 l

3.2 Zeit in Sekunden ([Zeit] = s)

Im täglichen Leben hat jeder dank seiner gesammelten Erfahrungen ein Gefühl dafür, was Zeit ist. Fragt man hingegen genauer nach, was Zeit denn nun eigentlich sei, wird die Situation schwierig. Die Antworten sind je nach Kenntnisstand oder Interessenlage sehr verschieden. In den beiden Wissenschaften Philosophie und Physik spielt der Zeitbegriff eine zentrale Rolle und so verwundert es sicherlich nicht, daß dort eine intensive Diskussion zum Zeitbegriff stattfindet, der auch über die Grenzen dieser Disziplinen hinausgeht. Diese Diskussion kann hier nicht annähernd reflektiert werden. Für unsere Darstellung interessiert die Feststellung, daß die Zeit eine Größe ist, die in allen Lebensbereichen eine zentrale Rolle spielt und deswegen schon sehr früh in der Menschheitsgeschichte Versuche unternommen wurden, die Zeit zu messen (vgl. dazu Kap. 2).

Als Voraussetzung liegt der Zeitmessung die Annahme zugrunde, daß die Zeit in einer kontinuierlichen Art und Weise „abläuft". Das Wort „ablaufen" zeigt die Anlehnung der Vorstellung zum Fortgang der Zeit (die ja ein Abstraktum darstellt) an die Funktionen der ersten Uhren (Wasser, Sand, mechanische Federn „laufen" durch bzw. ab; umgangssprachlich wird vom Tod eines Menschen auch in der Form „seine Lebensuhr ist abgelaufen" gesprochen). Um solch einen Zeit"fluß" messen zu können, benötigt man unabhängige, periodisch ablaufende Vorgänge, mit deren Periodizität man das betrachtete Zeitintervall vergleichen kann. Daraus wird auch deutlich, daß nur Zeitdifferenzen meßbar sind, es wird immer ein (auch willkürlich setzbarer) Bezugspunkt benötigt.

Die heutige, von der XIII. Generalkonferenz für Maß und Gewicht 1967 festgelegte Definition für das Zeitmaß lautet:

> Die Basiseinheit 1 Sekunde (1 s) ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Cäsium 133 entspricht.

Diese Definition der Maßeinheit für die Zeit basiert auf der grundlegenden Erkenntnis der modernen Quantenphysik, daß die mit Energieübergängen in Atomen verbundenen Frequenzen konstant sind. Mit den entsprechenden technischen Möglichkeiten ist dadurch auch der Vorteil gegeben, diese Einheit jederzeit an beliebigen Orten zu reproduzieren.

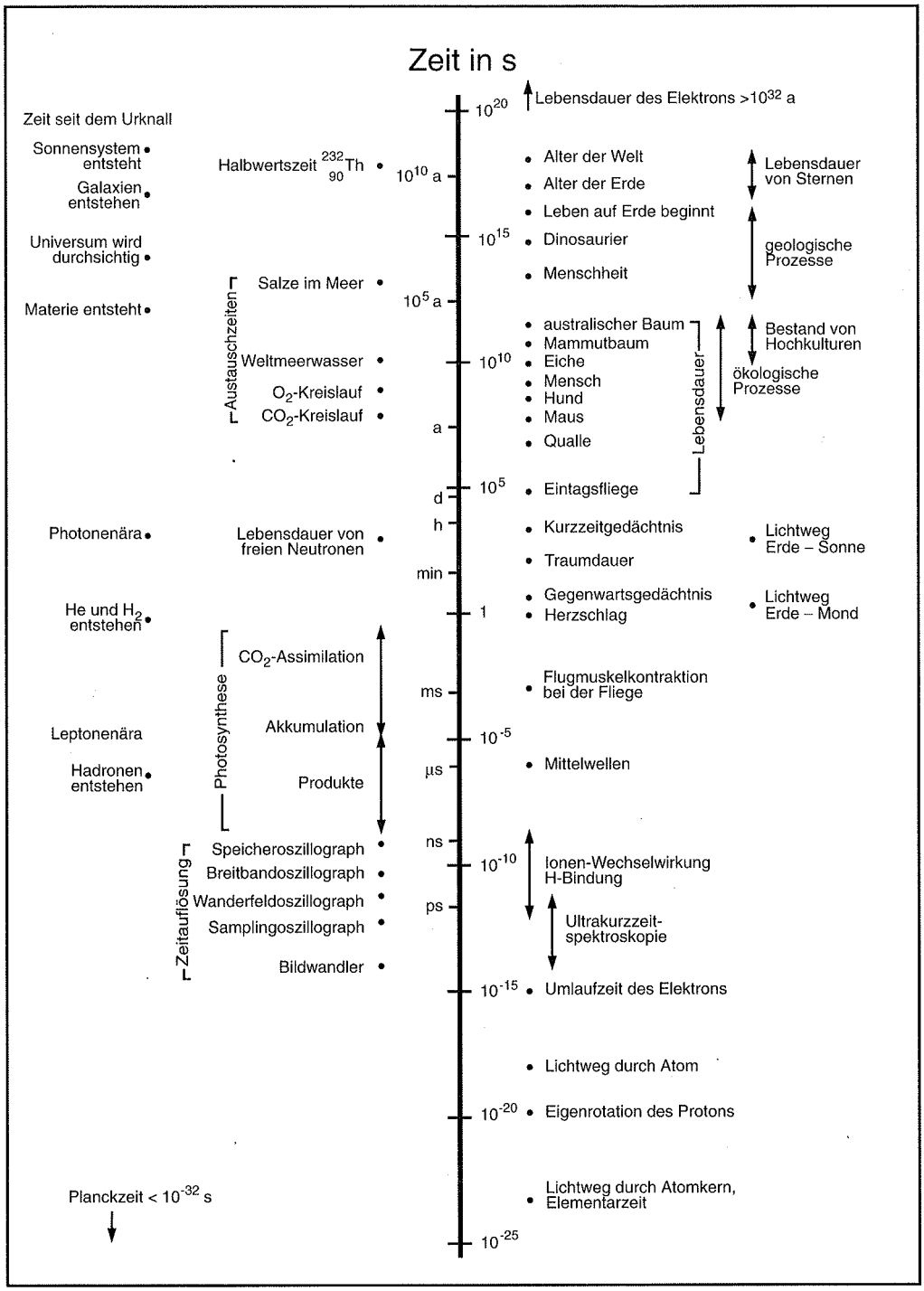
Historisch hat sich die Zeitmessung der äußerlich vorgegebenen Perioden des Jahreslaufs bedient. Als das tägliche Leben unmittelbar gestaltende Zeitgröße war der Wechsel von Tag und Nacht extern vorgegeben. Diese beiden Pole werden in der Zeitmessung zu der Einheit Tag zusammengefaßt. An diese Periodizität haben sich auch viele biologische Funktionen angepaßt. Als weitere wichtige Zeitmaße sind der Monat (abgeleitet vom Mondzyklus) und das Jahr anzusehen. Da diese Perioden sehr viel länger sind und unschärfere Grenzen als der Tag besitzen, war die Zuordnung untereinander lange nicht eindeutig. Das sieht man an den unterschiedlichen Konstruktionen der Kalender im Verlauf der menschlichen Geschichte.

Für viele praktische Fragestellungen waren diese astronomischen Perioden zu lang. Diese Situation sollte dadurch behoben werden, daß man eine kleine Basiseinheit definierte, aus der dann alle anderen Einheiten aufgebaut werden:

1 Minute	= 1 min	= 60 s
1 Stunde	= 1 h	= 60 min
1 Tag	= 1 d	= 24 h.

Dieser Teilung liegt im Prinzip ein 12er-System mit der neuen Einheit bei 60 zugrunde und entspricht dem System der Sumerer (vgl. Kap. 2). Das wird noch deutlicher, wenn man bedenkt, daß die beiden Taghälften „Tag" und „Nacht" im Mittel eine Dauer von 12 Stunden haben. Interessant ist die Tatsache, daß die Dauer einer Stunde sehr gut mit der Dauer unseres „Gegenwarts"gedächtnisses (mittelfristiges Gedächtnis, Frischgedächtnis) übereinstimmt. Um den Anschluß an die astronomisch basierten Zeiteinteilungen zu sichern, und weil keine besseren Normale vorhanden waren, wurde die Sekunde als der 86 400ste Teil des mittleren Sonnentages bestimmt. Die dieser in Deutschland seit 1893 geltenden Definition zugrundegelegte Annahme einer konstanten Erdrotation mußte aufgrund modernerer Meßmöglichkeiten aufgegeben werden. Die Festlegung der Sekunde auf dieser Basis war um $\pm 10^{-8}$ s unsicher. Deshalb wurde 1956 die Ephemeridensekunde eingeführt, die sich auf das sogenannte tropische Jahr (Zeitintervall zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt des Himmelsäquators) bezieht. Eine Sekunde ist danach der 31 556 925,9747te Teil des tropischen Jahres für den 0. Januar 1900, 12 Uhr Ephemeridenzeit. Damit konnte eine Genauigkeit von 10^{-9} s erreicht werden. Die weitere Erhöhung der Ganggenauigkeit von Uhren zeigte, daß die auf astronomischen Effekten beruhenden Sekundendefinitionen nicht stabil sind (weil die Effekte nicht konstant sind). In Verbindung mit der Notwendigkeit, immer kleinere Zeitintervalle zu messen, führte dies auf die heute gültige Definition, mit der eine Genauigkeit von 10^{-14} s erreicht wird.

Aus den vielfältigen Problemen und Diskussionsthemen zum Phänomen Zeit sollen hier nur einige angedeutet werden. Dazu ist es zunächst nützlich, vier Ausprägungen der Zeit zu unterscheiden:


Zeit in s
Zeit seit dem Urknall
Sonnensystem entsteht
Galaxien entstehen
Universum wird durchsichtig
Materie entsteht
Photonenära
He und H_2 entstehen
Leptonenära
Hadronen entstehen
Planckzeit < 10^{-32} s
Halbwertszeit $^{232}_{90}Th$
Austauschzeiten
Salze im Meer
Weltmeerwasser
O_2-Kreislauf
CO_2-Kreislauf
Lebensdauer von freien Neutronen
Photosynthese
CO_2-Assimilation
Akkumulation
Produkte
Zeitauflösung
Speicheroszillograph
Breitbandoszillograph
Wanderfeldoszillograph
Samplingoszillograph
Bildwandler
10^{20}
10^{10} a
10^{15}
10^{5} a
10^{10}
a
10^{5}
d
h
min
1
ms
10^{-5}
µs
ns
10^{-10}
ps
10^{-15}
10^{-20}
10^{-25}
Lebensdauer des Elektrons >10^{32} a
Alter der Welt
Alter der Erde
Leben auf Erde beginnt
Dinosaurier
Menschheit
australischer Baum
Mammutbaum
Eiche
Mensch
Hund
Maus
Qualle
Lebensdauer
Eintagsfliege
Kurzzeitgedächtnis
Traumdauer
Gegenwartsgedächtnis
Herzschlag
Flugmuskelkontraktion bei der Fliege
Mittelwellen
Ionen-Wechselwirkung H-Bindung
Ultrakurzzeit-spektroskopie
Umlaufzeit des Elektrons
Lichtweg durch Atom
Eigenrotation des Protons
Lichtweg durch Atomkern, Elementarzeit
Lebensdauer von Sternen
geologische Prozesse
Bestand von Hochkulturen
ökologische Prozesse
Lichtweg Erde – Sonne
Lichtweg Erde – Mond

- die subjektive Zeit,
- die auf absolute Zeitpunkte bezugnehmende Zeit (solche Zeitpunkte sind u.a. Christi Geburt, der Urknall, die Bronzezeit, der Barock),
- die auf mehr oder weniger willkürlich gesetzte Startpunkte bezogene Zeit (Verzögerungszeit, Totzeit bei Regelungen, Lieferzeit, Taktzeit, Erntezeit, Mittagszeit, Regenzeit usw.),
- die Dauer von Prozessen beschreibende Zeit (Reaktionszeit, Halbwertszeit radioaktiver Zerfälle, Laufzeit, Meßzeit, Belichtungszeit, Fahrzeit, Einschwingzeit, Probezeit usw.).

Unter subjektiver Zeit soll hier das individuelle Zeitempfinden verstanden werden, das bis ins 17. Jahrhundert hinein die Vorstellung von Zeit stark prägte. Dies ist heute noch in Redewendungen wie „lange Weile" oder „die Zeit vergeht wie im Fluge" zu erspüren. Das mittelalterliche Glockenläuten zu bestimmten Tageszeiten und auch der in Klöstern herrschende feste Rhythmus der Gebetszeiten waren erste Anfänge einer Synchronisation des Tagesablaufes für größere Menschengruppen. Unsere stark technisierte Welt mit einer hohen gegenseitigen Verflechtung hat zu einem „Diktat" der Zeit geführt. Voraussetzung dafür war der Eintritt des ersten selbstlaufenden Automaten – der Uhr – in die Menschheitsgeschichte. Es ist übrigens eine Maschine, die im Gegensatz zu den vorangegangenen keine Verstärkung unserer physischen Leistungen erbringt (wir haben auch kein Sinnesorgan für Zeitwahrnehmung). Joseph Weizenbaum charakterisiert diesen Zeitpunkt als den, von dem an sich der Mensch immer mehr den Automaten unterordnet und der Computer ist dann nur eine Konsequenz dieser Entwicklung. Doch noch einmal zurück zur subjektiven Zeit. Sie gibt eine nicht objektivierbare Empfindung wieder, die stark von den im betrachteten Zeitintervall herrschenden Emotionen geprägt ist. Thomas Mann hat dies in seinem Roman „Der Zauberberg" literarisch eingefangen und seine Helden sehr interessante Dialoge zur subjektiven Zeit führen lassen. Die subjektive Zeit hat, physikalisch gesprochen, keine konstante Ablaufgeschwindigkeit.

Die anderen drei Zeitverständnisse gehen davon aus, daß die Zeit gleichförmig in einer bestimmten Richtung abläuft. Das bedeutet, sie hat eine konstante Geschwindigkeit und ist nicht umkehrbar (irreversibel). Die mögliche Änderung der Geschwindigkeit des Zeitpfeils, auf die die Relativitätstheorie hinweist, ist für die Bedingungen des täglichen Lebens aufgrund der geringen Größe des Effekts unbedeutend.

Viele Ereignisse sind trotz ihres Ablaufs in einer Richtung wiederholbar. Hierauf gründet wesentlich das Verständnis der Physik (Reproduzierbarkeit von Experimenten) und darauf baut auch unsere Technik auf. Was einmal geschah, muß sich auch wiederholen lassen. Unter Umständen sind dafür Anfangs- und Randbedingungen sowie andere Abhängigkeiten zu präzisieren. Wie falsch diese Auffassung ist, zeigt ein Gedankenexperiment von Weizenbaum, das hier leicht modifiziert wiedergegeben sei.

Jemand hat am Roulett den Hauptgewinn erreicht. Dies muß doch eine präzise Ursache gehabt haben. Daher rekonstruiert er schrittweise die Voraussetzungen und hofft so, eines Tages ständig Hauptgewinne zu realisieren. Er tut alles natürlich mit „wissenschaftlicher" Akribie. Er hatte damals eine bunte Krawatte um – also auf zum Versuch mit der bunten Krawatte. Da dies ohne Erfolg blieb, rekonstruiert er weiter.

Hinter ihm stand eine blonde Frau – also zum nächsten Versuch mit bunter Krawatte und blonder Frau. Auch dieser Versuch ist erfolglos. Nun werden immer weitere Versuche mit zusätzlich einbezogenen Parametern durchgeführt. Sollte er auf diese Weise eines Tages wieder gewinnen – hat er dann die Parameter für einen ständigen Hauptgewinn? Unsere Vernunft sagt nein. Was hat es nun mit der Wiederholbarkeit in der Zeit auf sich?

Wir beobachten immer wiederkehrende Erscheinungen, wie z.B. die Jahreszeiten. In der Physik und der Technik wird von periodischen Vorgängen (z.B. Schwingungen) gesprochen. Offensichtlich wird der Zeitpfeil hier durch gröbere Effekte überdeckt. Jede Schwingung muß durch Energiezufuhr aufrecht erhalten werden. In dieser Energiezufuhr ist der Zeitpfeil wieder enthalten. Auch die astronomischen periodischen Vorgänge bedürfen einer Energiezufuhr, nur daß wir hier durch die ungeheuren Dimensionen den darin enthaltenen Zeitpfeil i. allg. nicht wahrnehmen.

Es gibt auch Prozesse, deren Zeitablauf formal umkehrbar ist, sie heißen reversibel. Eine Tür kann man beliebig öffnen und schließen. Viele Motoren können rechts und links herum betrieben werden. Die einfachste Testmöglichkeit, ob ein Prozeß reversibel ist, besteht darin, ihn zu filmen. Gibt der Rückwärtslauf des Filmes auch einen real möglichen Prozeß wieder, so haben wir einen reversiblen vor uns. Auf dieser formalen Umkehrbarkeit des Zeitpfeiles basiert die klassische Mechanik. Ihre Gleichungen sind gegenüber einem Vorzeichenwechsel der Zeit invariant (damit ist die Zeit in ihr nur ein Parameter). Die Thermodynamik machte dann mit ihrer Betrachtung der Möglichkeiten des Energieflusses darauf aufmerksam, daß diese Zeitinvarianz keine Naturgegebenheit darstellt. Die daraus erwachsene Diskussion um Stellung und Charakter der Zeit ist bis heute nicht beendet und erhält immer wieder neue Facetten.

Bestimmte Zeiträume sind nur mittels besonderer Methoden meßbar. Das betrifft einmal die Zeitdifferenzen physikalischer Effekte, die einen sehr kleinen Wert haben und damit auch besonders empfindliche und genaue Verfahren benötigen. Auf der anderen Seite betrifft das geologische und archäologische Zeitspannen. Bei diesen besteht das Problem, daß man den Zeitablauf nicht direkt messen kann, sondern durch Vergleich bestimmter Zustände auf die vergangene Zeitspanne schließen muß.

Die relativistische Zeitabweichung einer Uhr hängt von ihrer Geschwindigkeit v ab, mit der sie sich relativ zu einer Uhr in einem ruhenden Bezugssystem bewegt. Für das Verhältnis der von beiden Uhren angezeigten Zeit gilt dann

$$t / t' = \sqrt{1 - (v / c)^2}$$

mit c als Vakuumlichtgeschwindigkeit. Wie gering diese Zeitabweichung selbst unter außergewöhnlichen Erdbedingungen ist, soll folgendes Beispiel zeigen. Im Jahre 1971 flog eine extrem genaue Cs-Atomuhr 15 Stunden an Bord eines Flugzeuges mit 278 m/s. Sie zeigte gegenüber einer identischen Uhr auf der Erde danach eine Zeitverkürzung von $4{,}7 \cdot 10^{-8}$ s. Das entspricht genau der erwarteten Zeitdilatation. Andererseits können beachtliche (mehr als tausendfache) Verlängerungen der Lebensdauer von Elementarteilchen auftreten, wenn diese nahezu mit Lichtgeschwindigkeit fliegen. So könnten z.B. bei der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre

entstehende Müonen mit ihrer mittleren Lebensdauer von 2,2 µs die Erdoberfläche nicht erreichen. Aufgrund ihres Fluges mit 0,9998facher Lichtgeschwindigkeit sind sie auf der Erdoberfläche als Bestandteil der sekundären Komponente der kosmischen Strahlung mit einer Energie von ca. 5 GeV nachzuweisen.

Archäologische Zeiten werden mit Methoden der Radiodatierung oder der magnetischen Uhr bestimmt. Letztere beruht darauf, daß beim Erstarren des Magmas dieses die Richtung der Erdmagnetfeldes annimmt. Im Laufe der Erdgeschichte hat sich dieses Feld aber in seiner Richtung erheblich geändert. Durch Vergleich der mittels anderer Methoden vorgenommenen Datierung bestimmter Feldrichtungen kann dann auf die geologisch vergangene Zeit geschlossen werden. Für die Radiodatierung haben besonders zwei Methoden Bedeutung. Bei der Radio-Carbonmethode wird davon ausgegangen, daß die Isotope ^{14}C und ^{12}C in der Luft seit jeher im konstanten Verhältnis vorhanden sind. Mit diesem Verhältnis stirbt auch eine Pflanze. Aufgrund der unterschiedlichen Halbwertszeiten beider Isotope nimmt von da an der ^{14}C-Anteil ab. Aus dem Verhältnis beider Isotope ist das Alter bestimmbar. Bei der Untersuchung von Gesteinsmagma kann auch das Verhältnis der Isotope ^{207}Pb und ^{206}Pb genutzt werden, da das in der Natur vorkommende instabile Isotop ^{238}U mit unterschiedlichen Halbwertszeiten in die beiden Bleiisotope zerfällt.

Der Kalender stellt die Zeitmessung vor ein besonderes Problem. Da die Umlaufzeit der Erde (Jahr) in keinem rationalen Verhältnis zu ihrer Eigenrotation (Tag) steht, gehören genaugenommen auch Bruchteile eines Tages zu einem Jahr. Das zwang zu immer wiederkehrenden Anpassungen des Kalenders an den natürlichen Ablauf. Die letzte große Anpassung war die Einführung des Gregorianischen Kalenders, da das Osterfest als wichtigstes christliches Fest (dessen Berechnungsgrundlagen astronomischer Natur sind) sich im Gang der Jahreszeiten immer mehr verschob. Heute wird durch ein raffiniertes System von Schaltjahren, bei denen zusätzliche Tage eingeschoben werden, eine kontinuierliche Anpassung von Zeitrechnung und natürlichem Jahreslauf gewährleistet.

Die im Kalender verwendeten Einheiten sind auch die einzige Abweichung von der Basiseinheit und ihrer Vielfachen. In vielen praktischen Fällen wird das Jahr auf 365 Tage gerundet, die Zinsrechnung rundet auf 360 Tage. Ansonsten gelten die folgenden Beziehungen.

1 Minute	= 1 min		= 60 s
1 Stunde	= 1 h	= 60 min	= 3 600 s
1 Tag	= 1 d	= 24 h	= 86 400 s
1 Woche		= 7 d	= 604 800 s
1 Monat		= (28 - 31) d	= ca. 2 500 000 s
1 Jahr	= 1 a	= 365,25 d	= ca. 31 556 925 s.

3.2.1 Frequenz in Hertz ([Frequenz] = Hz)

Es gibt eine große Zahl von Vorgängen, die sich gleichmäßig in der Zeit wiederholen. Die physikalisch am einfachsten zu beschreibenden Vorgänge sind Schwingungen. Wiederholt sich in der Zeit t ein physikalischer Vorgang n-mal, so heißt $\nu = n/t$ seine Frequenz und $T = 1/\nu$ die Periodendauer. Eine besondere Art der Wiederholung liegt bei rotierenden Körpern vor. Hier hat die Größe $\omega = 2\pi\nu$ besondere Bedeutung, sie heißt Kreisfrequenz. Aus dem Zusammenhang zwischen der Periodendauer und der Frequenz wird die mögliche Maßeinheit für letztere deutlich: $[\nu] = s^{-1}$. Dafür wurde zu Ehren des Physikers Heinrich Hertz (1857–1894) die Bezeichnung Hertz eingeführt.

1 Hertz (1 Hz) ist die Frequenz eines periodischen Vorgangs von der Periodendauer 1 s. $1\ \text{Hz} = s^{-1}$.

Die Messung der Frequenz hängt von der Art der Prozesse (elektromagnetisch, mechanisch, akustisch usw.) sowie der damit verknüpften Energie ab.

Ein wichtiges, bei Frequenzmessungen ausgenutztes Phänomen ist das der Resonanz. Dabei wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß jedes System eine bestimmte Resonanzfrequenz hat. Wird das System von außen mit einer Frequenz angeregt, so schwingt es mit der größten Amplitude, wenn die äußere Frequenz gleich der Resonanzfrequenz ist. Dies wird beim Zungenfrequenzmesser ausgenutzt. Er enthält eine Vielzahl unterschiedlich abgestimmter (d.h. unterschiedliche Resonanzfrequenzen besitzende) Metallzungen. Trifft eine zu messende Schwingung auf das Meßgerät, dann schwingt jene Zunge mit der größten Amplitude, deren Resonanzfrequenz am besten mit der zu messenden übereinstimmt. Auch unsere Rundfunk- und Fernsehempfänger benutzen das Resonanzprinzip, um den zu empfangenden Sender auszuwählen. Hier wird die Resonanzfrequenz des Empfängers so abgestimmt, daß nur die Schwingungen des gewünschten Senders ausgewählt werden. Auch unser Gehör besitzt im Cortischen Organ eine betont frequenzselektive Eigenschaft, beim Auge ist die Frequenzselektion (Farbsehen) an die drei Rezeptorentypen (Zapfen) für Rot, Grün und Blau gebunden, die durch additive Farbmischung (entspricht einer Frequenzmischung) alle Farbwahrnehmungen ermöglichen.

Ein zweites universelles Meßprinzip ist das Zählen der Schwingungen in einer vorgegebenen Zeit. Solche Zähler finden sich vor allem in der präzisen elektronischen Meßtechnik. Nichtelektrische Schwingungen werden dann zur Messung einfach durch Wandler in elektrische transformiert. Der Meßbereich ist hier von einigen Schwingungen pro Minute bis über den MHz-Bereich hinaus wählbar. Ein besonderer Vorteil dieses Prinzips wird bei relativ stark schwankenden Frequenzen deutlich. Durch die Wahl einer hinreichend langen Meßzeit wird ein statistischer Mittelwert für die Schwingung erhalten. Oft weisen auch die Angaben von Umdrehungen pro Sekunde, pro Minute oder pro Stunde auf diese Meßmethode hin. Diese der Frequenz äquivalente Maßeinheit wird vorwiegend bei mechanischen Bewegungen angewandt und ist uns von den Drehzahlmessern in den Autos bekannt. An dieser Stelle existiert eine

Verbindung zur Skale der Größe Geschwindigkeit. Rotationsbewegungen werden oft mit der sogenannten Winkelgeschwindigkeit gemessen, die die Anzahl der Umdrehungen (statt der zurückgelegten Strecke) pro Zeiteinheit angibt. Das ist dann letztlich wieder eine Frequenz. Der Bezug zu einer bei dieser Bewegung zurückgelegten Strecke wird über die Bahn eines Punktes auf dem rotierenden Körper hergestellt und es gilt zwischen Bahngeschwindigkeit v_B und Winkelgeschwindigkeit ω die Beziehung $v_B = r\omega$.

Bei den elektromagnetischen Schwingungen stehen über zwei wichtige Beziehungen noch andere Wege zur Bestimmung der Frequenz offen. Einmal kann nach Bestimmung der Wellenlänge mittels der Beziehung $f = c/\lambda$ unter Verwendung der Lichtgeschwindigkeit die Frequenz bestimmt werden. Der andere Weg bestimmt die Energie von (Licht)Quanten und man erhält mittels der Beziehung $\nu = E/h$ (h ist die Plancksche Konstante) die Frequenz. Es sei darauf hingewiesen, daß die Frequenz in der Elektrotechnik i. allg. mit dem Symbol f bezeichnet wird, in der Optik und Mechanik hingegen i. allg. mit ν.

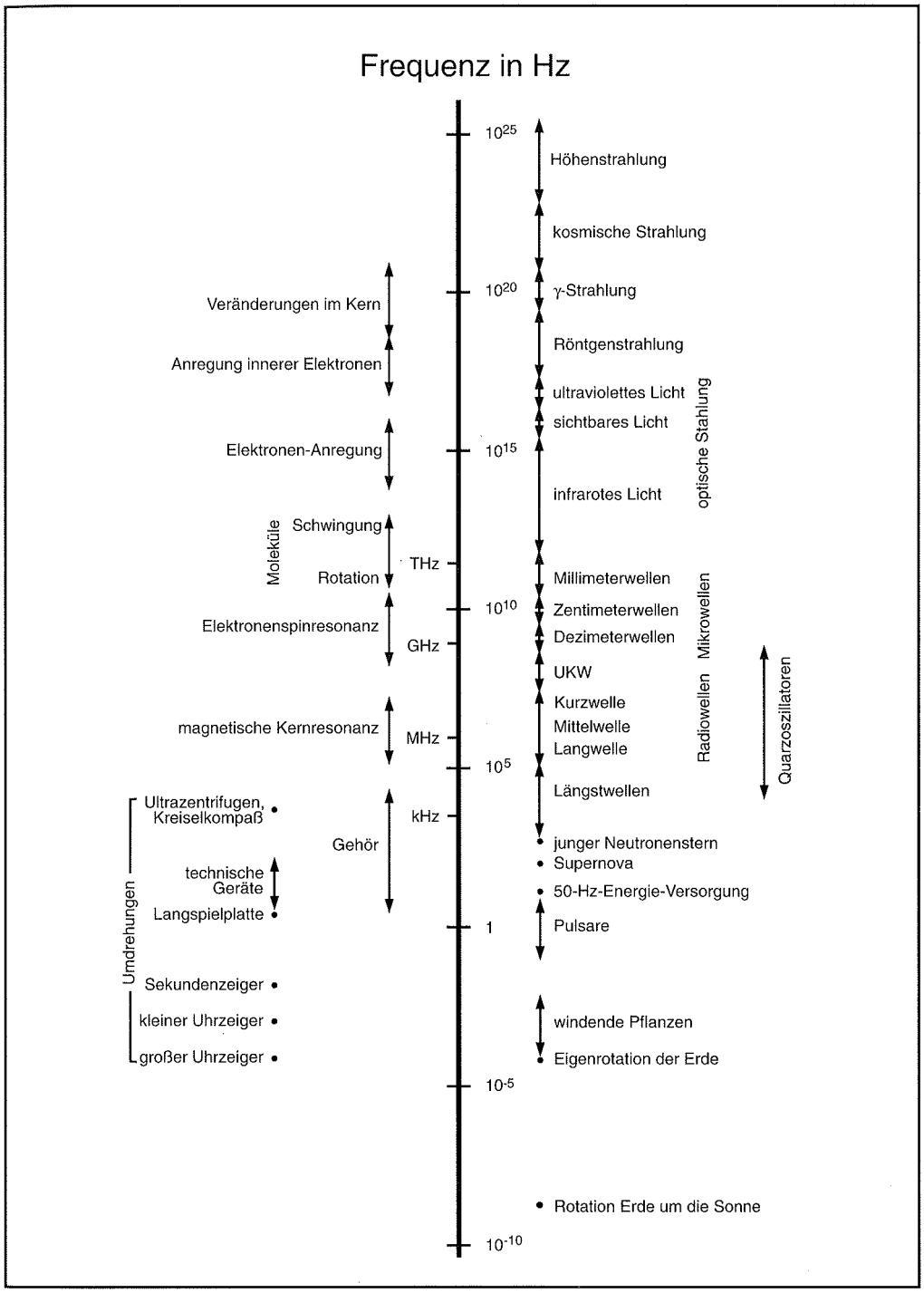
Der Bereich der elektromagnetischen Schwingungen ist extrem groß. Von den Längstwellen bis zu den Millimeterwellen nutzen wir sie zur drahtlosen Übertragung von Nachrichten und Daten. Daran schließt sich das infrarote Licht an, welches in der Wärmestrahlung enthalten ist und bei der Lichtleitertechnik genutzt wird. Dann folgt ein relativ enger Frequenzbereich, den wir als die Spektralfarben des Lichtes wahrnehmen. Existieren alle diese sichtbaren Frequenzen gleich stark, so nehmen wir weißes (farbloses) Licht war. Es folgt im Spektrum das ultraviolette Licht, das u.a. unsere Haut bräunt, aber auch in größeren Dosen jedes Leben negativ beeinflussen kann. In der weiteren Reihenfolge finden wir mit steigender Frequenz Röntgenstrahlung, Gammastrahlung, Kosmische Strahlung und Höhenstrahlung. Die Skale weist außer diesem Spektrum der elektromagnetischen Strahlung auch aus, was die jeweilige Strahlung in der Physik bewirkt und welche Meßmethoden daraus abgeleitet werden können.

Ein wichtiger Bereich der mechanischen Schwingungen sind die akustischen. Wir unterscheiden beim Schall vier Bereiche:

Infraschall	< 20 Hz
Hörschall	20 Hz bis 20 kHz
Ultraschall	20 kHz bis 10^{10} Hz
Hyperschall	$> 10^{10}$ Hz.

Der Infraschall hat u.a. bei Erdbeben und der Erderkundung Bedeutung. Ultraschall hat viele Anwendungen, u.a. in der medizinischen und technischen Diagnostik, als Echolot, für akusto-elektronische Bauelemente sowie zur Reinigung von Substanzen und Oberflächen. Der Hyperschall wird von allen Stoffen stark absorbiert, da in diesem Frequenzbereich keine elastischen Molekülschwingungen mehr möglich sind.

Beim Hörschall, also in der üblichen Akustik, empfinden wir viele Frequenzen als musikalische Tonhöhen. Schon den Griechen war bekannt, daß die Länge einer Saite für die durch sie bei Schwingung abgegebene Tonhöhe maßgebend ist. Der Kammerton a mit 440 Hz ist für alle europäische Musik der eigentliche Bezugspunkt. Diese


Frequenz in Hz
10^{25}
Höhenstrahlung
kosmische Strahlung
10^{20}
γ-Strahlung
Röntgenstrahlung
ultraviolettes Licht
sichtbares Licht
optische Strahlung
10^{15}
infrarotes Licht
Millimeterwellen
Zentimeterwellen
Dezimeterwellen
UKW
Kurzwelle
Mittelwelle
Langwelle
Mikrowellen
Radiowellen
10^{10}
10^{5}
Längstwellen
junger Neutronenstern
Supernova
50-Hz-Energie-Versorgung
Pulsare
1
windende Pflanzen
Eigenrotation der Erde
10^{-5}
Rotation Erde um die Sonne
10^{-10}
Quarzoszillatoren
Veränderungen im Kern
Anregung innerer Elektronen
Elektronen-Anregung
Moleküle
Schwingung
Rotation
THz
Elektronenspinresonanz
GHz
magnetische Kernresonanz
MHz
kHz
Gehör
Ultrazentrifugen, Kreiselkompaß
technische Geräte
Langspielplatte
Umdrehungen
Sekundenzeiger
kleiner Uhrzeiger
großer Uhrzeiger

Frequenz variiert allerdings etwas im Laufe der Geschichte und ist auch von Orchester zu Orchester verschieden. Die meisten Menschen vermögen jedoch nur Intervalle und Harmonien und nicht die absolute Tonhöhe zu hören. Dies können nur die wenigen Menschen mit absolutem Gehör und auch nur in jenem Bereich, wo ihnen Notenbezeichnungen zur Verfügung stehen. Die musikalischen Intervalle standen ursprünglich in einem ganzzahligen Verhältnis. Dies brachte Probleme beim Musizieren, da je nach gespielter Tonart die Instrumente neu gestimmt werden mußten. Zu Bachs Zeiten wurde daher die wohltemperierte Stimmung mit Halbtonschritten gemäß der 12. Wurzel aus 2, also rund 1 : 1,0595 eingeführt. Hierdurch werden die reinen Intervalle nur mit guter Näherung erfaßt. Dafür wurde es so aber möglich, ohne Neustimmung alle Tonarten auf dem Flügel zu spielen. Die folgende Übersicht faßt alle (heutigen) Intervalle zusammen. Dabei wurde auch der Halbton- und Ganztonschritt hinzugefügt. Die alten diatonischen Intervalle sind durch einen * gekennzeichnet.

Ganzton	9 : 8	Sekunde, klein	16 : 15
Ganzton, klein	10 : 9	Septime, groß*	15 : 8
Halbton	16 : 15	Septime, klein	9 : 5
Oktave*	2 : 1	Septime, klein	16 : 9
Prime*	1 : 1	Sexte, groß*	5 : 3
Quarte*	4 : 3	Sexte, klein	8 : 5
Quinte*	3 : 2	Terz, groß*	5 : 4
Sekunde, groß*	9 : 8	Terz, klein	6 : 5
Sekunde, groß	10 : 9		

Für die eingestrichene Oktave gelten in der temperierten Stimmung mit a = 440 Hz die folgenden Frequenzen:

c	261,63 Hz	fis, ges	369,99 Hz
cis, des	277,18 Hz	g	392,00 Hz
d	293,67 Hz	gis, as	415,30 Hz
dis, es	311,13 Hz	a	440,00 Hz
e	329,63 Hz	ais, b	466,16 Hz
f	349,23 Hz	h	493,88 Hz

Leider hören wir die Intervalle nicht in allen Frequenzbereichen gleich gut. Viele Untersuchungen zeigten, daß dies mit der nichtlinearen Abbildung der Frequenzen in der Schnecke unseres Ohres zusammenhängt. Nur im mittleren Frequenzbereich ist die Unterscheidbarkeit logarithmisch. Bei tiefen Frequenzen ist sie dagegen etwa linear. Deshalb wurden Bark und Mel als spezielle Maßeinheiten für die Tonunterscheidung eingeführt. Es gilt 1 Bark = 100 Mel. 131 Hz sind mit 131 Mel der Bezugspunkt. Die Linearität reicht bei 20 Hz beginnend bis etwa 500 Hz. Von da ab ist die Mel-Skala etwa logarithmisch geteilt und erreicht bei 20 000 Hz etwas mehr als 2000 Mel. Der Mensch vermag also rund 2000 Tonhöhen zu unterscheiden.

Eng mit der Frequenzanalyse hängt die Fourieranalyse zusammen. Akustische Signale und viele andere Erscheinungen haben einen bestimmten zeitlichen Verlauf,

der meist auch viele periodische Anteile enthält. Darüber hinaus existieren viele Frequenzen gleichzeitig. Die Gesamtheit dieser Frequenzen nennt man Spektrum und z.B. jedes Musikinstrument besitzt ein typisches Spektrum. Es ist nun wichtig, dieses Frequenzgemisch analysieren zu können. Das Grundprinzip stellt die mathematische Fourieranalyse zur Verfügung. So wie sie mathematisch auf vielfältige Weise realisiert werden kann (u.a. FFT und DFT), so ist sie auch recht unterschiedlich in technischen Geräten realisiert. Auffällig ist jedoch, daß unser Gehör nach einem anderen Prinzip funktioniert und wesentlich schneller – als es selbst theoretisch mit der Fourieranalyse möglich ist – die Tonhöhe erkennt.

3.2.2 Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde ([Geschwindigkeit] = m/s)

Bewegung ist eines der verbreitetsten Phänomene. Neben ihrem Auftreten in den natürlichen Prozessen hat die moderne Gesellschaft einen Zwang zur Mobilität erzeugt, der die Bewegung einer großen Zahl von Menschen und noch mehr einer enormen Menge von Informationen zur Folge hat. Dabei geht es auch zunehmend darum, bestimmte Entfernungen in immer kürzeren Zeitspannen zu bewältigen. Ein Maß dafür, wie schnell Entfernungen überwunden werden können, ist die Geschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit ist eine physikalische Größe, die angibt, in welcher Zeitspanne von dem sich bewegenden Objekt eine bestimmte Wegstrecke zurückgelegt wird. Sie ist eine zentrale Größe der Kinematik, eines Teilgebietes der Physik. Betrachtet man eine Wegstrecke Δs, die in der Zeit Δt zurückgelegt wird, so kann die Geschwindigkeit für diese Wegstrecke mittels $v = \Delta s/\Delta t$ bestimmt werden. Da im allgemeinen keine gleichförmige Bewegung vorliegt, ist dies eine mittlere Geschwindigkeit. Aus diesem Grunde wird die Geschwindigkeit als Grenzwert dieses Quotienten und dann schließlich als Differential definiert:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\, s}{\mathrm{d}\, t}.$$

Auf den vektoriellen Charakter der Geschwindigkeit soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Damit ergibt sich aus der Kombination der Basiseinheiten für die Länge und die Zeit entsprechend der obigen Gleichung die Maßeinheit der Geschwindigkeit:

1 Meter pro Sekunde (1 m/s) ist die gleichförmige Geschwindigkeit, mit der ein Körper die Strecke von 1 m in der Zeit von 1 s zurücklegt.

Eine Welt ohne Bewegung ist nicht vorstellbar. Und doch zeigen sich beim tieferen Eindringen in das Wesen dieses Phänomens Probleme, die schon das antike Griechen-

land beschäftigt haben. Bekannt geworden sind die zum Beweis der Unmöglichkeit von Bewegung ersonnenen Paradoxien des Zenon:

> Ein Pfeil kann nur an einem Ort sein, dann ist er aber an diesem Ort in Ruhe und nicht in Bewegung. Für die Bewegung müßte er gleichzeitig an mehreren Orten sein können.
>
> Ein Gegenstand muß, bevor er ans Ende seiner Bahn kommen kann, erst die Hälfte der Strecke zurücklegen und zuvor die Hälfte der halben Strecke usw. bis ins Unendliche – deshalb ist Bewegung nicht möglich.
>
> Achilles kann die von ihm verfolgte Schildkröte nicht überholen. Immer wenn Achilles die Hälfte des der Schildkröte gewährten Vorsprungs zurückgelegt hat, ist diese auch schon wieder ein Stück weiter. Damit bleibt immer ein, wenn auch kleiner werdender, Abstand zwischen Achilles und der Schildkröte.

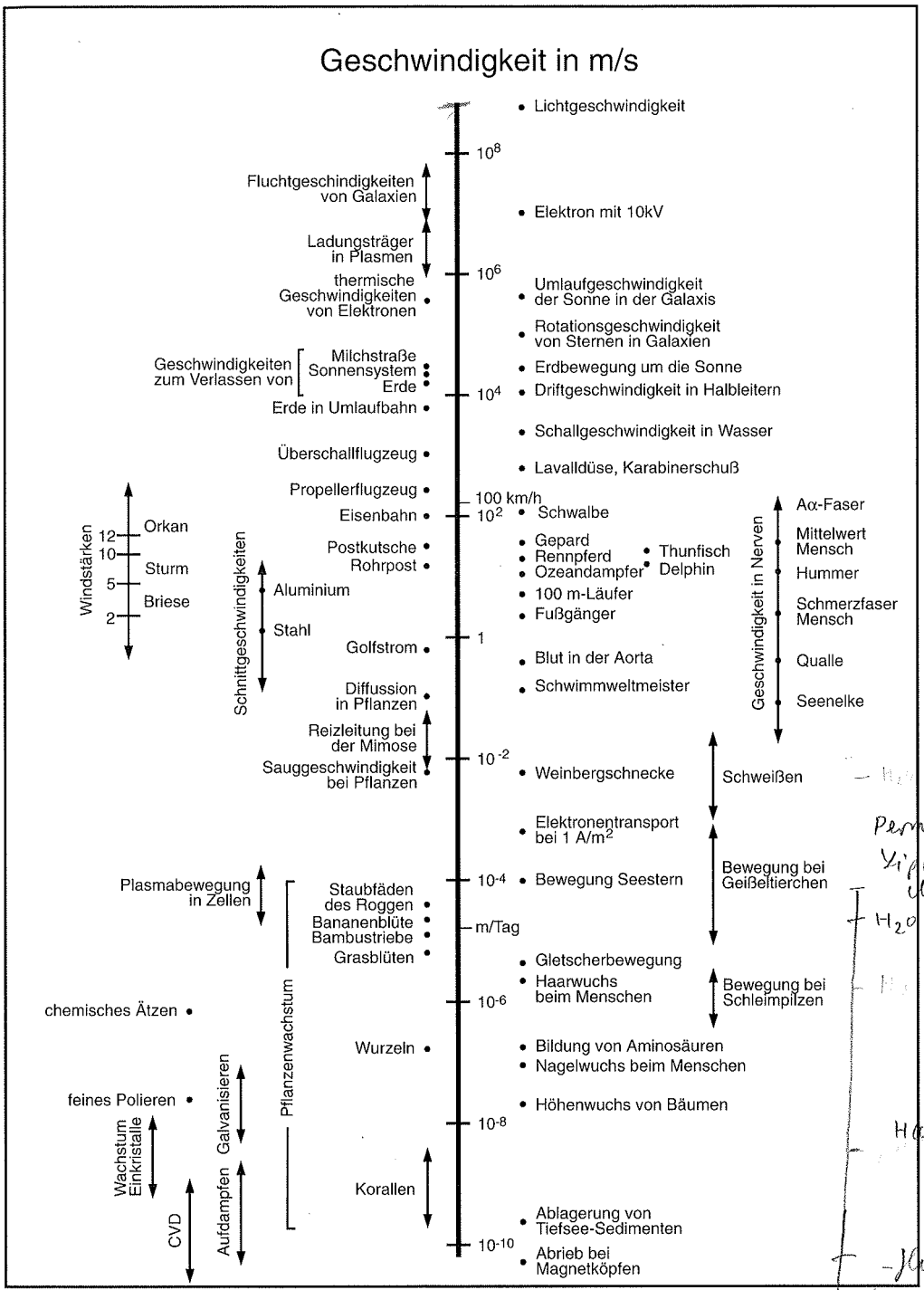
Wird Bewegung als Ortsveränderung gesehen, als Prozeß, um vom Ort A den Ort B zu erreichen, so sagen Zenons Paradoxien, das dies nicht möglich ist (Achilles erreicht die Schildkröte nie) und daraus wird die Unmöglichkeit der Bewegung abgeleitet. Dem gesunden Menschenverstand und der praktischen Erfahrung erscheinen solche Überlegungen scholastisch. Sie waren immerhin Ausgangspunkt einer intensiven philosophischen Diskussion in der Antike, die erst Aristoteles mit der Einführung der Kontinuumsbetrachtung zu einer Lösung führen konnte.

Die physikalisch befriedigende Lösung war erst mittels der Differentialrechnung möglich, weil hier die „Momentanbetrachtung" mathematisch beschreibbar wird. Die Entwicklung dieses Kalküls und sein Siegeszug in der Physik korreliert eng mit der Möglichkeit, kleine Zeitspannen messen zu können (die Messung kleiner Längen war schon eher möglich).

Die Vielzahl dessen, was sich bewegen und für das man damit auch eine Geschwindigkeit angeben kann, ist enorm. Natürlich bewegen sich Menschen, Tiere, beliebig geformte Körper mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die Erde dreht sich um sich selbst und läßt so Tag und Nacht erscheinen. Sie bewegt sich weiterhin um die Sonne und läßt dabei infolge der Neigung ihrer Achse Frühling, Sommer, Herbst und Winter entstehen. Die Sonne wiederum bewegt sich innerhalb der Milchstraße und so fort.

Auch das Strömen der Luft z.B. als Wind oder das Fließen von Wasser in Röhren sind Bewegung. Ein Kind wächst und wird größer, wir können eine Wachstumsgeschwindigkeit angeben. Auch bei Pflanzen können wir messen, um wieviel Zentimeter sie pro Tag wachsen. Der gegenläufige Prozeß, das Vermindern von Länge, ist auch mit charakteristischen Geschwindigkeiten verbunden, die solche technischen Prozesse wie Fräsen, Schleifen, Polieren oder Ätzen beeinflussen.

Mem Brauer Schmidt Physik S. 5


Geschwindigkeit in m/s
Lichtgeschwindigkeit
10^8
Fluchtgeschindigkeiten von Galaxien
Elektron mit 10kV
Ladungsträger in Plasmen
10^6
thermische Geschwindigkeiten von Elektronen
Umlaufgeschwindigkeit der Sonne in der Galaxis
Rotationsgeschwindigkeit von Sternen in Galaxien
Geschwindigkeiten zum Verlassen von
Milchstraße
Sonnensystem
Erde
Erdbewegung um die Sonne
10^4
Driftgeschwindigkeit in Halbleitern
Erde in Umlaufbahn
Schallgeschwindigkeit in Wasser
Überschallflugzeug
Lavalldüse, Karabinerschuß
Propellerflugzeug
100 km/h
10^2
Eisenbahn
Schwalbe
Windstärken
12 Orkan
10 Sturm
5 Briese
2
Schnittgeschwindigkeiten
Aluminium
Stahl
Postkutsche
Rohrpost
Gepard
Rennpferd
Ozeandampfer
Thunfisch
Delphin
100 m-Läufer
Fußgänger
Geschwindigkeit in Nerven
Aα-Faser
Mittelwert Mensch
Hummer
Schmerzfaser Mensch
Qualle
Seenelke
Golfstrom
1
Blut in der Aorta
Schwimmweltmeister
Diffussion in Pflanzen
Reizleitung bei der Mimose
Sauggeschwindigkeit bei Pflanzen
10^{-2}
Weinbergschnecke
Schweißen
Elektronentransport bei 1 A/m²
Plasmabewegung in Zellen
Staubfäden des Roggen
Bananenblüte
Bambustriebe
Grasblüten
10^{-4}
Bewegung Seestern
Bewegung bei Geißeltierchen
m/Tag
Pflanzenwachstum
Gletscherbewegung
Haarwuchs beim Menschen
Bewegung bei Schleimpilzen
chemisches Ätzen
10^{-6}
Wurzeln
Bildung von Aminosäuren
Nagelwuchs beim Menschen
Höhenwuchs von Bäumen
feines Polieren
Wachstum Einkristalle
Galvanisieren
Aufdampfen
CVD
10^{-8}
Korallen
Ablagerung von Tiefsee-Sedimenten
10^{-10}
Abrieb bei Magnetköpfen

Es existiert eine Art Hierarchie von Bewegungen, die durch bestimmte Größenordnungen der in ihnen vorkommenden Geschwindigkeiten charakterisiert ist. Am interessantesten ist für den Menschen der Bereich der technisch erreichbaren Geschwindigkeiten. Die Skale zeigt deutlich, daß dieser Bereich immerhin vierzehn Zehnerpotenzen umfaßt. Auch die in der Biosphäre vorkommenden Geschwindigkeiten umfassen immerhin elf Zehnerpotenzen.

Die Grenze zu den kleinen Geschwindigkeiten wird dann erreicht, wenn Beobachtungszeit oder Meßgenauigkeit nicht mehr ausreichen, um die Änderungen aufgrund von Bewegungen noch wahrzunehmen. Auch für die technische Umsetzung kleiner Geschwindigkeiten liegt die Grenze dort, wo eine Streckenänderung nicht mehr beliebig klein gemacht werden bzw. der Prozeß nicht beliebig langsam verlaufen kann.

Dagegen existiert hier eine Obergrenze für erreichbare Geschwindigkeiten, die Vakuumlichtgeschwindigkeit. Dies folgt aus der speziellen Relativitätstheorie Einsteins. Ein Körper kann durch Beschleunigung (siehe Abschn. 3.2.3) niemals die Lichtgeschwindigkeit erreichen (weil seine Masse immer größer wird, vgl. Abschn. 3.3). Nur die Photonen (die Lichtquanten) existieren mit Lichtgeschwindigkeit (ihre Ruhmasse ist dementsprechend auch null). Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist damit die Grenzgeschwindigkeit für die Ausbreitung von Wirkungen. Es gibt durchaus in der Physik auch (virtuelle) Geschwindigkeiten, für die diese Beschränkung nicht gilt (z.B. die Phasengeschwindigkeit einer Welle), mit ihnen ist aber keine Verknüpfung zwischen Ursache und Wirkung möglich.

Zum Abschluß seinen noch einige übliche Geschwindigkeitsmaßeinheiten mit ihrer Umrechnung in m/s aufgeführt.

1 km/h			= 0,277778 m/s	
1 m/h			= 0,277778 mm/s	
1 m/min			= 1,667 cm/s	
1 Knoten	= 1 kn	= 1 sm/h	= 0,514444 m/s	
1 ft/s			= 0,3048 m/s	
1 mile per houre		= 1 mi/hr	= 0,447 m/s	(auch: 1 mi/hr = 1 mphr)
1 Yard per second		= 1 yd/s	= 0,9144 m/s	

Für das Verhältnis der Geschwindigkeit eines Körpers zur Schallgeschwindigkeit in dem betrachteten Medium wurde die Machzahl (oder Machsche Zahl) M oder Ma eingeführt. $M > 1$ bedeutet, daß die Körpergeschwindigkeit größer ist als die Schallgeschwindigkeit, $M < 1$ bedeutet, sie ist kleiner als die Schallgeschwindigkeit. Für Luft bei 20 °C gilt

$$M = 1 \approx 340 \text{ m/s} \approx 1\,200 \text{ km/h}.$$

3.2.3 Beschleunigung in Meter pro Sekunde zum Quadrat ([Beschleunigung] = m/s^2)

Die Geschwindigkeit muß nicht immer konstant sein. Damit wird es interessant, ein Maß für die Änderung der Geschwindigkeit zu erhalten. Das Vorgehen ist analog dem der Definition der Geschwindigkeit als Maß der Ortsveränderung. Die Geschwindigkeitsänderung Δv in einem bestimmten Zeitintervall Δt heißt Beschleunigung $a = \Delta v/\Delta t$. Zur Definition wird aus denselben Gründen wie bei der Geschwindigkeit wieder über den Grenzwert schließlich das Differential des Quotienten gewählt:

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}\, t^2}.$$

Es muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß sowohl Geschwindigkeit wie auch Beschleunigung vektorielle Größen sind, d.h., neben ihrem durch Zahl und Maßeinheit ausgedrückten Betrag besitzen sie noch eine Richtung. Diese Richtung ist für unsere Betrachtung der Maßzahlen enthaltenden Skalen nicht von Interesse. Bei der Beschleunigung tritt aber folgende Besonderheit auf. Die Beschleunigung ist definiert als Änderung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit. Diese Änderung kann auch darin bestehen, daß die Geschwindigkeit nur ihre Richtung ändert, ihren Betrag aber beibehält. Dies ist z.B. bei einer gleichmäßigen Kreisbewegung der Fall. Die Geschwindigkeit ändert ständig ihre Richtung, wobei sie ihren Betrag beibehält. Für diesen Prozeß existiert natürlich auch eine Beschleunigung.

Entsprechend der obigen Definition der Beschleunigung ergibt sich die Maßeinheit für die Beschleunigung:

1 Meter pro Sekunde zum Quadrat (1 m/s^2) ist die Beschleunigung, bei der sich innerhalb der Zeitspanne von 1 s die Geschwindigkeit um 1 m/s ändert.

Die entsprechenden Meßverfahren für Beschleunigungen beruhen auf solchen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, in denen die Beschleunigung mit anderen, gut meßbaren Größen verknüpft ist. Neben den Messungen von Geschwindigkeitsänderungen in bestimmten Zeiteinheiten (entsprechend der Definition) wird oft auch der Zusammenhang zwischen Masse, Beschleunigung und der daraus resultierenden Kraftwirkung der Masse herangezogen: $F = m \cdot a$ (2. Newtonsches Axiom).

Besonders wichtig ist dieser Zusammenhang für unsere Erdoberfläche. Durch die Beziehung $F = m \cdot g$ wird die Masse eines Körpers mit seinem Gewicht (der Kraft, mit der er auf eine Unterlage drückt) in Zusammenhang gebracht. Dabei ist g die Fallbeschleunigung auf der Erdoberfläche, nämlich die Beschleunigung, die ein Körper aufgrund des Schwerefeldes der Erde erfährt. g wird auch häufig Erdbeschleunigung genannt, obwohl hier nicht die Erde beschleunigt wird – es ist die durch die Gravitationsanziehung der Erdmasse hervorgerufene Beschleunigungswirkung auf andere Massen gemeint. Da die Größe g auf der Erde (die ja keine homogene Kugel darstellt)

von vielen Faktoren (wie geographische Breite, örtliche Anomalien) abhängig ist, wurde als Normwert

$$g = 9{,}80665 \text{ m/s}^2$$

festgelegt. Dieser Wert gilt recht gut bei etwa 45° geographischer Breite. Ansonsten schwankt g zwischen 9,78 m/s^2 und 9,83 m/s^2.

Aufgrund der Verknüpfung der Beschleunigung über die Geschwindigkeit mit dem zurückgelegten Weg kann man bei bekannter Beschleunigung auch über die Zeitmessung eine Längenbestimmung vornehmen. Erinnert sei an die bekannte Aufgabe, mittels einer Stoppuhr und eines Steines die Tiefe eines Brunnens zu bestimmen. Hier nutzt man die Kenntnis des Wertes der Fallbeschleunigung sowie den Zusammenhang $h = gt^2/2$ zwischen Fallhöhe und Fallzeit aus. Die Zeit, die der Schall benötigt, um vom Auftreffpunkt des Steines zum Brunnenrand zu gelangen, kann bei den herrschenden Geschwindigkeiten vernachlässigt werden.

Die Kenntnis der Beschleunigung ist im Vergleich zu anderen Größen von geringerem praktischen Interesse. Dies drückt sich auch darin aus, daß relativ wenige Daten für die Skale gefunden wurden.

Hohe Beschleunigungswerte werden bewußt bei Stoßwellen und Ultrazentrifugen angewendet. Dadurch wird auch für kleine Massen die Kraftwirkung groß und somit kann das angestrebte Ziel (Verformung bei Stoßwellen, Stoff- oder Isotopentrennung bei der Zentrifuge) erreicht werden. Transportable technische Geräte werden zum Test ihrer Zuverlässigkeit einem Rütteltest unterzogen, bei dem sie definierten wechselnden Beschleunigungen ausgesetzt werden. Häufig werden dabei Konstruktions- und Produktionsmängel erkannt.

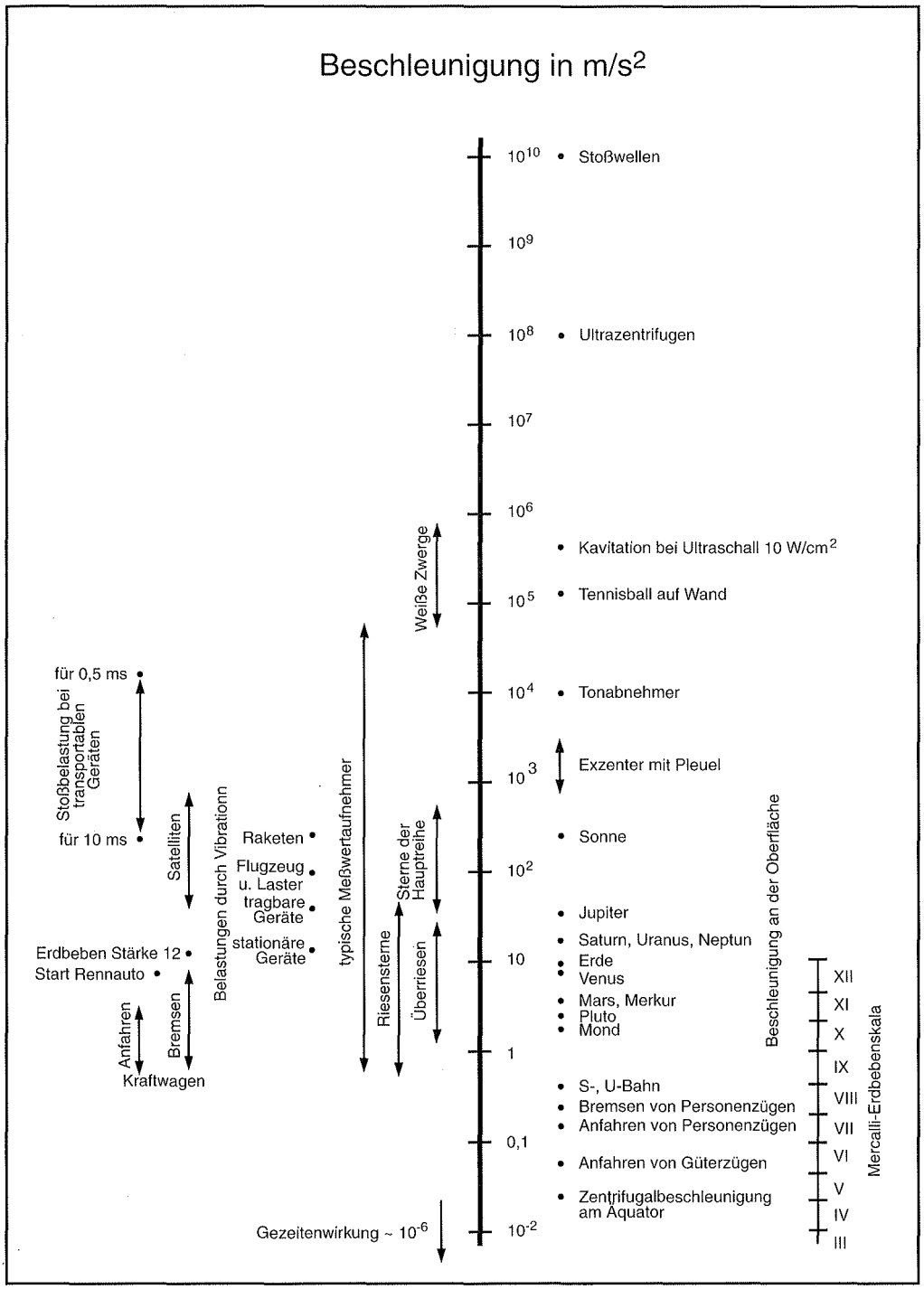
Für Fahrzeuge jeglicher Art ist die Zeit, in welcher sie ihre typische Geschwindigkeit erreichen, eine wichtige Kenngröße. Auch dies ist ihrer Natur nach eine Beschleunigung. So sollen Rennautos in etwa 3 s die Geschwindigkeit von 100 km/h erreichen (das entspricht einer Beschleunigung von 9,26 m/s^2). Für einen guten PKW genügen durchaus 10 s, das sind ca. 2,78 m/s^2. Die beim Bremsen von Fahrzeugen auftretenden negativen Beschleunigungen werden Verzögerung genannt.

Sehr hohe Beschleunigungen treten in sich schnell bewegenden Körpern auf, wie z.B. Jagdflugzeugen und Raketen. Zu hohe Werte sind für den Menschen gefährlich, bei entsprechender Lage und anderen günstigen Randbedingungen sind maximal 10g erträglich.

Eine Bemerkung muß noch zu der Aufnahme der Mercalli-Erdbebenskala in die Skale für die Beschleunigung gemacht werden. Mit dieser Skala wird die seismische Intensität eines Erdbebens gemessen. Diese gibt an, wie groß die Wirkung des Bebens an der Erdoberfläche sowie auf Menschen und Bauwerke ist. Die Werte von I bis XII sind dabei den Bodenbeschleunigungen in den seismischen Erschütterungen zugeordnet.

Übliche Maßeinheiten sind noch

1 Gal = 1cm/s^2(in der Geophysik)
1 km/(h·s) = 0,278 m/s^2 (bei Kraftfahrzeugen).


Beschleunigung in m/s2
10^10
10^9
10^8
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0,1
10^-2
Stoßwellen
Ultrazentrifugen
Kavitation bei Ultraschall 10 W/cm2
Tennisball auf Wand
Tonabnehmer
Exzenter mit Pleuel
Sonne
Jupiter
Saturn, Uranus, Neptun
Erde
Venus
Mars, Merkur
Pluto
Mond
S-, U-Bahn
Bremsen von Personenzügen
Anfahren von Personenzügen
Anfahren von Güterzügen
Zentrifugalbeschleunigung am Äquator
Weiße Zwerge
Sterne der Hauptreihe
Überriesen
Riesensterne
typische Meßwertaufnehmer
Raketen
Flugzeug u. Laster
tragbare Geräte
stationäre Geräte
Satelliten
Belastungen durch Vibrationn
Stoßbelastung bei transportablen Geräten
für 0,5 ms
für 10 ms
Erdbeben Stärke 12
Start Rennauto
Anfahren
Bremsen
Kraftwagen
Gezeitenwirkung ~ 10-6
Beschleunigung an der Oberfläche
Mercalli-Erdbebenskala
XII
XI
X
IX
VIII
VII
VI
V
IV
III

3.2.4 Volumenfluß in Kubikmeter pro Sekunde ([Volumenfluß] = m^3/s)

Bei vielen natürlichen und technischen Prozessen interessiert die in einer Zeiteinheit umgesetzte (geflossene) Stoffmenge. Wenn der Stoff innerhalb des Prozesses gleich bleibt, kann man den Fluß der Stoffmenge durch den Volumenfluß charakterisieren und hat damit die Fragestellung auf eine leichter zu messende Größe, das Volumen pro Zeiteinheit, zurückgeführt.

1 Kubikmeter pro Sekunde (1 m^3/s) ist der Fluß eines Volumens von 1 m^3 in 1 s.

Über die Dichte ρ eines Stoffes kann gemäß $m = \rho V$ leicht der Zusammenhang zum Massenfluß hergestellt werden (vgl. Abschn. 3.3.1).

Die relative Unsicherheit bei der Messung des Volumenflusses ist mit einigen 10^{-3} recht groß.

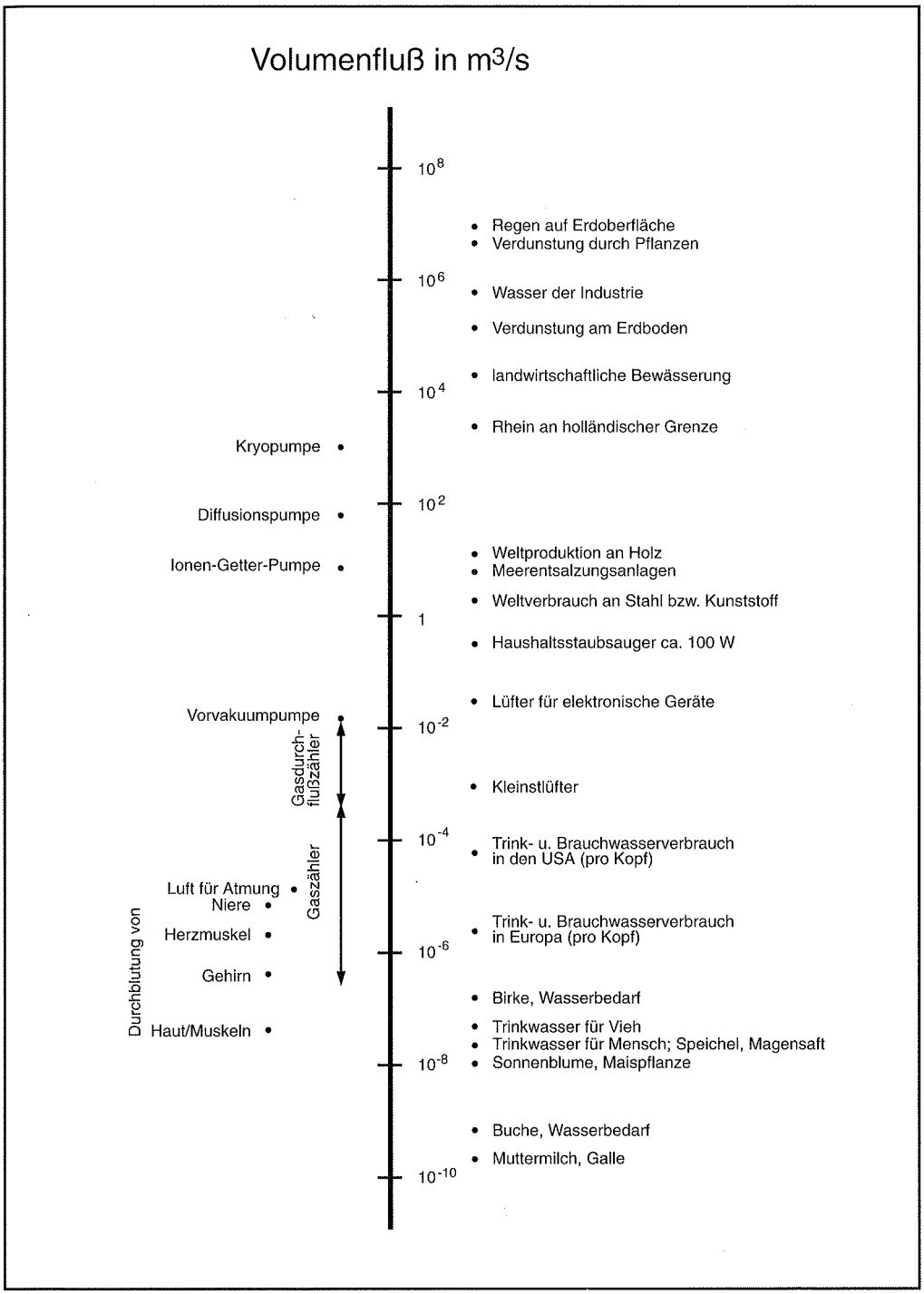
Da die Frage, wieviel Material, Flüssigkeit, Gas o.ä. in einer Zeiteinheit benötigt, verbraucht, umgewandelt oder erzeugt wird, in den verschiedensten Gebieten der Natur, der Biologie, der Medizin, der Physik, der Chemie und natürlich der Technik von Bedeutung ist, gibt es für die unterschiedlichen Fragestellungen und Materialien eine Vielzahl von Meßverfahren.

Im täglichen Leben interessante Volumenflüsse sind die durch die Wasser- und Gaszähler erfaßten. Auch die mit Lüftern und Staubsaugern erzielbaren Werte dürften interessant sein. Um die technischen Möglichkeiten zu verdeutlichen, wurden die Volumenflüsse bei verschiedenen Vakuumpumpen in die Skale aufgenommen. Hier muß zur Erzielung eines wahrnehmbaren Massenflusses ein sehr großer Volumenfluß erzeugt werden.

Auch Volumenflüsse von wirtschaftlicher Bedeutung, wie Regen auf die Erdoberfläche, Weltholzproduktion und Trinkwasserverbrauch wurden aufgenommen. Im Zusammenhang mit den globalen Problemen sind seit den ersten Studien des Club of Rome in diesem Zusammenhang Werte für die Ressourcen von Interesse. Mittels der Daten zu vorhandenen Ressourcen und denen für ihren Verbrauch läßt sich abschätzen, wie lange die Natur bei Beibehaltung der derzeitigen Handlungspolitik uns noch Ressourcen bereithält. Unter der Verwendung der Skalen zur Masse, zum Volumen und zum Volumenfluß (alternativ dazu die zum Massenfluß) kann der Leser hier selbst Abschätzungen treffen.

Die Sparsamkeit der Natur wird bei den besonders kleinen Flüssen im Bereich des Lebens deutlich. Beachtlich groß ist der durch den Wasserverbrauch der Birke erzeugte Volumenfluß.

Für den Volumenfluß von Flüssigkeiten und Gasen ist die Geometrie der durchströmten Öffnungen bzw. Rohre sehr entscheidend. Sie hat Einfluß auf die Laminarität bzw. auf das Auftreten von Turbulenz der Strömung. Das Auftreten von Turbulenzen ist in den meisten Fällen nicht erwünscht und bringt auch bei der Frage der Messung des Volumenflusses Nachteile mit sich. Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung wird durch die Reynoldszahl beschrieben.


Volumenfluß in m3/s
10^8
Regen auf Erdoberfläche
Verdunstung durch Pflanzen
10^6
Wasser der Industrie
Verdunstung am Erdboden
10^4
landwirtschaftliche Bewässerung
Rhein an holländischer Grenze
Kryopumpe
10^2
Diffusionspumpe
Ionen-Getter-Pumpe
Weltproduktion an Holz
Meerentsalzungsanlagen
Weltverbrauch an Stahl bzw. Kunststoff
1
Haushaltsstaubsauger ca. 100 W
Lüfter für elektronische Geräte
Vorvakuumpumpe
Gasdurch-flußzähler
10^-2
Kleinstlüfter
10^-4
Trink- u. Brauchwasserverbrauch in den USA (pro Kopf)
Gaszähler
Luft für Atmung
Niere
Herzmuskel
Gehirn
Haut/Muskeln
Durchblutung von
Trink- u. Brauchwasserverbrauch in Europa (pro Kopf)
10^-6
Birke, Wasserbedarf
Trinkwasser für Vieh
Trinkwasser für Mensch; Speichel, Magensaft
10^-8
Sonnenblume, Maispflanze
Buche, Wasserbedarf
Muttermilch, Galle
10^-10

3.3. Masse in Kilogramm ([Masse] = kg)

Aus dem täglichen Leben sind uns viele Phänomene bekannt, die dazu führen, daß wir Körpern die physikalische Eigenschaft Masse zuschreiben. Man denke an die zu vollbringende Anstrengung, um einen Sack Kartoffeln anzuheben oder an das Problem, ein Auto aus dem Stand durch Schieben in Bewegung zu versetzen. Beide Beispiele charakterisieren auch die beiden Arten von Massen. Beim Kartoffelsack handelt es sich um die Schwere dieses Sackes, wir sprechen von der schweren Masse. Das Auto setzt unseren Bemühungen eine gewisse Trägheit entgegen, es besitzt eine träge Masse. Der ungarische Physiker Roland von Eötvös (1848–1919) konnte in einem Experiment zeigen, daß schwere und träge Masse zueinander proportional sind. Bei geeigneter Wahl der Maßeinheit sind beide Massen gleich groß.

Da die Masse auf keine anderen Phänomene zurückgeführt werden kann, ist sie eine Grundgröße der Physik. Ihre Maßeinheit ist die einzige Basiseinheit, für die sich bis heute ein körperliches Normal gehalten hat.

Die Basiseinheit 1 Kilogramm (1 kg) wird festgelegt durch die Masse eines im Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres bei Paris aufbewahrten Platin-Iridium-Zylinders.

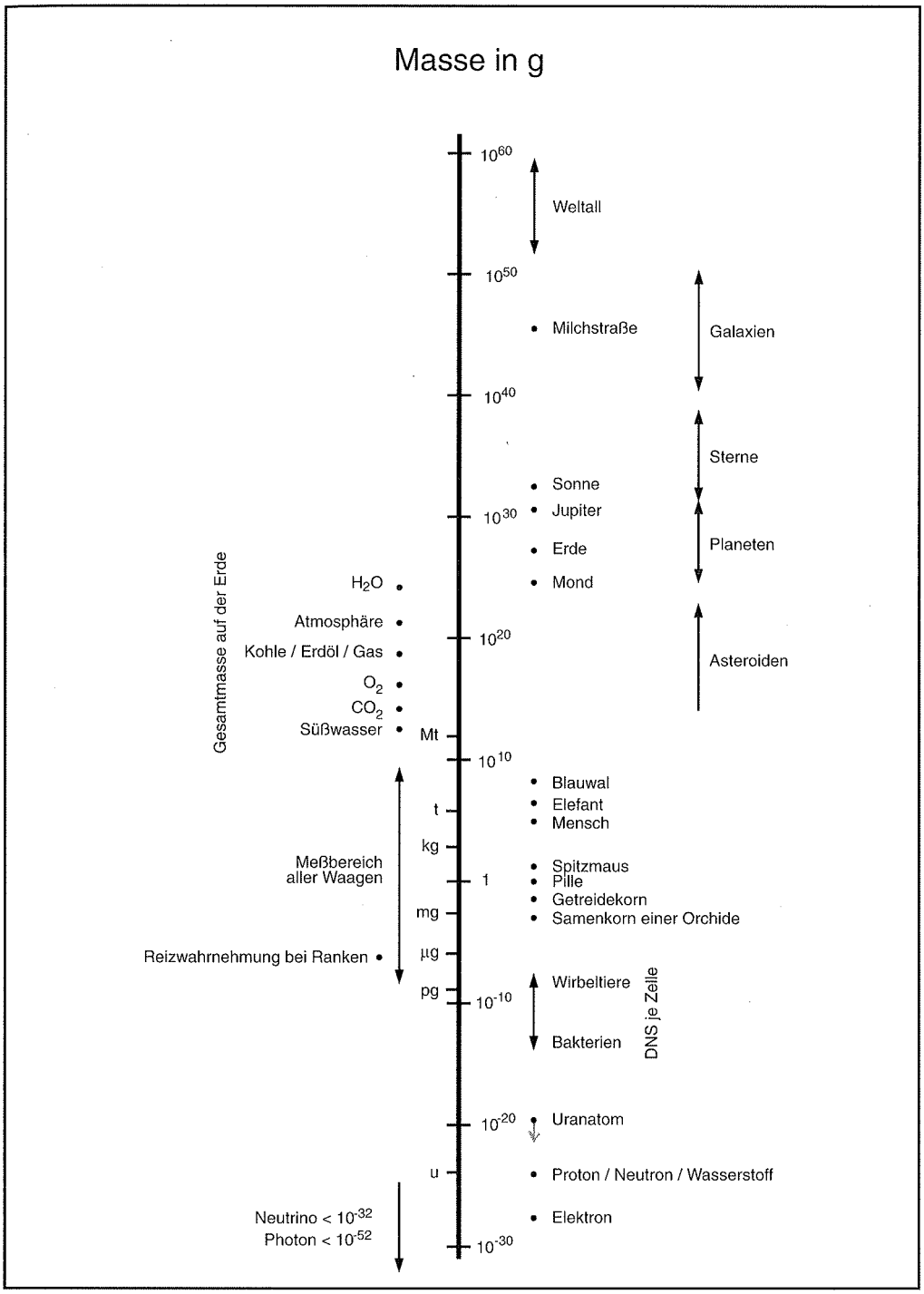
Diese Festlegung erfolgte 1891 auf der 3. Generalkonferenz der Internationalen Meterkonvention. Der Kreiszylinder des Normals hat einen Durchmesser von ca. 39 mm, die Platin-Iridium-Legierung hat eine Dichte von 21 g/cm^3.

Ursprünglich sollte die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps gleich der Masse eines Kubikdezimeters (was einem Liter entspricht) Wasser bei seiner größten Dichte (bei 4 °C) sein. Genauere Messungen zeigten aber, daß der Prototyp der Masse von 1,000 028 dm^3 Wasser bei 4 °C entspricht.

Eine weitere Besonderheit ist, daß hier eine Basiseinheit mit einem Dezimalvorsatz (kilo = 10^3) versehen ist. Entsprechend der Systematik der anderen Einheiten müßte das Gramm (g) die Basiseinheit sein. Diese Besonderheit liegt in der Körperlichkeit des Normals und dem historischen Weg zu diesem Normal begründet.

Die Notwendigkeit der Massenbestimmung ist so alt wie der Warenaustausch zwischen den Menschen (vgl. Kap. 2). Die entsprechenden historischen Einheiten waren immer so gewählt, daß sie sich den Bedürfnissen angepaßt hatten. Es wäre sehr unpraktisch gewesen, z.B. beim Getreidehandel mit der Einheit Gramm zu operieren. Unter den dabei entstehenden Zahlenwerten könnte sich nur schwer jemand etwas vorstellen. So hat sich die durch das Kilogramm ausgedrückte Masse als ein dem menschlichen Vorstellungsvermögen gut angepaßtes Normal erwiesen. Auf die bei der Herstellung des Normals noch hinzukommenden pragmatischen Gesichtspunkte sei hier nur verwiesen.

Man muß darauf aufmerksam machen, daß früher zwischen Masse und Gewicht (welches eine Kraft darstellt – vgl. Abschnitt 3.3.3) nicht unterschieden wurde. Noch


Masse in g
10^{60}
Weltall
10^{50}
Milchstraße
Galaxien
10^{40}
Sterne
Sonne
10^{30}
Jupiter
Erde
Planeten
Mond
Gesamtmasse auf der Erde
H_2O
Atmosphäre
Kohle / Erdöl / Gas
O_2
CO_2
Süßwasser
10^{20}
Asteroiden
Mt
10^{10}
Blauwal
t
Elefant
Mensch
kg
Meßbereich aller Waagen
Spitzmaus
1
Pille
Getreidekorn
mg
Samenkorn einer Orchide
Reizwahrnehmung bei Ranken
µg
pg
10^{-10}
Wirbeltiere
Bakterien
DNS je Zelle
10^{-20}
Uranatom
u
Proton / Neutron / Wasserstoff
Neutrino < 10^{-32}
Photon < 10^{-52}
Elektron
10^{-30}

bis vor knapp fünzig Jahren war bei der Bestimmung von Massen dieser Unterschied nicht immer beachtet.

Das Gewicht ist eine Eigenschaft, die durch die Anziehung einer Masse durch ein Gravitationsfeld hervorgerufen wird. Auf der Erde ist das Gravitationsfeld das der Erde, und das Gewicht eines Körpers der Masse m ergibt sich dann zu $G = m \cdot g$, mit g als die Fallbeschleunigung auf der Erdoberfläche. Die Masse selbst ist dagegen nicht von den wirkenden Gravitationsfeldern abhängig.

Entsprechend müssen auch die verwendeten Meßverfahren zur Bestimmung von Massen die Wirkung solcher Felder kompensieren. Das geschieht, indem eine Masse durch Vergleich mit einem Normal mittels einer Balkenwaage ermittelt wird. Bei dieser Konstruktion wirken Gravitationsfelder auf beide Seiten der Waage und damit auch auf Meßkörper und Normal gleichartig. Mit dieser Meßanordnung erhalten wir auf der Erde wie auf dem Mond (mit einer deutlich kleineren Fallbeschleunigung) den gleichen Wert für die Masse eines Körpers.

Das Gewicht wird hingegen mit einem Federkraftmesser (oft auch Federwaage genannt) bestimmt. Hier stellt sich das Gleichgewicht zwischen der Schwerkraftwirkung und der Federkraft ein. Ein Federkraftmesser ist also immer für eine bestimmte Schwerkraft (eine bestimmte Fallbeschleunigung) geeicht. Änderungen dieser Schwerkraft wirken sich damit auf das Gewicht der Masse aus, auf der Erde kann dies (aufgrund der Inhomogenität des Schwerefeldes der Erde) immerhin zu Fehlern von fast 1% führen. Noch heute kann man auf Märkten Federkraftmesser finden, mit denen die „Masse" der verkauften Ware bestimmt wird.

Bis vor kurzem hatte auch das technische Maßsystem noch beachtliche Bedeutung. In ihm wird statt der Masse die Kraft (Gewicht) als Basiseinheit verwendet. Das hat seine Berechtigung darin, daß bei vielen technischen Prozessen der Fall, der Antrieb und der Auftrieb als Elemente eine wichtige Rolle spielen und diese durch Kräfte gut beschrieben werden können. Um einen definierten Umrechnungsfaktor zwischen Kraft und Masse zu haben, wurde für die Erde ein mittleres g zu 9,80665 m/s^2 festgelegt (vgl. Abschn. 3.2.3). Diesen Faktor muß man auch bei den Umrechnungen zwischen Dichte (Masse pro Volumen) und Wichte (Gewicht pro Volumen) beachten.

Die spezielle Relativitätstheorie hat gezeigt, daß die gemessene Masse eines Körpers noch von seiner Geschwindigkeit abhängt, wir also zwischen seiner Ruhmasse und seiner Masse in Bewegung unterscheiden müssen. Es gilt die Beziehung

$$m = m_0 \,/\, \sqrt{(1-(v\,/\,c)^2)}\,.$$

Um die Wirkung der Körpergeschwindigkeit auf die Masse zu verdeutlichen, ist das Verhältnis m/m_0 für Elektronen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der folgenden Tabelle dargestellt. In der ersten Spalte ist noch die Spannung angegeben, die man benötigt, um die Elektronen auf die entsprechende Geschwindigkeit zu beschleunigen. Man sieht, daß bei unseren Fernsehgeräten die Massenänderung der Elektronen schon einige Prozent beträgt. Im allgemeinen sind aber Geschwindigkeiten von 30 000 km/s ($v/c = 0{,}1$) sehr ungebräuchlich.

Elektronen beschleunigende Spannung in kV	v/c	m/m_0
4	0,1	1,01
10	0,2	1,02
25	0,3	1,05
50	0,4	1,09
80	0,5	1,15
140	0,6	1,25
200	0,7	1,40
400	0,8	1,67
700	0,9	2,29
1 000	0,95	3,20
3 500	0,99	7,09
10 000	0,999	22,40

Eine wichtige Erfahrungstatsache ist die Erkenntnis der Makrophysik, daß in einem abgeschlossenen System die Masse konstant bleibt (Massenerhaltungssatz). Nun hat Albert Einstein (1879–1955) in der speziellen Relativitätstheorie aber gefunden, daß Masse und Energie äquivalent und über die Vakuumlichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft sind:

$$E = m \cdot c^2.$$

Wegen des großen Wertes der Lichtgeschwindigkeit spielt diese Beziehung bei den alltäglichen makroskopischen Prozessen keine Rolle. Im Bereich der Atome wird dieser Zusammenhang aber wesentlich, und alle mit der Kernkraft zusammenhängenden Techniken erreichen aufgrund dieser Beziehung ihre Leistungsfähigkeit. Da solche Prozesse im Weltall in großem Maßstab ablaufen, werden durch die dort herrschenden Energieflüsse auch beachtliche Massen umgesetzt. Die Sonne hat durch die für unser Leben wichtigen energieliefernden Kernprozesse einen beachtlichen Masseverlust (s. Abschn. 3.3.1).

Die Skale zu Zahlenwerten der Masse ist in Einheiten des Gramm geteilt, um zu den anderen Skalen mit der Vorsatzbildung konsistent zu bleiben. Sie macht deutlich, daß die direkte Massenbestimmung mittels Waagen nur in einem kleinen Bereich der auftretenden Massen möglich ist. Die Bestimmung der anderen Zahlenwerte für die Masse erfolgt über physikalische Gesetzmäßigkeiten, die die Masse mit einer anderen, meßbaren physikalischen Größe verknüpfen. Insoweit sind diese Massenwerte in ihrer Genauigkeit und natürlich auch ihrer Gültigkeit stark davon abhängig, wie genau die physikalischen Gesetze die wirklichen Zusammenhänge widerspiegeln und wie groß der Meßfehler der gemessenen Größe ist. Sehr deutlich wird die Unsicherheit bei der großen Spanne (fast 10 Zehnerpotenzen) für die Masse des Weltalls. Hier gehen sehr viele, mit Unsicherheiten behaftete theoretische Annahmen in die Ermittlung des Zahlenwertes ein.

Als Sondereinheiten für die Masse sind zugelassen:

1 Tonne	= 1 t	= 10^6 g	
1 Dezitonne	= 1 dt	= 10^5 g	
1 Doppelzentner	= 1 dz	= 10^5 g	
1 Gamma	= 1 γ	= 10^{-6} g	
1 u		= 1,660 5402 · 10^{-24} g	(atomphysikalische Masseeinheit = 1/12 der Masse des Kohlenstoffisotops ^{12}C)

Aus der Vielzahl der alten Maße und der auch noch verwendeten Sondermaße seien zum Schluß noch einige aufgeführt.

Alte Maße

1 dag	= 100 g	(auch 1dkg, in einigen östlichen Ländern üblich)
1 Pfund	= 500 g	(seit 1868 nicht mehr zugelassen!)
1 Pfund (russ.)	= 409,512 g	(= 1 rlbs)
1 Zentner = 1 Ztr	= 5 · 10^4 g	(seit 1868 nicht mehr zugelassen!)
1 Zentner (Öster.)	= 1 · 10^5 g	
1 Karat	= 0,2 g	(Handelsgewicht bei Edelsteinen)
1 Karat	= 1/24	Goldanteil in Goldlegierungen

Anglo-amerikanische Maße

1 cwt	= 5,080 24 · 10^4 g	(hundredweight; USA = 4,536 · 10^4 g)
1 dr avdp	= 1,7718 g	(dram avoirdupois)
1 drame	= 1,772 g	
1 grain	= 6,479 89 · 10^{-2} g	
1 lb avdp	= 453,6 g	(pound)
1 long ton	= 1,016 047 · 10^6 g	(Großbritannien)
1 oz	= 28,3495 g	(ounce, Unze, oz avdp)
1 qu	= 1,27 · 10^4 g	(Quarter)
1 short ton	= 9,071 85 · 10^5 g	(USA)
1 slug	= 1,459 39 · 10^4 g	
1 st	= 6,350 · 10^3 g	(Stone)

Apothekerwesen

1 lb.ap	= 373,242 g	(pound)
1 oz.ap	= 31,035 g	(ounce)
1 dm.ap	= 3,888 g	(dram, auch dr)

1 s.ap	= 1,296 g	(scruple)
1 gr	= 0,065 g	(grain)
1 Pfund	= 345,6 g	
1 Unze	= 28,8 g	
1 Drachme	= 3,6 g	
1 Skrupel	= 1,2 g	
1 Gran	= 0,06 g	

Küchenmaße (meist stark variierend, da auf Hohlmaßen beruhend)

1 gestrichener Teelöffel	ca. 5 g
1 gehäufter Teelöffel	ca. 10 g
1 gestrichener Eßlöffel	ca. 7 g Haferflocken bis 20 g Fett
1 gehäufter Eßlöffel	etwa das Doppelte
1 Glas	100 bis 200 g (je nach Inhalt)
1 Tasse	75 bis 150 g
1 Suppenteller	ca. 250 g
1 Sack	ca. 100 kg

3.3.1 Massenfluß in Gramm pro Sekunde ([Massenfluß] = g/s)

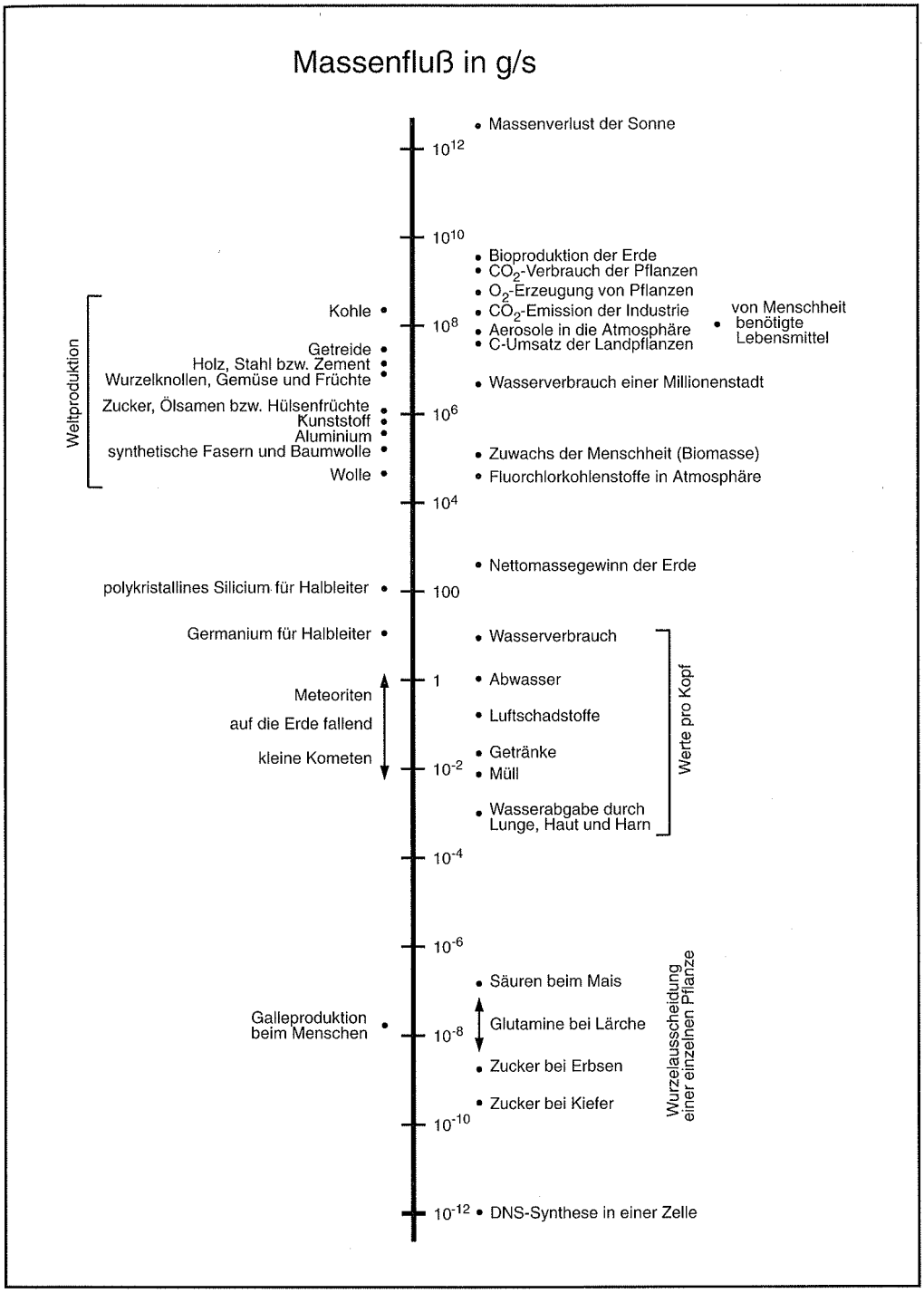
Viele Prozesse in Natur und Technik sind durch Umsätze von Massen gekennzeichnet und oft von der Größe dieses Umsatzes beeinflußt. Schwankt die Dichte des Stoffes (z.B. bei Gasen während einer chemischen Reaktion), so kann nicht der bequeme Weg der Angabe des Volumenflusses gewählt werden (s. Abschn. 3.2.4) und der Prozeß wird durch seinen Massenfluß charakterisiert.

1 Gramm pro Sekunde (1 g/s) ist der Fluß der Masse 1 g in 1 s.

Die Verbindung zum Volumenfluß ist durch die Beziehung $m = \rho V$ gegeben. Die beim Volumenfluß getroffenen Aussagen gelten hier analog. Da die Dichte der meisten festen und flüssigen Stoffe zwischen 0,5 und 5 g/cm^3 liegt, ist zwischen den Skalen des Volumen- und Massenflusses kaum ein Unterschied zu erkennen. Lediglich bei Gasen ist aufgrund der sehr geringen Dichte ein Vergleich aufschlußreich.

Allgemein ist bei Angaben zum Volumenfluß der Gesichtspunkt der Lagerung, Bevorratung im Vordergrund, beim Massenfluß mehr die Belastung, die Kraftwirkung und die Stoffumsetzung im Blick. Darum sind i. allg. auch Angaben zum Massenfluß häufiger anzutreffen als zum Volumenfluß.

Bewußt nicht in die Darstellung aufgenommen sind die gewaltigen Massenflüsse der Astronomie, wie z.B. bei der in ein schwarzes Loch einströmenden Masse oder die Massenumsätze im Zusammenhang mit den Sternreaktionen, als Beispiel ist nur die Sonne angeführt.


Massenfluß in g/s
Massenverlust der Sonne
10^{12}
10^{10}
Bioproduktion der Erde
CO_2-Verbrauch der Pflanzen
O_2-Erzeugung von Pflanzen
CO_2-Emission der Industrie
Aerosole in die Atmosphäre
C-Umsatz der Landpflanzen
von Menschheit benötigte Lebensmittel
10^{8}
Kohle
Getreide
Holz, Stahl bzw. Zement
Wurzelknollen, Gemüse und Früchte
Zucker, Ölsamen bzw. Hülsenfrüchte
Kunststoff
Aluminium
synthetische Fasern und Baumwolle
Wolle
Weltproduktion
Wasserverbrauch einer Millionenstadt
10^{6}
Zuwachs der Menschheit (Biomasse)
Fluorchlorkohlenstoffe in Atmosphäre
10^{4}
Nettomassegewinn der Erde
polykristallines Silicium für Halbleiter
100
Germanium für Halbleiter
Wasserverbrauch
1
Abwasser
Meteoriten
auf die Erde fallend
kleine Kometen
Luftschadstoffe
Getränke
10^{-2}
Müll
Wasserabgabe durch Lunge, Haut und Harn
Werte pro Kopf
10^{-4}
10^{-6}
Säuren beim Mais
Galleproduktion beim Menschen
10^{-8}
Glutamine bei Lärche
Zucker bei Erbsen
Zucker bei Kiefer
Wurzelausscheidung einer einzelnen Pflanze
10^{-10}
10^{-12}
DNS-Synthese in einer Zelle

3.3.2 Dichte in Kilogramm pro Kubikmeter ([Dichte] = kg/m^3)

Aus unserer Erfahrung wissen wir, daß die Stoffe unterschiedlich dicht gepackt sind. So ist ein Sack Kartoffeln wesentlich schwerer als ein gleich großer mit Gänsefedern gefüllter. Das gleiche Volumen der beiden Stoffe hat ein jeweils anderes Gewicht. Diese Eigenschaft wird mit der physikalischen Größe Dichte beschrieben. Sie sagt aus, wieviel Masse eines Stoffes durch ein bestimmtes Volumen eingenommen wird. Das Verhältnis $\rho = m/V$ heißt Dichte eines homogenen Körpers. Da man im allgemeinen davon ausgehen muß, daß bei einem Körper die Masse nicht überall gleichmäßig verteilt ist, heißt $\rho_m = \Delta m/\Delta V$ mittlere Dichte. Ist die Masse eine Funktion des Ortes ($m = m(x, y, z)$), gilt verallgemeinert für die Dichte im Körperpunkt ΔV die Beziehung

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}.$$

Daraus leitet sich die Maßeinheit für die Dichte ab, entsprechend der Verknüpfung der Basiseinheiten der die Dichte bestimmenden physikalischen Größen:

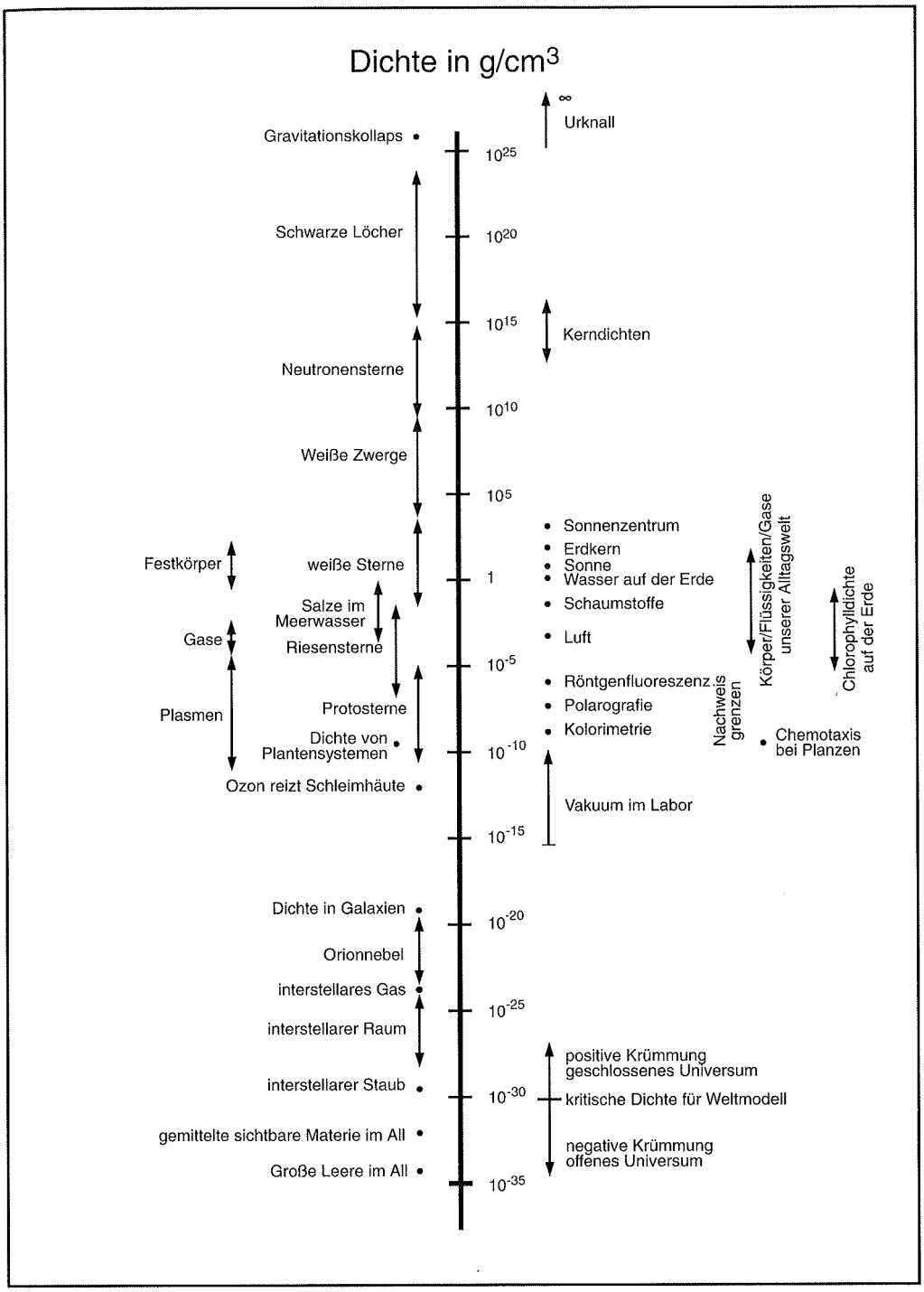
Ein Kilogramm pro Kubikmeter (1 kg/m^3) ist die Dichte eines homogenen Körpers, der bei der Masse 1 kg das Volumen von 1 m^3 einnimmt.

Die Messung der Dichte geht auf die Bestimmung von Volumen und Masse der untersuchten Stoffprobe zurück. Für verschiedene praktische Fragestellungen wurden spezielle Techniken entwickelt. Zur Dichtebestimmung sehr kleiner fester Proben eignen sich Pyknometer. Sie stellen ein definiertes Volumen dar, welches vollständig mit einer bekannten Flüssigkeit gefüllt ist. In diese wird die Probe gegeben, die dadurch Flüssigkeit verdrängt. Durch Wägen vor und nach Probenzugabe und Kenntnis der Masse des Probekörpers läßt sich eine Formel zur Bestimmung der Dichte aufstellen. Auch durch Nutzen des Auftriebs (Archimedisches Prinzip) lassen sich Dichtemeßverfahren entwickeln. Besonders für die Bestimmung von Flüssigkeitsdichten ist das Einbringen eines sogenannten Skalenaräometers eine schnelle Methode. Um in der Flüssigkeit zu schweben, muß das Aräometer soviel Flüssigkeit verdrängen, bis seine Gewichtskraft gleich der Auftriebskraft ist. Das ist je nach der Dichte der Flüssigkeit ein unterschiedliches Volumen, welches an der Eindringtiefe abgelesen werden kann. Bei bekannter Geometrie und Masse des Aräometers kann diese Skale direkt als Dichteskala ausgelegt werden. Bekannt sind diese Aräometer als Prüfröhrchen für den Alkoholgehalt von Flüssigkeiten (Wein, Bier) und für den Schwefelsäuregehalt in Akkumulatoren.

Im technischen Bereich sind noch das spezifische Gewicht und die Wichte gebräuchlich.

Das spezifische Gewicht s eines Körpers ist seine Dichte ρ bezogen auf die Dichte von Wasser, also eine dimensionslose Größe.

Die Wichte γ ist das Verhältnis des Gewichtes eines Körpers zu seinem Volumen: $\gamma = G/V$. Damit ist die Wichte genauso wie das Gewicht von der Fallbeschleunigung


Dichte in g/cm3
∞
Urknall
Gravitationskollaps
10^25
Schwarze Löcher
10^20
10^15
Kerndichten
Neutronensterne
10^10
Weiße Zwerge
10^5
Sonnenzentrum
Erdkern
Sonne
Wasser auf der Erde
Schaumstoffe
Luft
Festkörper
weiße Sterne
1
Salze im Meerwasser
Gase
Riesensterne
10^-5
Röntgenfluoreszenz
Polarografie
Kolorimetrie
Plasmen
Protosterne
Dichte von Plantensystemen
10^-10
Ozon reizt Schleimhäute
Vakuum im Labor
10^-15
Dichte in Galaxien
10^-20
Orionnebel
interstellares Gas
10^-25
interstellarer Raum
positive Krümmung geschlossenes Universum
interstellarer Staub
10^-30
kritische Dichte für Weltmodell
gemittelte sichtbare Materie im All
negative Krümmung offenes Universum
Große Leere im All
10^-35
Nachweis grenzen
Körper/Flüssigkeiten/Gase unserer Alltagswelt
Chlorophylldichte auf der Erde
Chemotaxis bei Planzen

abhängig und somit keine Materialkonstante. Die Maßeinheit der Wichte ist $[\gamma] = kp/m^3$.

Entsprechend den im täglichen Leben dominierenden Volumina und Massen ergibt sich auch für den Bereich der uns i. allg. umgebenden festen Körper ein Dichtebereich von 0,2 bis 20 g/cm^3. Der im gesamten Universum mögliche Dichtebereich erstreckt sich hingegen über fast 60 Zehnerpotenzen. Die extremsten Werte treten dabei in den größten und kleinsten Dimensionen auf: Weltall und Elementarteilchen. Vor allem im Weltall finden sich einerseits enorm hohe Dichtewerte, etwa bei den Neutronensternen (bei solchen Dichten wäre unser Erddurchmesser nur wenige Kilometer groß), wie andererseits Gebiete ungeheuer kleiner Dichten. Auch die in den kosmologischen Theorien auftretende kritische mittlere Dichte, die über das dynamische Verhalten des Universums als Ganzes entscheidet, ist mit einer Größenordnung von 10^{-30} g/cm^3 unvorstellbar klein. Nach den bisherigen Erkenntnissen ist die Dichte deutlich geringer, was zu einer ständigen Expansion des Weltalls führen würde. Eine Änderung zu einem anderen Verhalten des Universums (Expansion kommt zum Stillstand, danach wieder Kontraktion) könnte bei einem wesentlichen Beitrag der unsichtbaren sogenannten Dunkelmaterie und der evtl. vorhandenen endlichen Neutrinomasse bewirkt werden.

In der Skale sind die Dichtwerte in g/cm^3 angegeben. Diese Abweichung gegenüber der SI-Einheit wurde gewählt, um die aus vielen anderen Übersichten bekannten Zahlenwerte beibehalten zu können. In einigen Fällen sind auch Dichtekonzentrationen, also Massenanteile in anderen Stoffen aufgetragen, so bei Nachweisgrenzen, der Reizung von Schleimhäuten durch Ozon und der Chemotaxis bei Pflanzen.

Zum Schluß seinen noch einige andere gebräuchliche Dichteeinheiten erwähnt:

1 lb/ft^3	= 16,02 kg/m^3	(pound per cubic foot, GB)
1 lb/gal (UK)	= 9,98 · 10^{-2} kg/l	(pound per gallon, GB)
1 lb/gal (US)	= 11,98 · 10^{-2} kg/l	(pound per gallon, USA)
1 lb/in^3	= 27,68 g/cm^3	(pound per cubic inch)
1 lb/yd^3	= 0,593 kg/m^3	(pound per cubic yard)
1 °Bé	= 1 kg/dm^3	(Grad Baumé)

Spezielle praktische Anwendungen haben sich eigene Maßeinheiten (und entsprechende Definitionen) geschaffen, die zwar im Prinzip Dichten angeben, aber einen anderen, auf die praktischen Bedürfnisse zugeschnittenen, Bezug haben. So ist bei der Verarbeitung von Garnen nicht so sehr deren Dichte (im physikalischen Sinne) wichtig, sondern vielmehr ihre Feinheit. Die entsprechenden Maßeinheiten sind:

1 denier = 1 den = 1 g/9000 m;
1 Titer tex = 1 tex = 1 g/1000 m;
1 Titer denier = 1 Td = 1 den = 0,111 tex.

Das Titer denier wird auch internationales Titer genannt. Da bei diesen Angaben ein gleicher mittlerer Fadendurchmesser angenommen wird, repräsentieren diese Angaben im Prinzip Dichtewerte.

3.3.3 Kraft in Newton ([Kraft] = N)

Um bei einem Körper eine Veränderung hervorzurufen, z.B. eine Beschleunigung oder eine Verformung, müssen wir unserer Erfahrung gemäß auf ihn einwirken. Wir kön nen daher sagen, der physikalische Körper tritt in Wechselwirkung zu einem anderen physikalischen System. Die diese Wechselwirkung wesentlich beschreibende Größe nennen wir Kraft.

In der durch Newton geprägten Mechanik wird zur Beschreibung der Bewegung die Kraft benutzt, ohne auf ihre Ursache einzugehen. Die Berücksichtigung von Kräften kennzeichnet den Übergang von der Kinematik zur Dynamik. Die Mechanik bringt die Kraft mit der Bewegungsgröße eines Körpers – dem Impuls – in Beziehung: die Wirkung der Kraft bewirkt die Änderung der Bewegungsgröße. Bekannter ist dies in der Formulierung des 1. Newtonschen Axioms:

$$F = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} p = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(mv).$$

Damit ist auch die mögliche Konstruktion der Maßeinheit definiert.

Ein Newton (1 N) ist die Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2 erteilt. 1 N = 1 kgm/s^2.

Die Bezeichnung der Krafteinheit ist nach Isaac Newton (1643–1727) erfolgt.

Der Kraftbegriff hat in der Physikgeschichte eine vielfältige Entwicklung genommen. Während in der alltäglichen Erfahrungswelt jeder eine Vorstellung von Kraft und ihrer Wirkung hat, ist zur klaren begrifflichen Einordnung der Kraft in das Theoriensystem der Physik eine intensive Diskussion geführt worden. Sie beginnt an dem Punkt, wo die Kraft als vis vitalis (Lebenskraft) noch keine klare Trennung von der Energie aufweist. Newtons „Principia" markieren dann einen weiteren Meilenstein. Hier wird in den heute so genannten Newtonschen Axiomen die Kraft als wesentliche Größe zur Beschreibung von Bewegungen eingeführt. Doch war die Stellung der Kraft keineswegs unangefochten. Heinrich Hertz versuchte am Ende des 19. Jahrhunderts in seinem Buch „Die Prinzipien der Mechanik" aus erkenntnistheoretischen Gründen eine geschlossene Darstellung der Mechanik ohne die Kraft als Grundgröße zu benut zen. Heute steht die Physik vor dem Problem, für die vier grundlegenden Kräfte in der Natur (Kräfte der starken, schwachen, elektromagnetischen und gravitativen Wechselwirkung) eine einheitliche Theorie zu finden.

Eine konsequente Betrachtung der physikalischen Größe Kraft muß beachten, daß auch sie eine vektorielle Größe ist. Dies ergibt sich schon daraus, daß die Geschwindigkeit, über deren Veränderung die Kraftwirkung definiert ist, ein Vektor ist.

Im alten technischen MKS-System (mit den Grundeinheiten m, kp, s) war die Einheit der Kraft – das Kilopond – eine der drei Basiseinheiten. Entsprechend ihres Zusammenhangs mit den Grundgrößen der Physik besitzt die Kraft im SI eine abgeleitete Einheit.

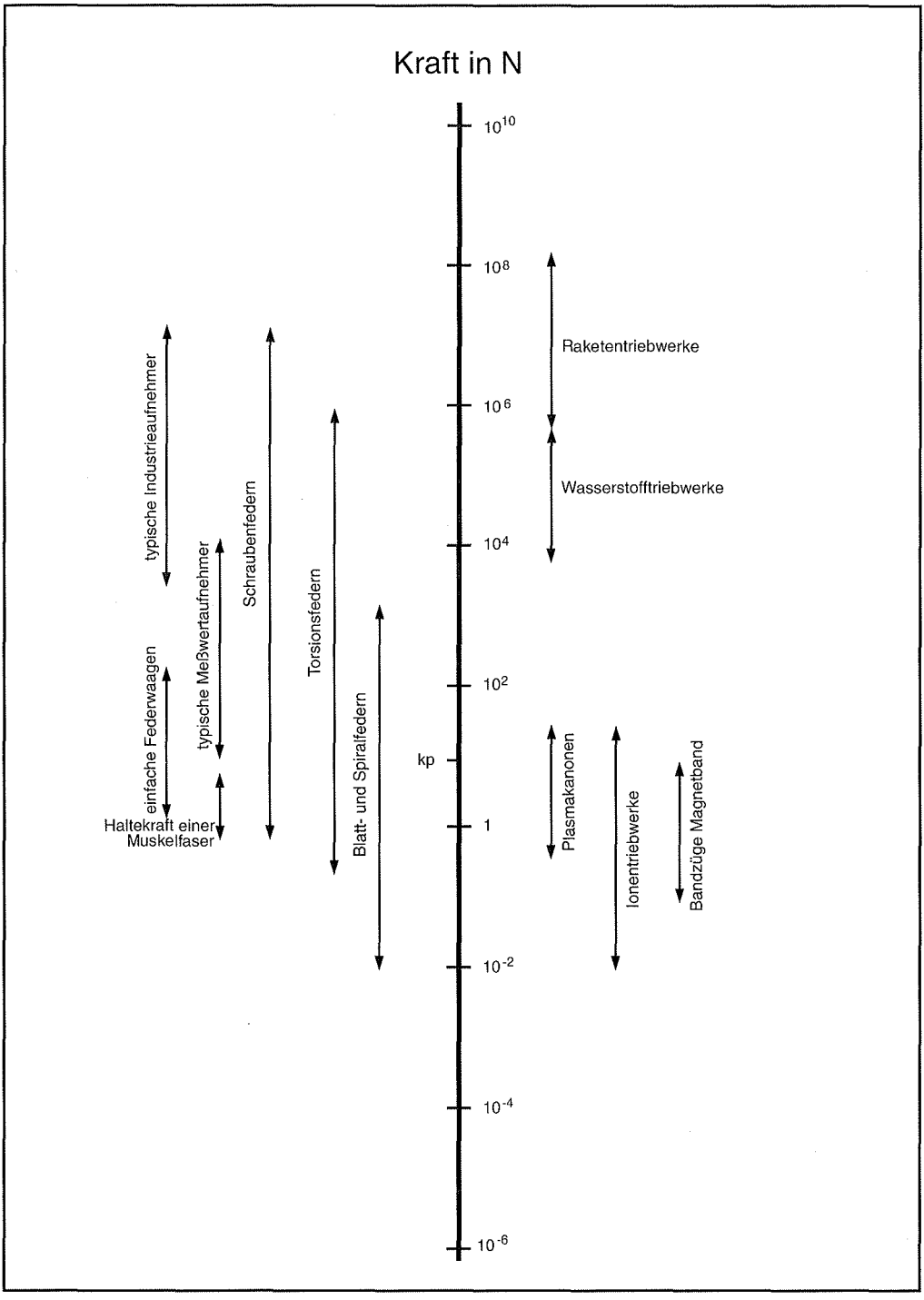
Die Messung der Kraft erfolgt im praktischen Bereich entweder durch Vergleich mit der Schwerkraft oder mittels geeichter Federwaagen. Letztere beruhen auf dem Hookeschen Gesetz, nachdem die Ausdehnung einer Feder proportional der einwirkenden Kraft ist: $F = kx$, k ist dabei die sogenannte Federkonstante. Im mittleren Meßbereich beträgt der relative Fehler etwa 10^{-5}. Für spezielle Fragen werden Meßverfahren eingesetzt, die die Folgen von Krafteinwirkungen nutzen. So wird bei den piezoelektrischen Verfahren die durch die mechanische Verformung z.B. eines Quarzkristalls hervorgerufene elektrische Spannung ausgenutzt. Bei den spannungsoptischen Verfahren wird die Veränderung des Lichtbrechungsverhaltens optischer Linsen unter Krafteinwir kung benutzt. Eine praktisch viel eingesetzte Methode beruht darauf, durch Krafteinwirkung den Wert eines elektrischen Widerstandes zu verändern. So wird der Widerstand eines Dehnungsmeßstreifens unter der durch die Krafteinwirkung verursachten Dehnung verändert. Mittels entsprechender elektrischer Schaltungstechnik (Meßbrücken) lassen sich sehr kleine Widerstandsänderungen und damit Kraftänderungen nachweisen.

Alte, nicht mehr zugelassene Einheiten der Kraft

1 dyn	$= 1 \cdot 10^{-5}$ N	
1 Dyn	= 1 N	(Großdyn)
1 kp	= 9,80665 N	

Zusammenhang mit angelsächsischen Werten

1 lbf	= 4,44822 N	(pound-force, auch pound-weight)
1 long ton-force	$= 9{,}964015 \cdot 10^3$ N	(auch long ton-weight)
1 poundal	= 0,138255 N	
1 short ton-force	$= 8{,}896 \cdot 10^3$ N	(auch short ton-weight)


Kraft in N
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
kp
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
Raketentriebwerke
Wasserstofftriebwerke
Plasmakanonen
Ionentriebwerke
Bandzüge Magnetband
typische Industrieaufnehmer
typische Meßwertaufnehmer
einfache Federwaagen
Haltekraft einer Muskelfaser
Schraubenfedern
Torsionsfedern
Blatt- und Spiralfedern

3.3.4 Druck in Pascal ([Druck] = Pa)

Körper bieten der Wirkung von Kräften im allgemeinen bestimmte Angriffsflächen. Somit verteilt sich die einwirkende Kraft auf eine bestimmte Fläche und meist interessiert deren Widerstandsfähigkeit gegenüber der Krafteinwirkung. Um einer großen Kraft standzuhalten, kann man sie auf eine möglichst große Fläche verteilen. Dieses Prinzip wird z.B. im Winter bei den Skiern ausgenutzt. Will man andererseits eine hohe Wirkung der eingesetzten Kraft erzielen, muß man sie auf eine kleine Fläche konzentrieren, wie das z.B. bei einer Pfeil- oder Speerspitze der Fall ist.

Um solche Situationen beschreiben zu können, ist es sinnvoll, die Größe Druck als Kraft pro Fläche einzuführen:

$$p = \frac{F}{A}.$$

Daraus ergibt sich die Zusammensetzung der Druckeinheit, die nach dem französischen Mathematiker, Philosophen und Naturforscher Blaise Pascal (1623–1662) benannt wurde.

Ein Pascal (1 Pa) ist der Druck, der durch eine Kraft von 1 N erzeugt wird, wenn diese gleichmäßig auf eine Fläche von 1 m^2 wirkt. 1 Pa = 1 N/m^2.

Zuweilen wird Druck auch als mechanische Spannung bezeichnet. Negativer Druck heißt auch Zug.

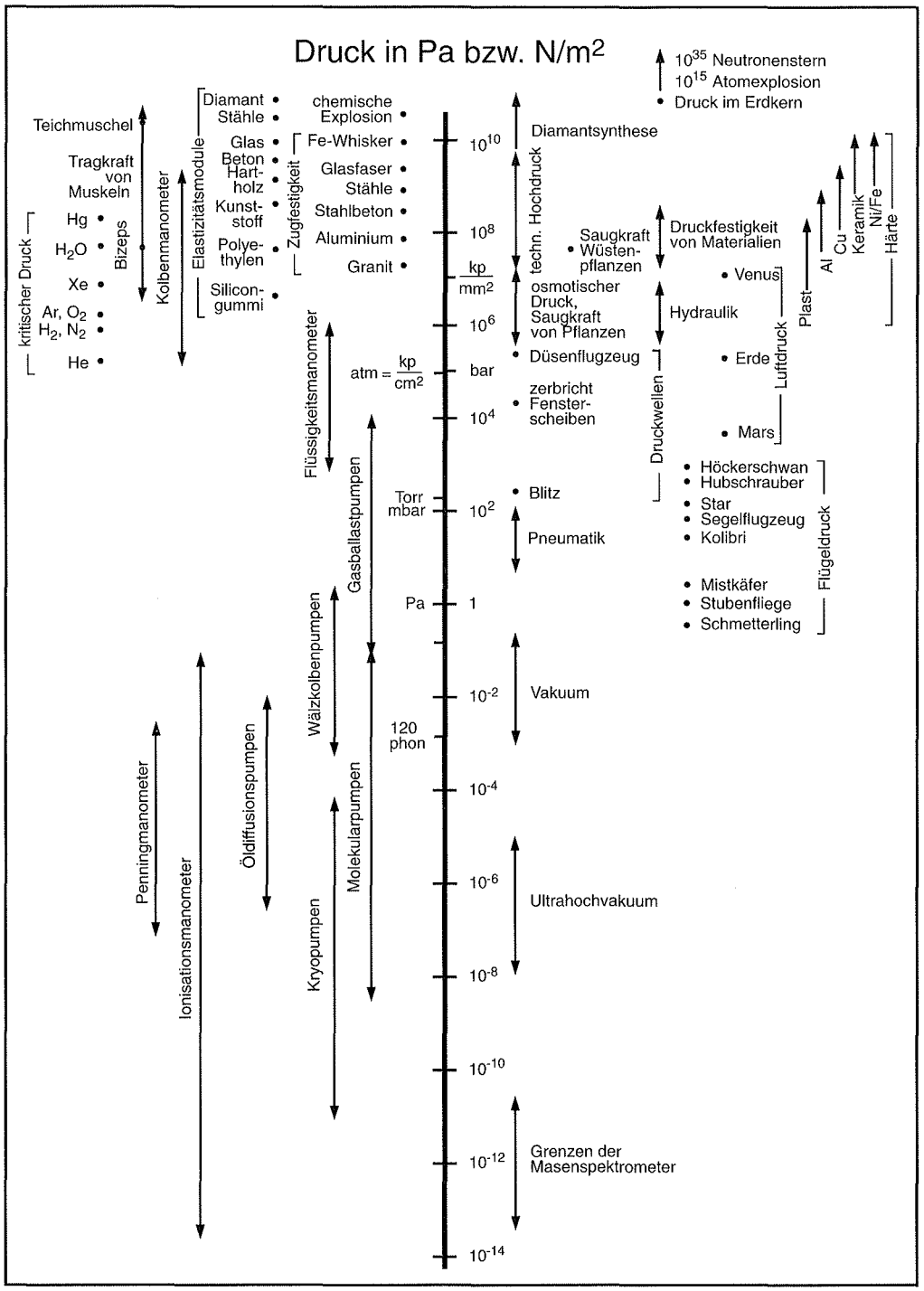
Die Druckmessung erfolgt mit Manometern. Diese messen die auf eine definierte Fläche wirkende Kraft. Barometer sind spezielle Meßgeräte für den atmosphärischen Luftdruck.

Der Bereich der durch die Skale dargestellten Druckwerte ist sehr groß. Ausgehend von dem uns umgebenden Luftdruck (der im Durchschnitt eine Atmosphäre ist) können in der Natur Drücke vorkommen, die 30 Zehnerpotenzen größer sind. Die Technik hat das Beherrschen eines Druckbereiches über ca. 25 Zehnerpotenzen ermöglicht.

Der Bereich der niedrigen Drücke wird durch die Vakuumphysik behandelt. Sie beginnt unterhalb 760 Torr und unterteilt ihren Druckbereich wie folgt:

Grobvakuum	760 bis 1 Torr
Feinvakuum	1 bis 10^{-3} Torr
Hochvakuum	10^{-3} bis 10^{-6} Torr
Höchstvakuum	10^{-6} bis 10^{-11} Torr.

Um diese Drücke zu erreichen, sind vielfältige technische Lösungen (Vakuumpumpen) ersonnen worden. Besonders im Bereich des Hoch- und Höchstvakuums sind bei allen Materialien und bei den Konstruktionen den unter solchen Druckbedingungen auftretenden physikalischen Effekten erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen. Zur Messung solcher Drücke sind zu Beginn noch empfindliche Manometer einsetzbar. Mit zunehmendem Vakuum nutzen die Vakuummeter unter solchen niedrigen Drücken auftre-


Druck in Pa bzw. N/m2
10^{35} Neutronenstern
10^{15} Atomexplosion
Druck im Erdkern
Diamantsynthese
techn. Hochdruck
Saugkraft Wüstenpflanzen
Druckfestigkeit von Materialien
osmotischer Druck, Saugkraft von Pflanzen
Hydraulik
Düsenflugzeug
Druckwellen
zerbricht Fensterscheiben
Blitz
Pneumatik
Vakuum
Ultrahochvakuum
Grenzen der Masenspektrometer
Venus
Erde
Mars
Luftdruck
Höckerschwan
Hubschrauber
Star
Segelflugzeug
Kolibri
Mistkäfer
Stubenfliege
Schmetterling
Flügeldruck
Plast
Al
Cu
Keramik
Ni/Fe
Härte
Diamant
Stähle
Glas
Beton
Hartholz
Kunststoff
Polyethylen
Silicongummi
Elastizitätsmodule
chemische Explosion
Fe-Whisker
Glasfaser
Stähle
Stahlbeton
Aluminium
Granit
Zugfestigkeit
Teichmuschel
Tragkraft von Muskeln
Bizeps
kritischer Druck
Hg
H_2O
Xe
Ar, O_2
H_2, N_2
He
Kolbenmanometer
Flüssigkeitsmanometer
atm = kp/cm2
kp/mm2
bar
Torr
mbar
Pa
120 phon
Gasballastpumpen
Wälzkolbenpumpen
Molekularpumpen
Kryopumpen
Öldiffusionspumpen
Penningmanometer
Ionisationsmanometer
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}

tende physikalische Effekte aus, wie die Änderung der Wärme- und der elektrischen Leitfähigkeit im Vakuum.

Im Hochdruckbereich, der bei 100 kp/cm^2 beginnt und im engeren Sinne den Bereich zwischen 1000 und 100 000 at umfaßt, werden die Eigenschaften von Materialien unter extremen Bedingungen untersucht. Um solche Drücke zu erreichen, wurden unterschiedlichste Pressen konstruiert. Dabei unterscheidet man noch, ob der einwirkende Druck statisch oder dynamisch wirkt. Zur Messung solcher Drücke werden verschiedenste Manometer genutzt, die z.B. mit Flüssigkeiten oder Quecksilberfüllungen arbeiten. Auch die Änderung des elektrischen Widerstandes von Metallen unter hohen Drücken wird zur Messung verwendet.

Wie hier schon deutlich geworden ist, gab es vor der Einführung des SI viele, oftmals auf spezielle Anwendungen zugeschnittene Druckeinheiten, die auch heute z.T. noch in Gebrauch sind. Ihre prinzipiell mögliche Ersetzung durch das Pascal verläuft sehr zögerlich. Das hat neben dem psychologischen Effekt des Gewohnten für die Anwender in den einzelnen Gebieten wohl auch etwas damit zu tun, daß bestimmte Einheiten gleichzeitig eine Aussage über das Umfeld ihrer Anwendung machen. So bedeutet eine Druckangabe in Torr oder Millibar (mbar), daß man sich i. allg. im Gebiet der Meteorologie befindet. Die Druckangabe in Atmosphären (at) deutet auf technische Anwendungen hin.

Für viele Anwendungen muß ein Bezug zum vorhandenen Druck, insbesondere zum Luftdruck hergestellt werden. Dann wird von Über- oder Unterdruck gesprochen. In Formeln wird dies durch einen Index angezeigt. Wird kein Bezug zu einem vorgegebenen Druck genommen, erfolgt oft die Hinzufügung des Attributs absolut.

Für Gase ist der kritische Druck eine charakteristische Größe. Zusammen mit der kritischen Temperatur und dem kritischen Volumen definiert er den kritischen Punkt eines Gases, der für die Möglichkeit der Verflüssigung desselben entscheidend ist.

Der Blutdruck wird beim Menschen in mmHg (Millimeter Quecksilbersäule) gemessen und gibt die Druckwerte an, bei denen kein bzw. wieder Blut durch die Adern fließt. Der Schalldruck an unserem Ohr ist schließlich für die empfundene Lautstärke verantwortlich.

Besondere Druckeigenschaften betreffen die Elastizitätsmodule und Härtegrade, da sie angeben, welcher Druck bzw. Zug Materialien verändert. Aus diesem Grund sind die möglichen Werte für sie in der Skale mit angegeben. Für den genauen Zusammenhang mit dem Druck sei auf die Physiklehrbücher verwiesen.

Weitere gebräuchliche Druckmaße sind:

1 at	$= 9{,}806\,65 \cdot 10^4$ Pa	(technische Atmosphäre)
1 atm	$= 1{,}013\,25 \cdot 10^5$ Pa	(physikalische Atmosphäre)
1 bar	$= 1 \cdot 10^5$ Pa	
1 kp/m^2	$= 9{,}806\,65$ Pa	
1 m WS	$= 9{,}806\,65 \cdot 10^3$ Pa	(Meter Wassersäule)
1 mbar	$= 1 \cdot 10^5$ Pa	(Millibar)
1 N/m^2	$= 1$ Pa	
1 Torr	$= 1{,}333\,224 \cdot 10^2$ Pa	(1 Torr = 1 mmHg)

3.3.5 Leistung in Watt ([Leistung] = W)

Heutzutage wird so viel von Leistung gesprochen, daß wir vielfach unsere Gesellschaft als eine „Leistungsgesellschaft" charakterisieren. Dabei bedeutet der tagtägliche Umgang mit dem Wort Leistung noch nicht, daß man sich über den Hintergrund der physikalischen Größe Leistung im klaren ist, obwohl deren klare Definition auch den alltäglichen Vorstellungen von Leistung zugrunde liegt. Leistung ist eine pro Zeiteinheit vollbrachte Arbeit. Da die geleistete Arbeit nicht mit der Zeit konstant sein muß, definiert man auch hier die Leistung als Differential:

$$P = \frac{\mathrm{d}W_\mathrm{A}}{\mathrm{d}t}.$$

Daraus leitet sich dann die Zusammensetzung der Maßeinheit im SI ab, die nach dem englischen Ingenieur James Watt (1736–1819) benannt wurde.

Ein Watt (1 W) ist die Leistung eines Vorganges, bei dem in 1 s die Arbeit von 1 J verrichtet wird. 1 W = 1 J/s = 1 Nm/s.

Da die Leistung zeitlich schwanken kann, werden auch mittlere, momentane und maximale Leistungen definiert. In der Elektrik unterscheidet man auch zwischen einer Wirk- und einer Scheinleistung, letztere sollte zur Unterscheidung in V · A angegeben werden.

Die Messung von Leistungen beruht i. allg. darauf, die in einer definierten Zeit umgesetzte Energie zu bestimmen. Mechanische Leistungen sind oft bei Rotationsbewegungen von Interesse (Motoren, Maschinen). Hier sind Verfahren entwickelt worden, die durch Messung der Torsion Rückschlüsse auf die Leistung zulassen. Auch im elektrischen Bereich sind spezielle Geräte (Leistungsmesser) entwickelt worden.

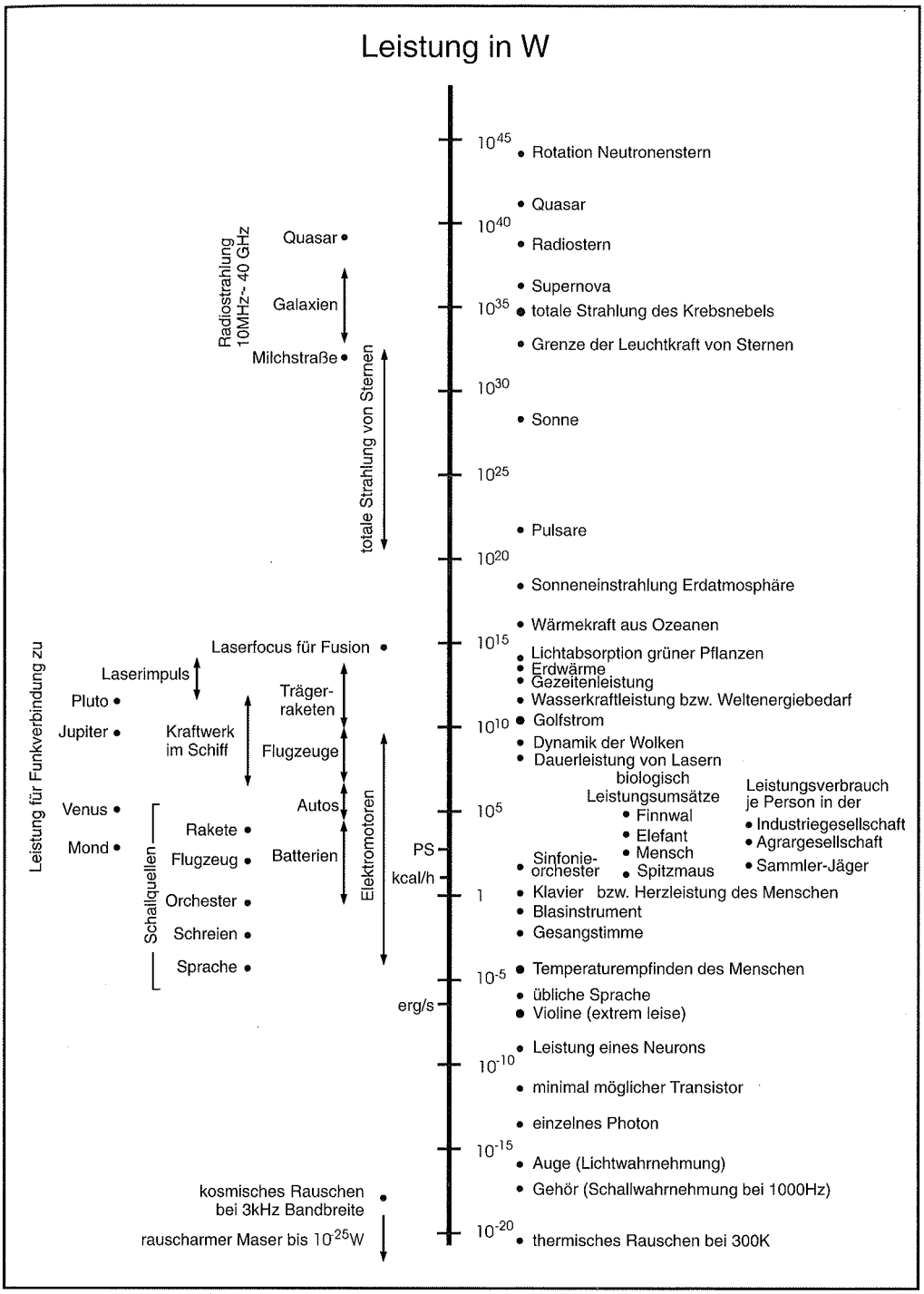
Leistungen sind von universeller Bedeutung, da in allen physikalischen Gebieten Energien Arbeit verrichten können und somit Leistungsbetrachtungen in der Mechanik, Elektrik, Magnetik, Wärmelehre, Lichttechnik, Akustik, bei Strahlung usw. angestellt werden können. Dementsprechend erfaßt die Skale vielfältige Möglichkeiten über einen Bereich von 70 Zehnerpotenzen. Die in der Natur erreichten Leistungswerte sind durch die Technik nicht erreicht worden. Das liegt vor allem daran, daß hier sehr große Energiebeträge umgesetzt werden. Es bestehen ja prinzipiell zwei Möglichkeiten, hohe Leistungen zu erzielen: Verkürzung der Zeit, in der die Arbeit verrichtet wird, oder Erhöhung der umgesetzten Energie in der selben Zeiteinheit. Die erreichten Leistungen bei Lasern beruhen auf dem ersten Prinzip, indem der Betrieb des Lasers in sehr kurzen Impulsen erfolgt.

Da im Raum die verfügbare Leistung mit der dritten Potenz des Abstands von der Quelle abnimmt, sind beträchtliche Sendeleistungen zur Aufrechterhaltung von Funkverbindungen zum Mond oder zu anderen Planeten erforderlich. Die Leistungen von Schallquellen sind meist sehr gering. So ergaben Berechnungen, daß die Schallenergie einer Vorlesungsstunde einen Liter Wasser nicht einmal um 0,5 K erhitzen würde.

Interessant ist die Zunahme des zivilisationsbedingten Leistungsumsatzes des Menschen während der Geschichte. Er liegt heute bereits erheblich über den biologischen bedingten Leistungsumsatz, der allein durch die Ernährung bestimmt wird.

Weitere, noch gebräuchliche Leistungseinheiten sind:

1 erg/s	$= 1 \cdot 10^{-7}$ W	
1 kcal/h	= 1,163 W	
1 kpm/s	= 9,806 65 W	
1 PS	$= 7{,}354\,99 \cdot 10^{2}$ W	(Pferdestärke)
1 ft lbf/s	= 1,356 W	(foot-pound-force per second)
1 ft pdl/s	$= 4{,}214 \cdot 10^{-2}$ W	(foot-poundal per second)
1 hp	$= 7{,}4557 \cdot 10^{2}$ W	(horsepower, 1 hp = 1,014 PS)
1 in lbf/s	= 0,112 98 W	(inch-pound-force per second)
1 yd lbf/s	= 4,06745 W	(yard-pound-force per second)


Leistung in W
10^{45}
Rotation Neutronenstern
Quasar
10^{40}
Radiostern
Supernova
10^{35}
totale Strahlung des Krebsnebels
Grenze der Leuchtkraft von Sternen
10^{30}
Sonne
10^{25}
Pulsare
10^{20}
Sonneneinstrahlung Erdatmosphäre
Wärmekraft aus Ozeanen
10^{15}
Lichtabsorption grüner Pflanzen
Erdwärme
Gezeitenleistung
Wasserkraftleistung bzw. Weltenergiebedarf
10^{10}
Golfstrom
Dynamik der Wolken
Dauerleistung von Lasern
10^{5}
Sinfonie-orchester
Klavier bzw. Herzleistung des Menschen
1
Blasinstrument
Gesangstimme
10^{-5}
Temperaturempfinden des Menschen
übliche Sprache
Violine (extrem leise)
10^{-10}
Leistung eines Neurons
minimal möglicher Transistor
einzelnes Photon
10^{-15}
Auge (Lichtwahrnehmung)
Gehör (Schallwahrnehmung bei 1000Hz)
10^{-20}
thermisches Rauschen bei 300K
biologisch
Leistungsumsätze
Finnwal
Elefant
Mensch
Spitzmaus
Leistungsverbrauch je Person in der
Industriegesellschaft
Agrargesellschaft
Sammler-Jäger
PS
kcal/h
erg/s
Radiostrahlung 10MHz~ 40 GHz
Galaxien
Milchstraße
totale Strahlung von Sternen
Laserfocus für Fusion
Laserimpuls
Pluto
Jupiter
Kraftwerk im Schiff
Träger-raketen
Flugzeuge
Autos
Batterien
Elektromotoren
Leistung für Funkverbindung zu
Venus
Mond
Schallquellen
Rakete
Flugzeug
Orchester
Schreien
Sprache
kosmisches Rauschen bei 3kHz Bandbreite
rauscharmer Maser bis 10^{-25}W

3.3.6 Leistungsflächendichte in Watt pro Quadratmeter ([Leistungsflächendichte] = W/m^2)

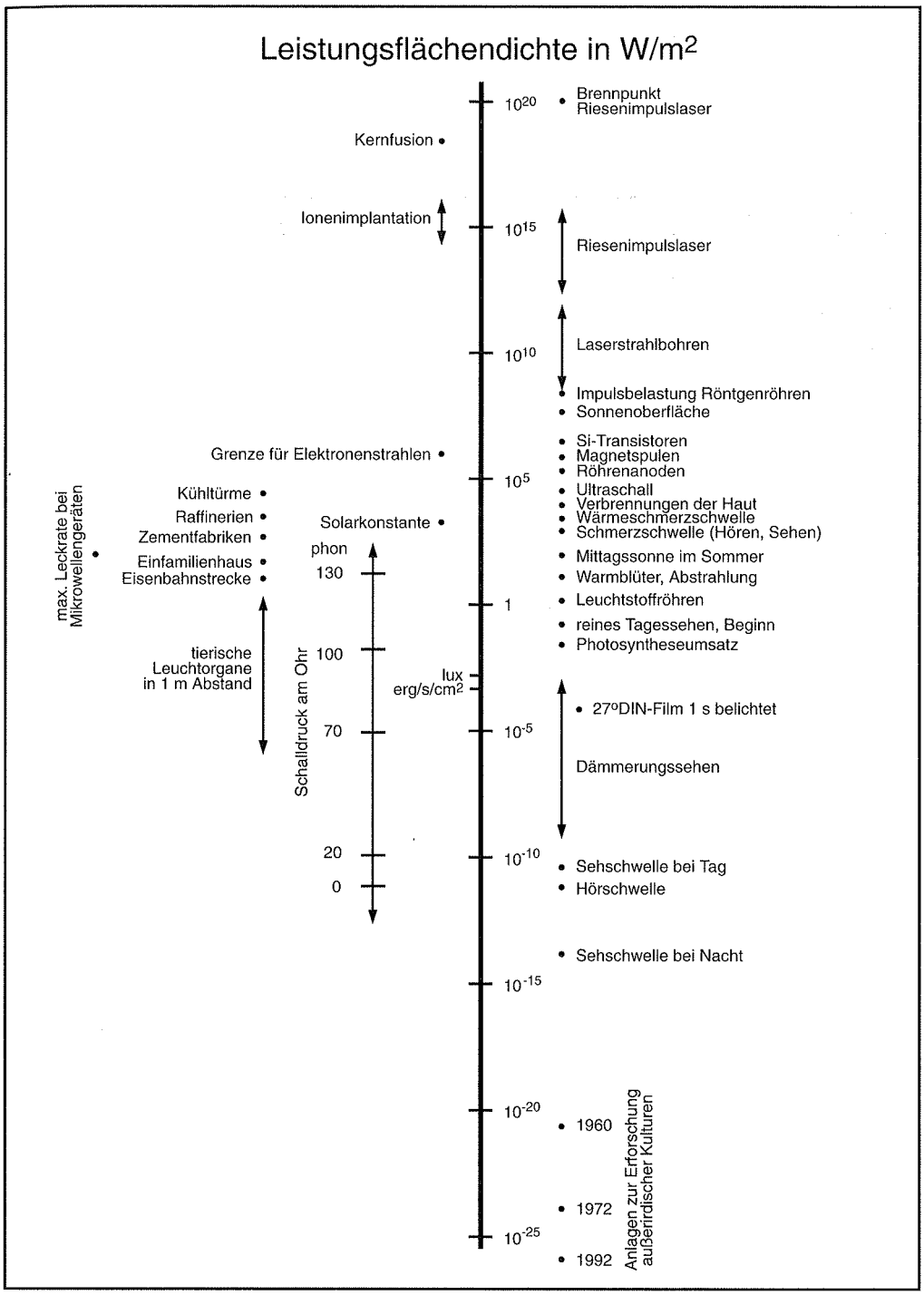
Für viele Probleme, die mit Strahlungen oder Wellenvorgängen zusammenhängen, ist die Leistung, die auf einer bestimmten Fläche umgesetzt wird interessant. Diese Leistungsflächendichte wird auch Energiestromdichte oder Intensität einer Strahlung oder Welle genannt.

Die aus den Basisgrößen des SI gebildete Maßeinheit für die Leistungsflächendichte ist das W/m^2.

Generell sind für die Leistungsflächendichte drei Fälle zu unterscheiden, für die in der Skale auch Beispiele zu finden sind:

- Trifft eine Strahlung auf eine Oberfläche, so entsteht dort eine Leistungsflächendichte. In diesem Sinne strahlt die Sonne mit einer Leistungsflächendichte von maximal 1370 W/m^2 auf die Erdoberfläche. Bei zu hoher Leistungsflächendichte kann Material so stark erhitzt werden, daß es dadurch bearbeitet oder gar zerstört werden kann.
- Andererseits kann eine Fläche Energie mit einer Leistungsflächendichte abstrahlen. An der Sonnenoberfläche herrschen z.B. um 10^8 W/m^2. Der Bezugspunkt aller Strahlungen ist für diese Betrachtungen der schwarze Körper. Bei ihm stehen Temperatur und Leistungsflächendichte in einem eindeutigen funktionalen Zusammenhang. Die genauere Analyse dieses Zusammenhangs führte Max Planck (1858–1947) 1900 zu seiner Strahlungsformel, die mit ihrer Forderung diskreter Energiequanten der Ausgangspunkt für die Quantentheorie war.
- Beim Durchgang von Strahlung durch Medien hat die Leistungsdichte ebenfalls Bedeutung. Überschreitet die Leistungsdichte bestimmte Grenzwerte pro Fläche (bzw. pro Volumen, vgl. Abschn. 3.3.7), so treten u.a. nichtlineare Effekte und damit i. allg. wesentlich höhere Verluste auf. Daraus ergeben sich für Materialien und die Strahlung spezifische Grenzleistungsdichten.

Bezüglich der sichtbaren Strahlung sei auf die Größen Leuchtdichte und Lichtstrom und deren Maßeinheiten verwiesen (vgl. Abschn. 3.8.1 und 3.8.2).


Leistungsflächendichte in W/m²
10²⁰
Brennpunkt
Riesenimpulslaser
Kernfusion
Ionenimplantation
10¹⁵
Riesenimpulslaser
10¹⁰
Laserstrahlbohren
Impulsbelastung Röntgenröhren
Sonnenoberfläche
Grenze für Elektronenstrahlen
Si-Transistoren
Magnetspulen
Röhrenanoden
10⁵
Ultraschall
Verbrennungen der Haut
Wärmeschmerzschwelle
Schmerzschwelle (Hören, Sehen)
Kühltürme
Raffinerien
Zementfabriken
Einfamilienhaus
Eisenbahnstrecke
max. Leckrate bei Mikrowellengeräten
Solarkonstante
phon
130
Mittagssonne im Sommer
Warmblüter, Abstrahlung
1
Leuchtstoffröhren
reines Tagessehen, Beginn
Photosyntheseumsatz
tierische Leuchtorgane in 1 m Abstand
Schalldruck am Ohr
100
lux
erg/s/cm²
27°DIN-Film 1 s belichtet
10⁻⁵
70
Dämmerungssehen
20
10⁻¹⁰
Sehschwelle bei Tag
0
Hörschwelle
Sehschwelle bei Nacht
10⁻¹⁵
10⁻²⁰
1960
1972
10⁻²⁵
1992
Anlagen zur Erforschung außerirdischer Kulturen

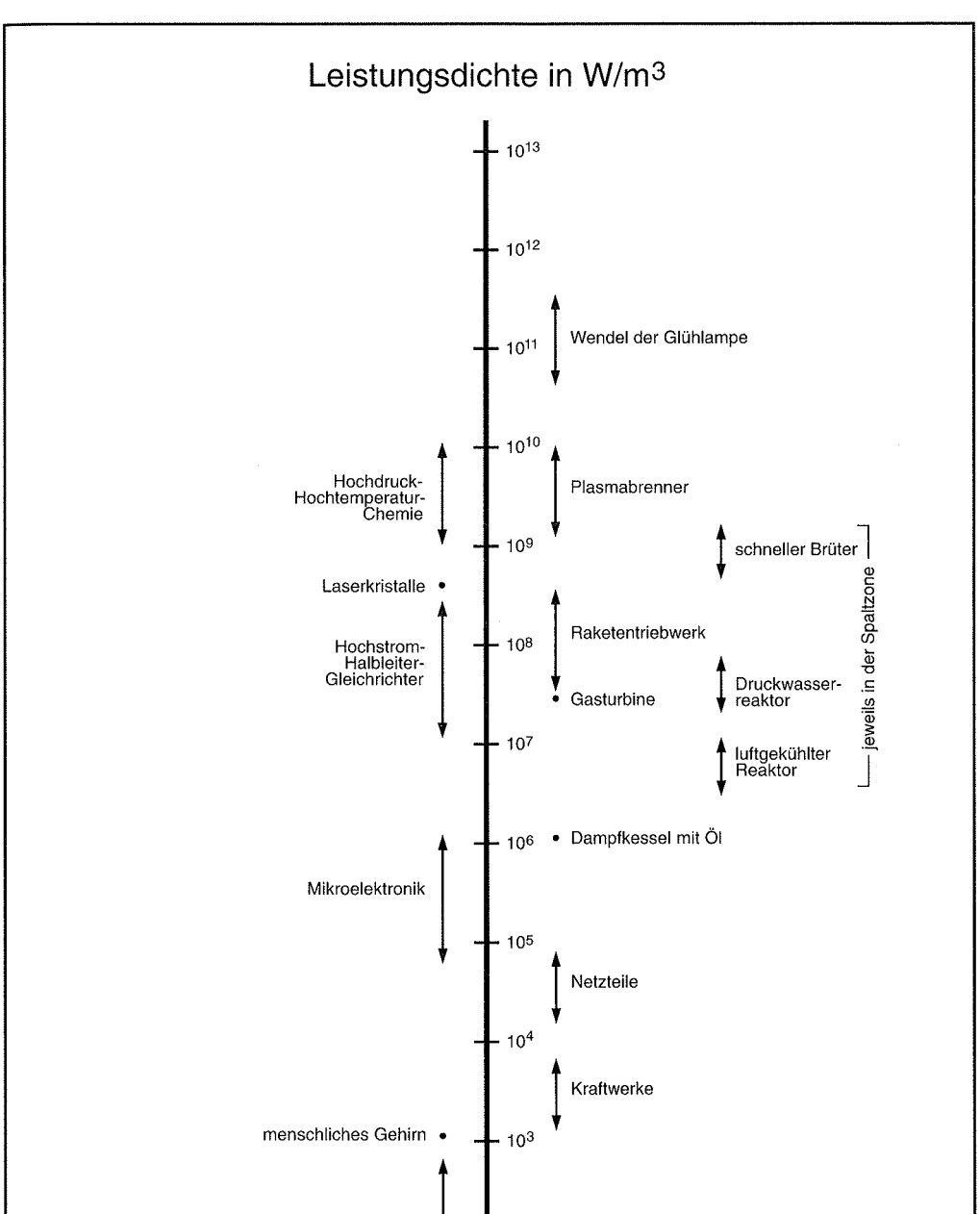
3.3.7 Leistungsdichte in Watt pro Kubikmeter ([Leistungsdichte] = W/m^3)

Leistung wird in einem bestimmten Raumbereich (Volumen) erzeugt, gespeichert bzw. umgesetzt (verbraucht). Zur Beschreibung dieser Prozesse dient die Leistungsdichte als Leistung pro Volumen.

Die Maßeinheit für die Leistungsdichte ist W/m^3.

Für die Leistungsdichte existieren technisch (und auch biologisch) bedingte Grenzwerte. Die Skale zeigt die typischen Bereiche für einige technische Anwendungen. Im Vergleich dazu ist die Leistungsdichte des menschlichen Gehirns angegeben.

Oftmals ist bei diesen Fragestellungen auch die Leistung bezogen auf eine bestimmte Masse von Interesse, deren Anbindung über die Dichte des Stoffes leicht möglich ist (vgl. Abschn. 3.3.8).


Leistungsdichte in W/m3
10^13
10^12
10^11
Wendel der Glühlampe
10^10
Plasmabrenner
Hochdruck-
Hochtemperatur-
Chemie
10^9
schneller Brüter
jeweils in der Spaltzone
Laserkristalle
Raketentriebwerk
10^8
Hochstrom-
Halbleiter-
Gleichrichter
Druckwasser-
reaktor
Gasturbine
10^7
luftgekühlter
Reaktor
10^6
Dampfkessel mit Öl
Mikroelektronik
10^5
Netzteile
10^4
Kraftwerke
menschliches Gehirn
10^3
Signalelektronik
100
Kondensatoren
10

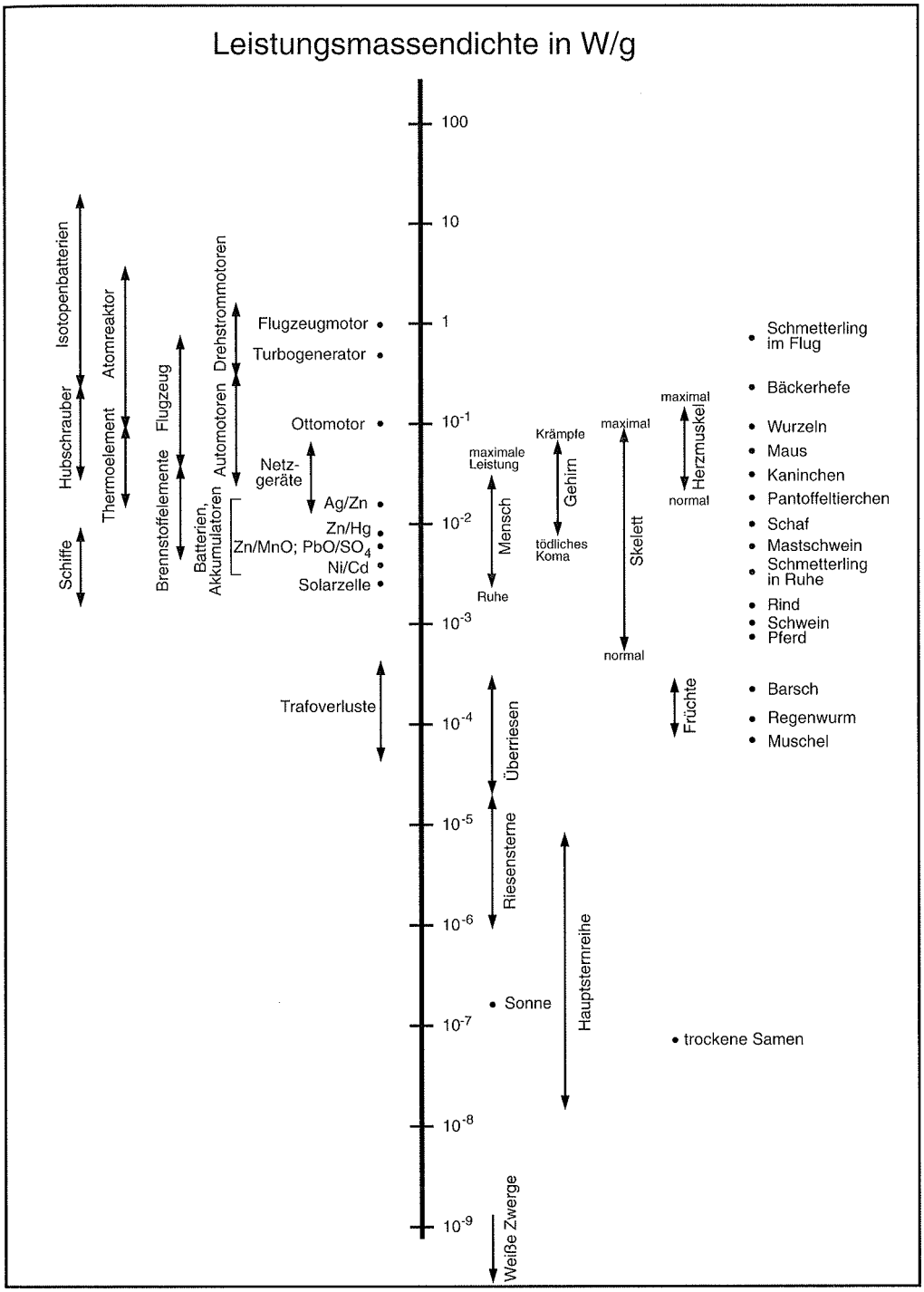
3.3.8 Leistungsmassendichte in Watt pro Kilogramm ([Leistungsmassendichte] = W/kg)

Leistung wird durch Umsatz einer bestimmten Masse erzeugt bzw. innerhalb einer bestimmten Masse umgesetzt. Deshalb ist die Leistungsmassendichte als Leistung pro Masseneinheit oft von Bedeutung.

Die Maßeinheit für die Leistungsmassendichte ist W/kg.

Steht bei der Leistungsdichte (Bezug zum Volumen) meist die Speicherfähigkeit im Vordergrund, so ist es hier mehr die Dynamik. Dies wird vor allem bei Bewegungsvorgängen deutlich, wenn z.B. die Leistung eines Motors eine bestimmte Masse in Bewegung setzen soll. So waren erst bei Überschreiten bestimmter Grenzwerte sinnvolle Fracht- und Passagierschiffe (Dieselmotor) und Flugzeuge (Otto-Motor) möglich.

Die Skale zeigt für verschiedene technische Bereiche erreichte Leistungsmassendichten. Die Maßeinheit wurde dabei leicht abweichend in W/g gewählt, weil dadurch die Vergleichbarkeit zu anderen Darstellungen besser gewahrt wird. Interessant sind auch die im biologischen Bereich möglichen Leistungsmassendichten z.T. über mehrere Zehnerpotenzen (Skelett) hinweg. Es ist wohl auch erstaunlich, daß der Unterschied der Leistungsmassendichte eines Schmetterlings in Ruhe und im Flug mehr als 2 Zehnerpotenzen beträgt, eine Steigerung, die der Mensch nicht fertigbringt.


Leistungsmassendichte in W/g
100
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
10^{-8}
10^{-9}
Isotopenbatterien
Hubschrauber
Atomreaktor
Thermoelement
Schiffe
Flugzeug
Brennstoffelemente
Batterien, Akkumulatoren
Automotoren
Drehstrommotoren
Flugzeugmotor
Turbogenerator
Ottomotor
Netz-geräte
Ag/Zn
Zn/Hg
Zn/MnO; PbO/SO4
Ni/Cd
Solarzelle
Trafoverluste
maximale Leistung
Mensch
Ruhe
Krämpfe
Gehirn
tödliches Koma
maximal
Skelett
normal
maximal
Herzmuskel
normal
Früchte
Überriesen
Riesensterne
Hauptsternreihe
Sonne
Weiße Zwerge
Schmetterling im Flug
Bäckerhefe
Wurzeln
Maus
Kaninchen
Pantoffeltierchen
Schaf
Mastschwein
Schmetterling in Ruhe
Rind
Schwein
Pferd
Barsch
Regenwurm
Muschel
trockene Samen

3.3.9 Energie in Joule ([Energie] = J)

Von Energie ist in unserem Leben täglich mit den unterschiedlichsten Bezügen die Rede. Wir benötigen Energie, um persönliche Probleme zu bewältigen, wir haben mit Energieversorgungsunternehmen zu tun und das sogenannte (weltweite) Energieproblem wird nicht mehr nur vom Club of Rome und den Umweltschützern diskutiert. Meist ist bei den Diskussionen der all diesen Problemkreisen zugrundeliegende physikalische Inhalt des Energiebegriffs nicht explizit gegenwärtig.

Energie ist die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. In der Mechanik unterscheidet man zwischen potentieller und kinetischer Energie. Die potentielle Energie befähigt einen Körper aufgrund seiner Lage in einem Kraftfeld zur Leistung von Arbeit. Bei der kinetischen Energie erhält der Körper durch seine Bewegung mit einer bestimmten Geschwindigkeit die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Die Verrichtung der Arbeit kann in der Mechanik als die Lageänderung eines Körpers vom Punkt P_1 zum Punkt P_2 infolge einer Kraft beschrieben werden. Die verrichtete Arbeit berechnet sich dann gemäß

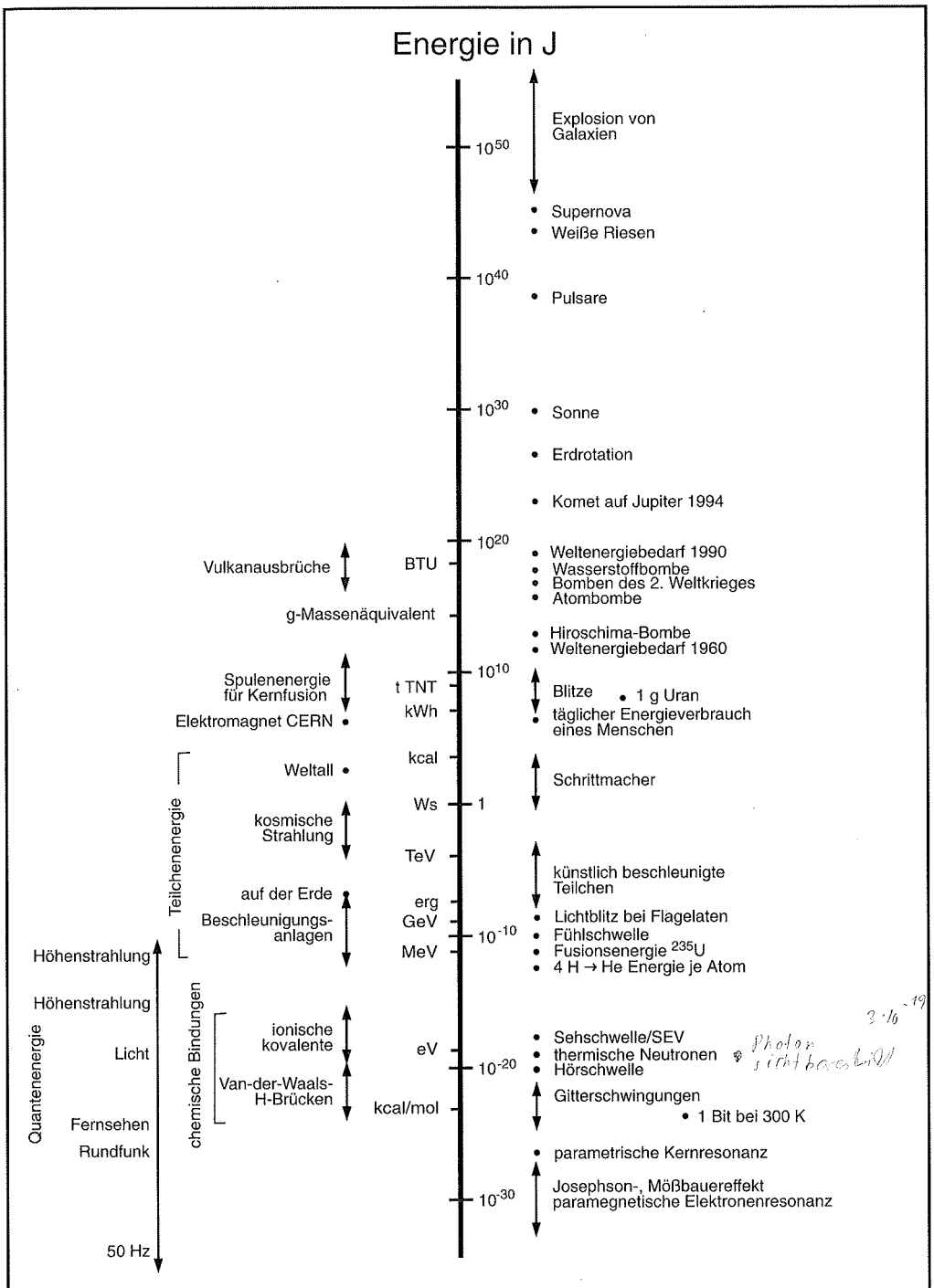
$$W_A = \int_{P_1}^{P_2} F \mathrm{d}s \,,$$

wobei hier wiederum vom Vektorcharakter der Kraft F und des Weges s abgesehen wurde. Daraus läßt sich die im SI gültige Maßeinheit für die Energie (die auch gleich der der Arbeit ist) ableiten. Sie ist nach dem englischen Physiker James Prescott Joule (1818–1889) benannt.

Ein Joule (1 J) ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn sich der Angriffspunkt einer Kraft von 1 N in Richtung der Kraft um 1 m verschiebt. Die Energie 1 J ist die Fähigkeit eines Systems, diese Arbeit zu verrichten. 1 J = 1 Ws = 1 Nm = 1 $\mathrm{kgm^2/s^2}$.

Energie tritt uns in verschiedensten Arten entgegen. Neben den in der Mechanik üblichen Unterscheidungen kennen wir z.B. noch elektrische, thermische und Kernenergie. Es ist daher oft zweckmäßig, mechanische Arbeit in Nm, Energie bzw. Wärmemenge in J und elektrische Arbeit in Ws anzugeben.

Aufgrund der allen diesen Energiearten inhärenten gleichen Eigenschaft, Arbeit verrichten zu können, sind sie untereinander äquivalent, und der zuerst in der Mechanik formulierte Energieerhaltungssatz wurde zu einem grundlegenden Prinzip der Physik. Der erste Schritt in diese Richtung war die Erkenntnis der Äquivalenz von mechanischer und Wärmeenergie und der Berechnung dieses Wärmeäquivalents 1842 durch Robert Mayer (1814–1878). Die Kopplung des Energieerhaltungssatzes mit dem Massenerhaltungssatz erfolgte durch die von Einstein formulierte Äquivalenz zwischen Energie und Masse gemäß $E = mc^2$. Auch zur heute wichtigen Theorie der Information sind Bezüge vorhanden, so ist für die Übertragung oder Speicherung eines Bit mindestens die Energie $E_{\mathrm{Bit}} = kT\ln 2$ notwendig. Dabei ist die T die Arbeitstemperatur in Kelvin und k die Boltzmann-Konstante.


Energie in J
Explosion von Galaxien
10^{50}
Supernova
Weiße Riesen
10^{40}
Pulsare
10^{30}
Sonne
Erdrotation
Komet auf Jupiter 1994
10^{20}
Weltenergiebedarf 1990
Wasserstoffbombe
Bomben des 2. Weltkrieges
Atombombe
Hiroschima-Bombe
Weltenergiebedarf 1960
10^{10}
Blitze
1 g Uran
täglicher Energieverbrauch eines Menschen
Schrittmacher
1
künstlich beschleunigte Teilchen
Lichtblitz bei Flagelaten
Fühlschwelle
Fusionsenergie ^{235}U
4 H → He Energie je Atom
10^{-10}
Sehschwelle/SEV
thermische Neutronen
Hörschwelle
10^{-20}
Gitterschwingungen
1 Bit bei 300 K
parametrische Kernresonanz
Josephson-, Mößbaueffekt
paramegnetische Elektronenresonanz
10^{-30}
Vulkanausbrüche
BTU
g-Massenäquivalent
Spulenenergie für Kernfusion
t TNT
kWh
Elektromagnet CERN
kcal
Weltall
Ws
kosmische Strahlung
TeV
auf der Erde
erg
Beschleunigungs-anlagen
GeV
MeV
eV
ionische kovalente
Van-der-Waals-H-Brücken
kcal/mol
Teilchenenergie
chemische Bindungen
Quantenenergie
Höhenstrahlung
Höhenstrahlung
Licht
Fernsehen
Rundfunk
50 Hz

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß zur Beschreibung unserer Welt offenbar sich komplementär ergänzende, aber auch zusammenhängende grundlegende „Bilder" existieren. Nachdem dies in der Physik mit den Größen Masse und Energie deutlich geworden war, führte die Information zu neuen Diskussionen. Norbert Wiener (1894–1964) schrieb um 1950: „Information ist Information, weder Stoff noch Energie". Heute wird dies im Sinne von drei sich ergänzenden Modellen unserer (physischen) Welt interpretiert. Stoff ist u.a. ideal zur Beschreibung von chemischen Prozessen, Energie ist die entscheidende Grundlage der Physik und Information erfaßt Prozesse, die eine neuartige Beschreibung erfordern. Sie wird vor allem in der Informatik, Kommunikation und bei neuen Medien benötigt (vgl. auch Abschn. 3.10.1). Die entsprechenden Zusammenhänge verdeutlicht Abbildung 3.2. Die Grenzen werden durch die Formeln ausgewiesen. Der Informationsträger ist senkrecht schraffiert, der Energieträger waagerecht (weitere Details hierzu enthält Völz 1994). Auf die besondere Bedeutung gerade von Energie und Information wird später noch einmal zurückzukommen sein, dies auch unter dem Gesichtspunkt der Stellung ihrer Einheiten im Maßsystem.

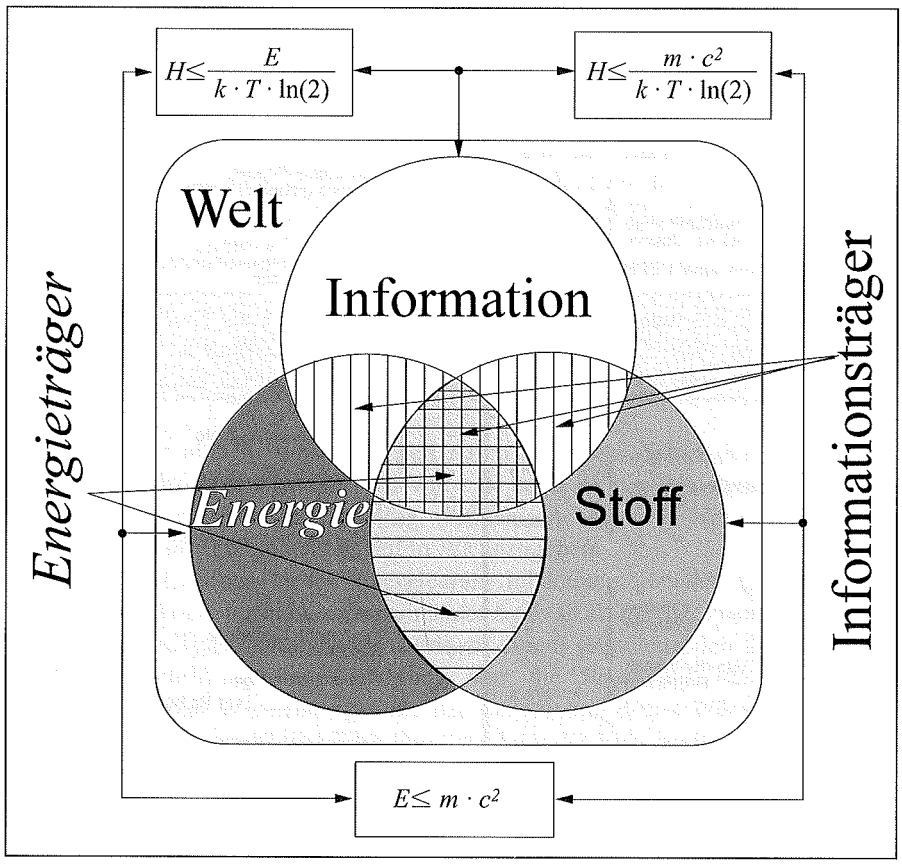


Abb. 3.2
Zusammenhang zwischen Energie, Stoff und Information

Aufgrund des Energieerhaltungssatzes kann keine Energie „verlorengehen". Sie wird immer von einer Art in eine andere umgewandelt. Insofern muß die Diskussion um das weltweite Energieproblem nicht darum geführt werden, ob genug Energie da ist, sondern die Frage ist, ob wir genügend für unsere Prozesse nutzbare Energie zur Verfügung haben. Energie wird nämlich i. allg. bei ihrer Umwandlung in andere Arten „entwertet", nicht jede Art von Arbeit kann mit jeder Energieart geleistet werden. Ein Maß für die „Güte" der Energie ist die Entropie.[1]

Die Skale erfaßt eine Vielzahl typischer Energien in einem Bereich von mehr als 80 Zehnerpotenzen. Die größten bisher bekannten Energien treten bei der Explosion von Galaxien auf, wobei bei der Bestimmung dieser Energien theoretische Annahmen über die ablaufenden Prozesse eingehen. Die bei Sternbildungen notwendigen Energien liegen etwa 10 Zehnerpotenzen niedriger. Die größten von Menschenhand freigesetzten Energiebeträge wurden durch die Atom- und Wasserstoffbombe erreicht. Bei den einzelnen Atomen liegen die Energieumsätze vergleichsweise niedrig. Wenn vier Wasserstoffatome zu einem Heliumatom fusionieren, werden nur etwa 10^{-12} J frei. Erst die Vielzahl der in Kernprozessen beteiligten Atome ergibt die enormen freigesetzten Energiebeträge.

Weitere gebräuchliche Energieeinheiten sind:

1 BTU	$= 1{,}055\,8892 \cdot 10^3$ J	(Britisch Thermal Unit)
1 cal	$= 4{,}186\,84$ J	(Kalorie)
1 kcal	$= 4{,}186\,84 \cdot 10^3$ J	(Kilokalorie)
1 erg	$= 1 \cdot 10^{-7}$ J	
1 ft lb	$= 1{,}356\,26$ J	($\approx 0{,}1383$ kpm)
1 kpm	$= 9{,}806\,65$ J	
1 kWh	$= 3{,}6 \cdot 10^6$ J	(Kilowattstunde)
1 eV	$= 1{,}602\,19 \cdot 10^{-19}$ J	(Elektronenvolt)

[1] Als spezielle Maßeinheit für die Entropie wird die nach dem deutschen Physiker R. E. J. Clausius (1822–1888) benannte Einheit verwendet: 1 Clausius = 1 Cl = 1 cal/K.

3.3.10 Bestrahlung in Joule pro Quadratmeter ([Bestrahlung] = J/m^2)

In vielen praktischen Anwendungen erzeugt auf bestimmten Flächen in Form von Strahlung auftreffende Energie bestimmte Prozesse. So löste die Energie des auf einen Film auftreffenden Lichtes die für die Schwärzung notwendigen chemischen Reaktionen aus. Je nach der auf eine bestimmte Fläche auftreffenden Menge der Energie wird der ausgelöste Prozeß unterschiedlich ablaufen. In der Regel existiert auch ein Grenzwert der notwendigen Energie pro Fläche, unterhalb dessen keine Reaktion erfolgt. Diese Relationen treten nicht nur in der Technik auf, sondern sind auch in der Natur realisiert, wie uns das Beispiel des menschlichen Auges zeigt.

Um solche Vorgänge beschreiben und charakterisieren zu können, führt man analog zur Leistungsflächendichte (vgl. Abschn. 3.3.6) die Bestrahlung als einfallende Energie pro Flächeneinheit ein, die somit einer Flächenenergiedichte entspricht.

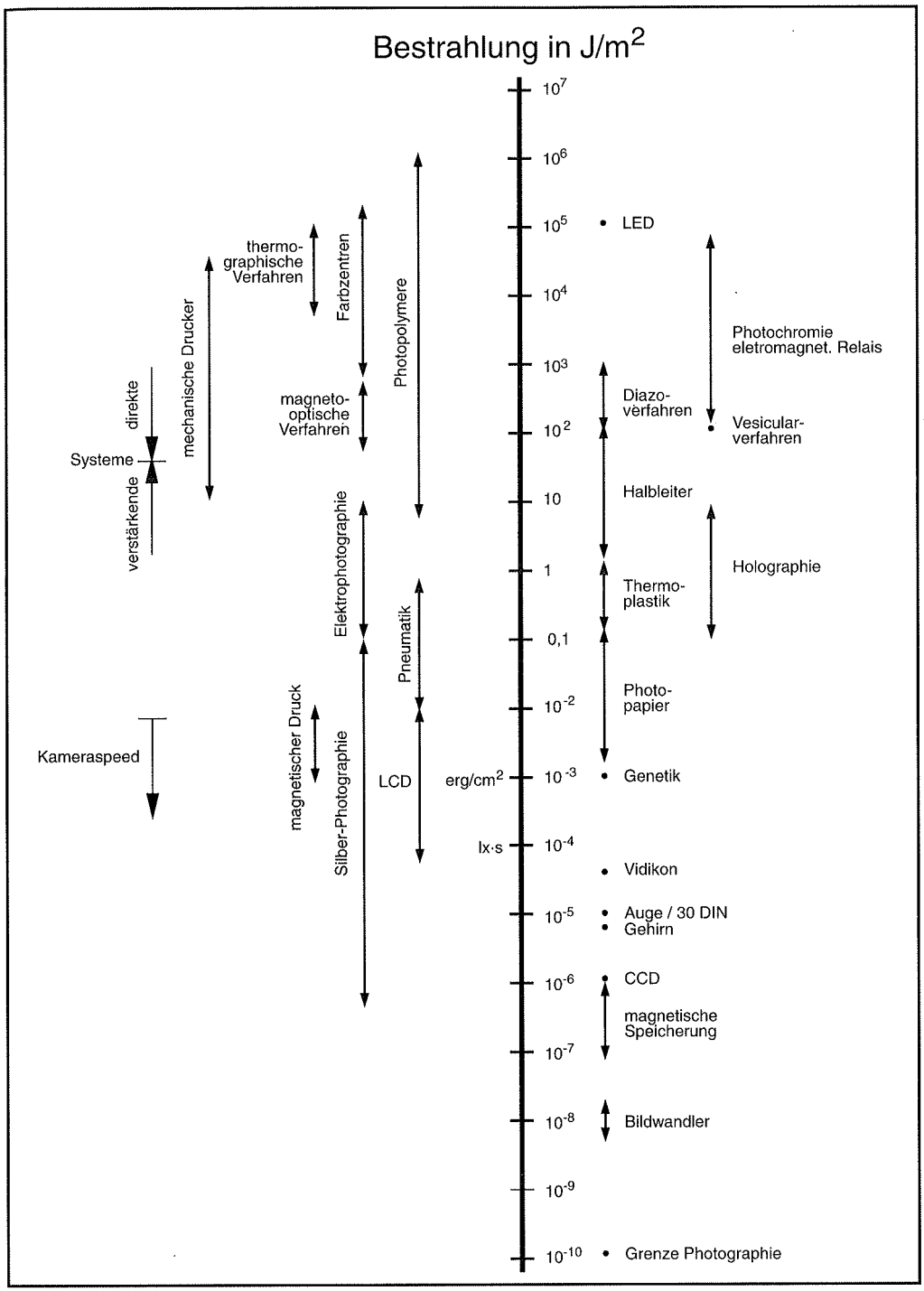
Die aus den Basisgrößen des SI gebildete Maßeinheit für die Bestrahlung ist das J/m^2.

Die Skale zeigt vor allem Werte für verschiedene Strahlungsempfänger und für verschiedene Druckverfahren. Als Vergleich ist die Bestrahlung angegeben, die für eine Reaktion des menschlichen Auges notwendig ist. Erstaunlich sind die relativ geringen Werte in dieser Skale.

Die der Bestrahlung korrespondierende Größe der Photometrie, die die physiologische Wirkung der Strahlung berücksichtigt, ist die Belichtung (vgl. Abschn. 3.8.4).

In der Astro- bzw. der Sonnenphysik wird für die pro Quadratzentimeter der Erdoberfläche einfallende Sonnenenergie die nach dem englischen Wissenschaftler S. P. Langley (1834–1906) benannte Einheit verwendet:

1 langlay = 1 lan (1 ly) = 1 cal/cm^2 = 4,1868 J/cm^2.


Bestrahlung in J/m2
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0,1
10^-2
10^-3
10^-4
10^-5
10^-6
10^-7
10^-8
10^-9
10^-10
erg/cm2
lx·s
LED
Photochromie
eletromagnet. Relais
Diazo-
verfahren
Vesicular-
verfahren
Halbleiter
Holographie
Thermo-
plastik
Photo-
papier
Genetik
Vidikon
Auge / 30 DIN
Gehirn
CCD
magnetische
Speicherung
Bildwandler
Grenze Photographie
thermo-
graphische
Verfahren
Farbzentren
magneto-
optische
Verfahren
Photopolymere
direkte
Systeme
verstärkende
mechanische Drucker
Elektrophotographie
Pneumatik
magnetischer Druck
Silber-Photographie
LCD
Kameraspeed

3.3.11 Räumliche Energiedichte in Joule pro Kubikmeter ([Räumliche Energiedichte] = J/m^3)

Will man wissen, wieviel Energie in einem bestimmten Volumen gespeichert werden kann oder wieviel Energie innerhalb eines bestimmten Volumens erzeugt werden kann (z.B. durch Kernprozesse), dann ist die räumliche Energiedichte für die Beschreibung sehr günstig.

Die aus den Basiseinheiten des SI gebildete Maßeinheit der räumlichen Energiedichte ist das J/m^3.

Die räumliche Energiedichte ist eine wichtige Größe für die gesamte Energietechnik. Über die Dichte erreicht man die Ankopplung an die Energiemassendichte (vgl. Abschn. 3.3.12).

Solange klassische physikalische Prozesse genutzt werden, kann für die räumliche Energiedichte ein Wert von 0,5 J/cm^3 kaum überschritten werden. Dies ist damit auch die obere Grenze für alle bisher üblichen Speicherverfahren für Informationen, mit dem ebenfalls theoretischen Grenzwert für die pro Bit minimale Energie $E_{Bit} = kT\ln 2$ (T absolute Temperatur, k Boltzmann-Konstante) folgt dann eine maximale Kapazität von rund 10^{23} Bit/m^3.

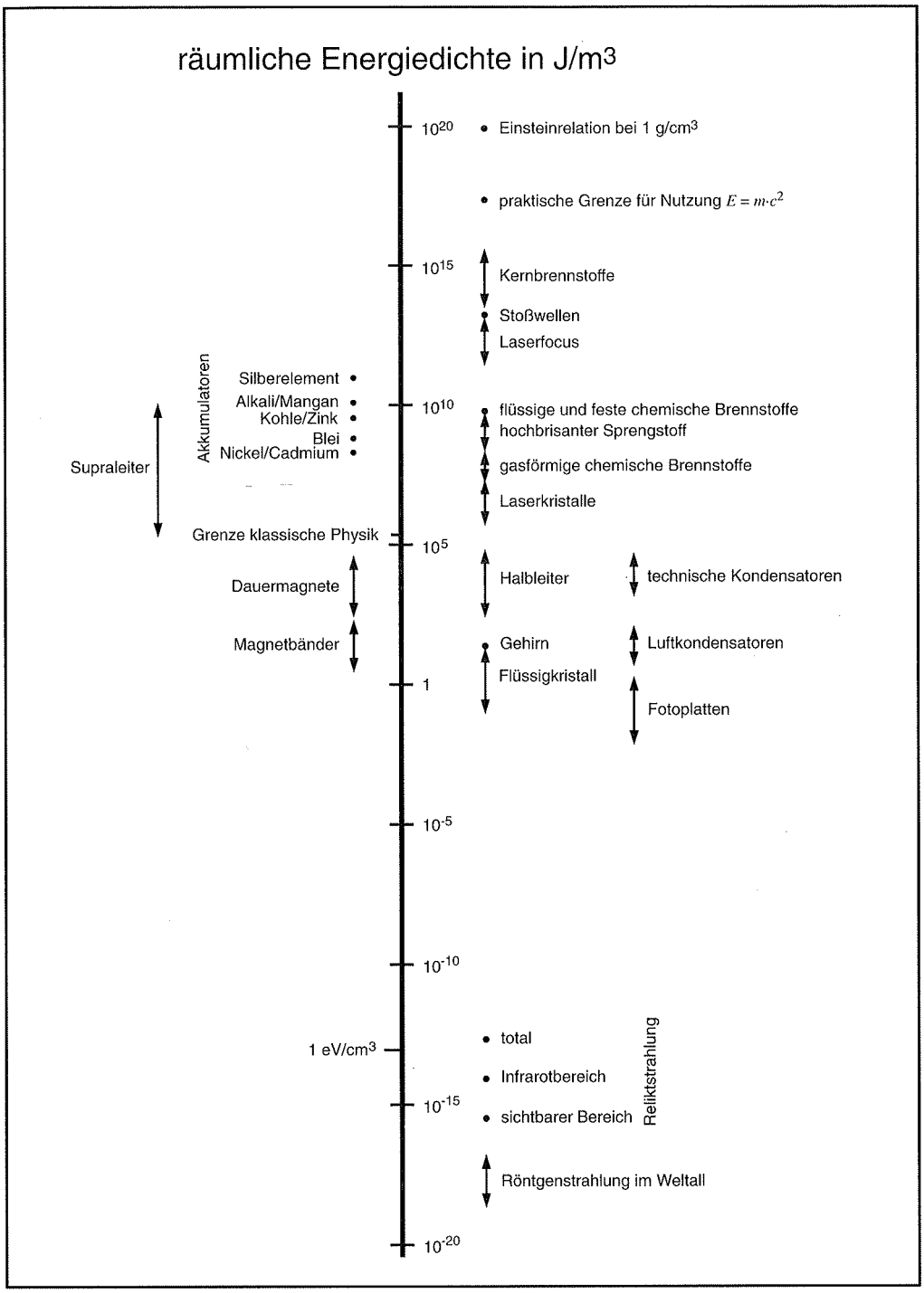
Chemische Prozesse ermöglichen erheblich höhere Energiedichten. Sie haben ihre Hauptanwendungen bei den Brennstoffen, Batterien und Akkumulatoren. Die erreichbare Obergrenze liegt hier bei etwa 10^{12} J/m^3.

Die größte Energiedichte ermöglichen Kernprozesse, da sie in einem verhältnismäßig geringen Volumenbereich ablaufen.

Die verschiedenen Meß- und Nachweismethoden arbeiten bei sehr kleinen Energiedichten. Nur so war die Entdeckung der Relikt- oder 3K-Hintergrundstrahlung des Weltalls möglich, die für unser physikalisches Weltverständnis eine Schlüsselrolle spielt. Sie ist eine wesentliche Stütze für die Theorie vom Urknall (Big Bang).

Im angelsächsischen Raum ist noch folgende Maßeinheit gebräuchlich:

1 BTU/cu ft $= 3{,}997 \cdot 10^5$ J/m^3 (British Thermal Unit per cubic foot)


räumliche Energiedichte in J/m3
10^20
Einsteinrelation bei 1 g/cm3
praktische Grenze für Nutzung E = m·c^2
10^15
Kernbrennstoffe
Stoßwellen
Laserfocus
Akkumulatoren
Silberelement
Alkali/Mangan
Kohle/Zink
Blei
Nickel/Cadmium
10^10
flüssige und feste chemische Brennstoffe
hochbrisanter Sprengstoff
gasförmige chemische Brennstoffe
Laserkristalle
Supraleiter
Grenze klassische Physik
10^5
Halbleiter
technische Kondensatoren
Dauermagnete
Magnetbänder
Gehirn
Luftkondensatoren
Flüssigkristall
1
Fotoplatten
10^-5
10^-10
1 eV/cm3
total
Infrarotbereich
sichtbarer Bereich
Reliktstrahlung
10^-15
Röntgenstrahlung im Weltall
10^-20

3.3.12 Energiedichte in Joule pro Kilogramm ([Energiedichte] = J/kg)

In praktischen Fällen wird Energie in der für die Nutzung gewünschten Art aus Masse erzeugt (z.B. Wärme durch Verbrennung oder Kernumwandlung) bzw. es wird eine erzeugte Energieart mit Hilfe von z.B. chemischen Prozessen in einer bestimmten Masse gespeichert (z.B. Elektroenergie in Akkumulatoren). Deswegen ist die sich aus dem Bezug der Energie zu einer bestimmten Masse ergebende Energiedichte eine wichtige Größe für die gesamte Energietechnik.

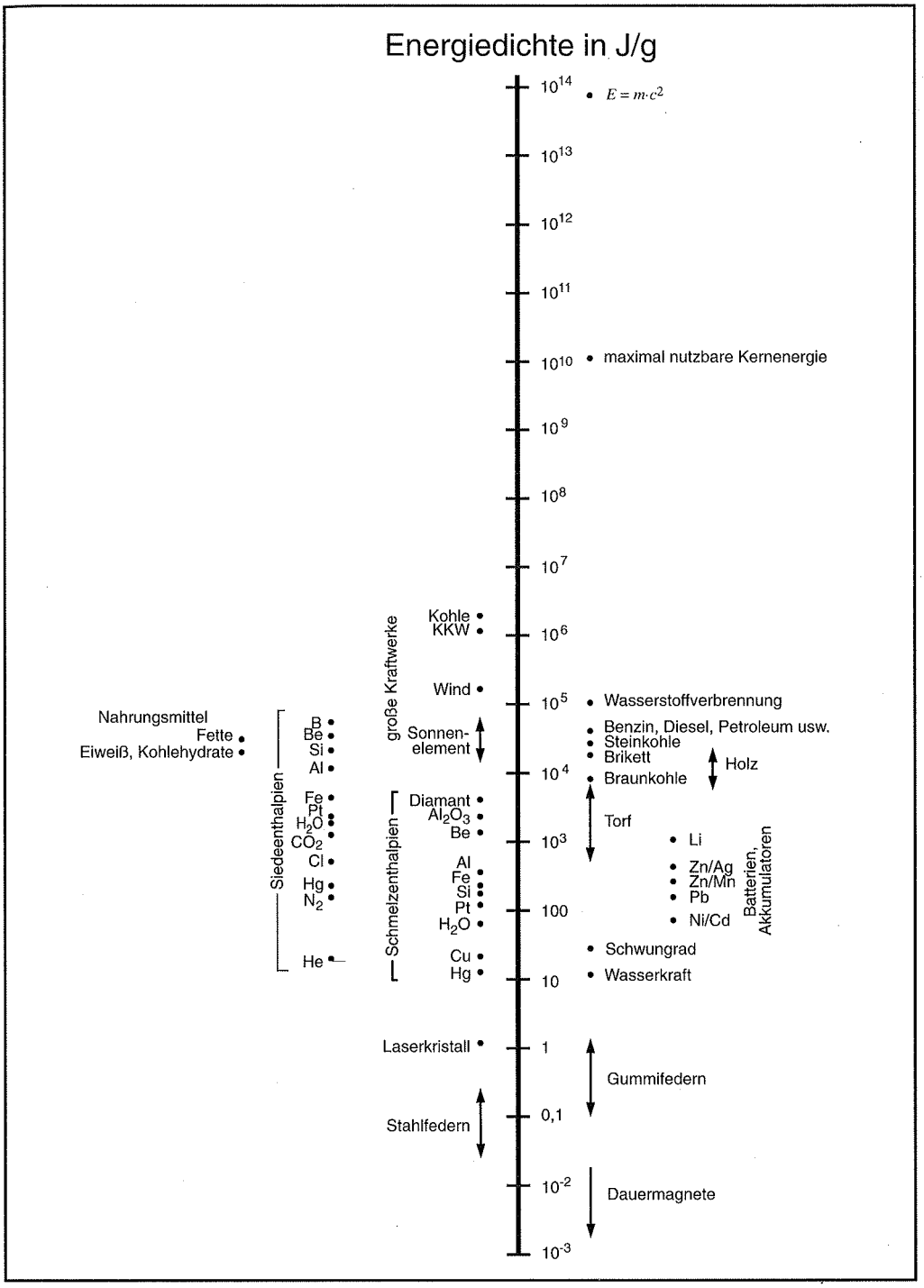
Die Maßeinheit für die Energiedichte ist J/kg.

Für die Abschätzung der physiologischen Wirkung energiereicher Strahlung ist ebenfalls der Energieumsatz innerhalb einer bestimmten Masse entscheidend. Zur Erfassung dieser Effekte dient die Größe Energiedosis (vgl. Abschn. 3.9.3).

Der Zusammenhang zur räumlichen Energiedichte kann über die Dichte der betrachteten Masse leicht hergestellt werden. In der Praxis wird aber bei vielen Anwendungen die hier betrachtete Energiedichte verwendet. Die Skalenwerte sind wegen der Vergleichbarkeit zu anderen wieder in J/g angegeben.

Aus den eingetragenen Werten lassen sich interessante Aussagen über zukunftsträchtige Entwicklungen ableiten. Die Differenz der Energiedichte bei Wasserstoffverbrennung zu der der üblichen Primärenergieträger (Holz, Kohle, Benzin) läßt diese Technologie als eine interessante Technologie für die Zukunft erscheinen. Auch die Energiedichte von Gummifedern im Verhältnis zu Stahlfedern läßt die Frage aufkommen, ob hier nicht noch ein größeres Anwendungspotential als bisher liegt. Unter anderem ist diese Situation auch ein Grund dafür, warum der Gummimotor noch immer für einfache Flugmodelle nützlich ist.

Die Skale enthält ferner noch Werte der Siede- und Schmelzenthalpien. Diese sind für die Aggregatumwandlung für Werkstoffe interessant. Die Angabe der Enthalpien macht deutlich, daß es sich um Aggregatzustandsänderungen bei konstantem Druck handelt. Die Enthalpie ist nämlich bei isobaren Prozessen gleich der aufgenommenen (oder abgegebenen) Wärmemenge. Sie wird deshalb auch oft als Wärmefunktion oder Wärmeinhalt bezeichnet.


Energiedichte in J/g
10^{14}
$E = m \cdot c^2$
10^{13}
10^{12}
10^{11}
10^{10}
maximal nutzbare Kernenergie
10^{9}
10^{8}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
Wasserstoffverbrennung
Benzin, Diesel, Petroleum usw.
Steinkohle
Brikett
Holz
10^{4}
Braunkohle
Torf
10^{3}
Li
Zn/Ag
Zn/Mn
Pb
Ni/Cd
Batterien, Akkumulatoren
100
Schwungrad
10
Wasserkraft
1
Gummifedern
0,1
10^{-2}
Dauermagnete
10^{-3}
große Kraftwerke
Kohle
KKW
Wind
Sonnen-element
Schmelzenthalpien
Diamant
Al_2O_3
Be
Al
Fe
Si
Pt
H_2O
Cu
Hg
Laserkristall
Stahlfedern
Siedeenthalpien
B
Be
Si
Al
Fe
Pt
H_2O
CO_2
Cl
Hg
N_2
He
Nahrungsmittel
Fette
Eiweiß, Kohlehydrate

3.3.13 Dynamische Viskosität in Pascalsekunde ([Dynamische Viskosität] = 1 Pa · s)

Bewegt man einen beliebigen Körper in Flüssigkeiten (oder Gasen), so müssen auch bei Abwesenheit äußerer Kräfte noch andere bewegungshindernde Kräfte überwunden werden, deren Ursache damit in der Flüssigkeit selbst liegt. Diesen Effekt kennt jeder, der einen Pinsel aus einem Farbtopf ziehen will. Die Flüssigkeitsteilchen am Pinsel müssen mit den benachbarten in einer Wechselbeziehung stehen. Diese Bewegungshinderung bezeichnet man als innere Reibung, Viskosität oder Zähigkeit der Flüssigkeit (oder des Gases). Die mathematische Beschreibung dieses Phänomens führt zu einer Gleichung zwischen der Kraft und der Abnahme der Geschwindigkeit senkrecht zur Wirkungsrichtung der Kraft, in der eine materialabhängige Proportionalitätskonstante η auftritt:

$$F = \eta A \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}s}.$$

Diese heißt dynamische Viskosität. Entsprechend diesem Zusammenhang ergibt sich die aus den SI-Einheiten zusammengesetzte Maßeinheit.

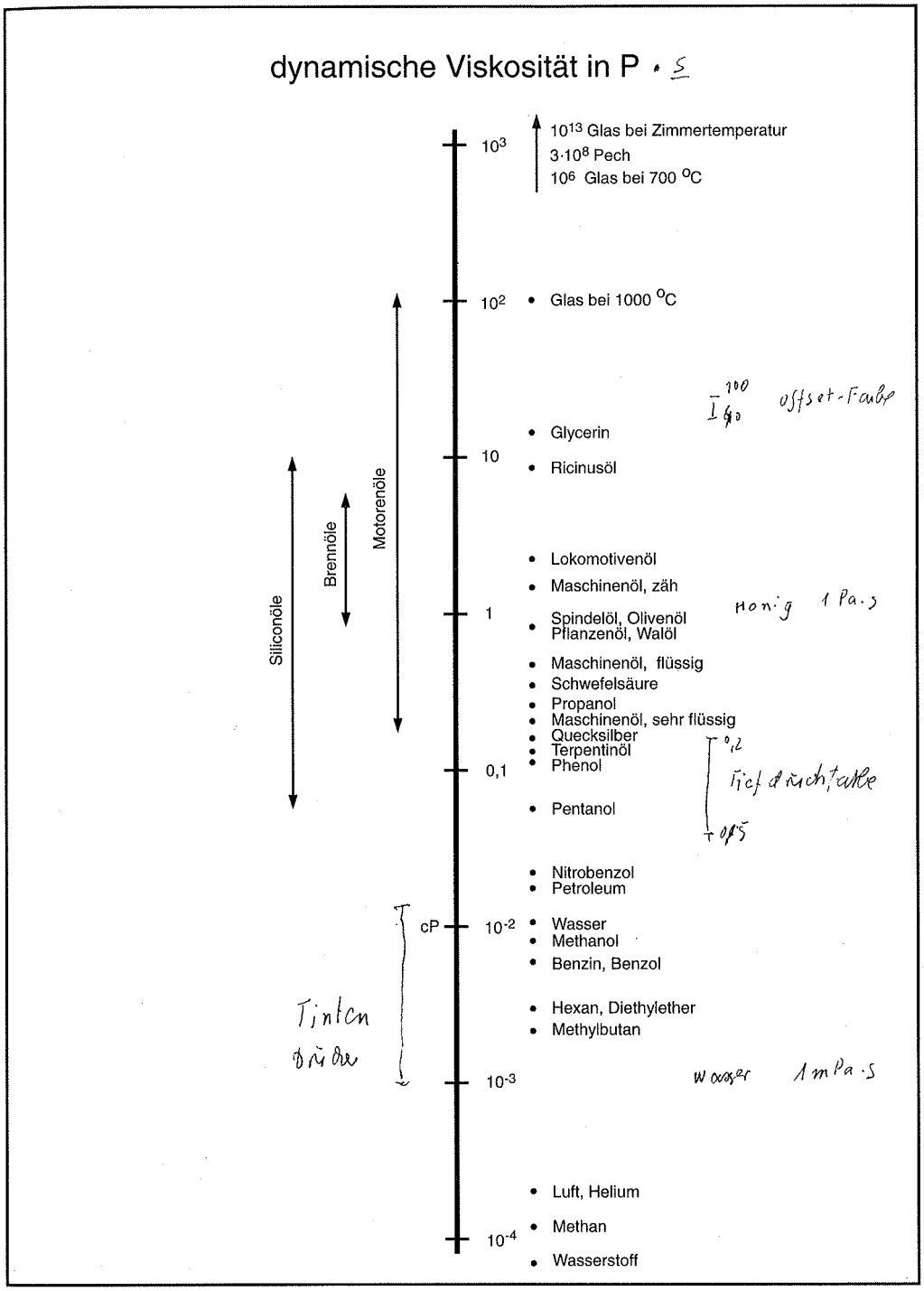
Die Maßeinheit für die dynamische Viskosität ist Pas. 1 Pas = 1 Ns/m^2 = 1 kg/ms.

Die dynamische Viskosität ist eine stark temperaturabhängige Größe. Die Temperaturabhängigkeit ist vielfach exponentiell. Für Flüssigkeiten sinkt sie mit steigender Temperatur, bei Gasen hingegen steigt sie entsprechend. Unter bestimmten Voraussetzungen (mittlere freie Weglänge klein gegenüber den Gefäßabmessungen) ist die dynamische Viskosität für Gase unabhängig vom Druck. Wenn nicht anders vermerkt, sind die Werte in der Skale für Zimmertemperatur angegeben.

Zur Messung der dynamischen Viskosität sind spezielle Meßgeräte – Viskosimeter – entwickelt worden. Diese nutzen entweder das Fließverhalten des untersuchten Stoffes in Kapillaren unter kleinen Druckdifferenzen (Kapillarviskosimeter) oder das Fallen eines definierten Körpers in dem untersuchten Stoff (Fallkörperviskosimeter). Eine auch für Gase unter sehr kleinem Druck anwendbare Möglichkeit ist die Messung der Beeinflussung von Torsionsschwingungen, die durch den untersuchten Stoff gebremst werden (dynamische Viskosimeter).

Weitere übliche Maßeinheiten:

1 P	= 0,1 Pas (1 Poise, nach Jean Louis Marie Poiseuille (1799–1869))
1 $dyns/cm^2$	= 0,1 Pas
1 kps/m^2	= 9,81 Pas


dynamische Viskosität in P
10^{13} Glas bei Zimmertemperatur
$3 \cdot 10^{8}$ Pech
10^{6} Glas bei 700 °C
10^{3}
10^{2}
Glas bei 1000 °C
Glycerin
10
Ricinusöl
Lokomotivenöl
Maschinenöl, zäh
1
Spindelöl, Olivenöl
Pflanzenöl, Walöl
Maschinenöl, flüssig
Schwefelsäure
Propanol
Maschinenöl, sehr flüssig
Quecksilber
Terpentinöl
0,1
Phenol
Pentanol
Nitrobenzol
Petroleum
cP
10^{-2}
Wasser
Methanol
Benzin, Benzol
Hexan, Diethylether
Methylbutan
10^{-3}
Luft, Helium
Methan
10^{-4}
Wasserstoff
Siliconöle
Brennöle
Motorenöle

3.3.14 Kinematische Viskosität und Diffusion in Quadratmeter je Sekunde ([Kinematische Viskosität] = m^2/s)

Es sei hier vorangestellt, daß die Größen kinematische Viskosität und Diffusion inhaltlich nicht zusammen gehören. Sie werden hier nur wegen ihrer gleichen Maßeinheit in einer Skale dargestellt.

Kinematische Viskosität

War bei der dynamischen Viskosität der Ausgangspunkt die Betrachtung, daß in der ruhenden Flüssigkeit durch eine Kraft eine Geschwindigkeit induziert wird, so geht man hier vom umgekehrten Fall aus. Es wird eine Flüssigkeit (das Gesagte gilt für Gase analog) betrachtet, die sich als Strömung bewegt. Dabei wird sowohl an den Randflächen wie auch im Innern der Flüssigkeit infolge der Reibung Energie verbraucht. Generell werden drei Arten der Strömung unterschieden: laminare Strömung, Strömung mit Randschichtablösung und turbulente Strömung. Mit zunehmender Geschwindigkeit treten diese Arten nacheinander auf. Die den Umschlag von einer Art in die andere charakterisierende Größe heißt Reynoldszahl und ergibt sich nach

$$Re = vl / \nu$$

aus der Geschwindigkeit v, der die Geometrie beinhaltenden Größe l (z.B. Rohrdurchmesser) und ν - der kinematischen Viskosität. Formal ergibt sich ν aus der dynamischen Viskosität unter Berücksichtigung der Dichte ρ des Stoffes:

$$\nu = \eta/\rho.$$

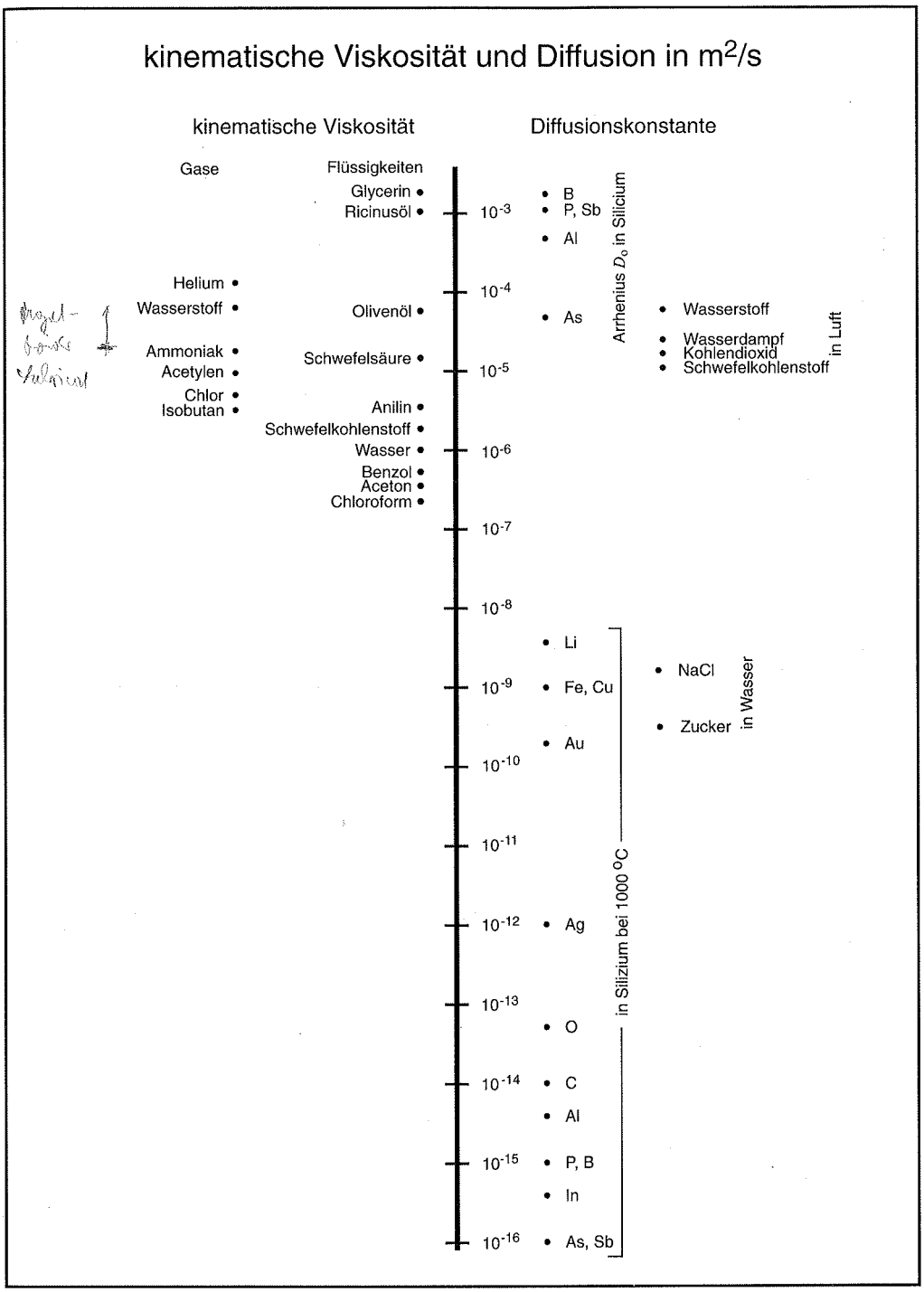
Damit kann die Maßeinheit aus den SI-Basiseinheiten konstruiert werden.

Die Maßeinheit für die kinematische Viskosität ist m^2/s.

Bis zu Werten der Reynoldszahl von 100 existiert laminare und ab knapp 10^5 turbulente Strömung. Letztere verbraucht infolge der dabei auftretenden Wirbel überproportional viel Energie und es wird bei technischen Prozessen manchmal viel Aufwand getrieben, um die Wirbelbildung zu unterbinden. Allerdings können diese Wirbel auch zuweilen erwünscht sein, z.B. wenn man eine besonders gute Durchmischung erreichen will.

Bei technischen Ölen verwendet man zur Charakterisierung der Viskosität vielfach sogenannte ISO-Klassen:

Hydrauliköle	10	46	100 cSt
Schmieröle	5	68	680 cSt
Wärmeträgeröle	15	55	150 cSt.


kinematische Viskosität und Diffusion in m²/s
kinematische Viskosität
Diffusionskonstante
Gase
Flüssigkeiten
Glycerin
Ricinusöl
Olivenöl
Schwefelsäure
Anilin
Schwefelkohlenstoff
Wasser
Benzol
Aceton
Chloroform
Helium
Wasserstoff
Ammoniak
Acetylen
Chlor
Isobutan
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
10⁻⁶
10⁻⁷
10⁻⁸
10⁻⁹
10⁻¹⁰
10⁻¹¹
10⁻¹²
10⁻¹³
10⁻¹⁴
10⁻¹⁵
10⁻¹⁶
B
P, Sb
Al
As
Li
Fe, Cu
Au
Ag
O
C
Al
P, B
In
As, Sb
Arrhenius D_o in Silicium
in Silizium bei 1000 °C
Wasserstoff
Wasserdampf
Kohlendioxid
Schwefelkohlenstoff
in Luft
NaCl
Zucker
in Wasser

Weitere Maßeinheiten:

1 St	$= 10^{-4}$ m^2/s	(Stokes, nach George Gabriel Stokes(1819–1903)
1 °E	= 0,132 cSt	(Engler-Grad, gilt als Näherung für Werte > 5 °E)
1 S	= 4,62 cSt	(Sayboldt-Sekunde)
1 R	= 4,05 cSt	(Redwood-Sekunde).

Diffusion

Infolge der immer vorhandenen Wärmeenergie existiert für alle Atome, Moleküle und andere Teilchen eine gewisse, mit der Temperatur zunehmende Wärmebewegung. Dabei versuchen die Teilchen, den vorhandenen Raum möglichst mit statistischen Schwankungen ständig gleichmäßig auszufüllen. Der sich daraus ergebende Ortswechsel heißt Diffusion. Selbst- oder Eigendiffusion gilt für gleichartige Teilchen. Bei der Fremddiffusion breitet sich eine Teilchenart innerhalb einer anderen aus. Beschreibt man diesen Vorgang mittels einer entsprechenden Differentialgleichung, so tritt darin eine Stoffkonstante auf, die sich aus zwei für den jeweiligen Stoff charakteristischen Größen ergibt:

$$D = \frac{1}{3}\overline{v}\overline{l}\,.$$

$\overline{v}$ bist die mittlere Geschwindigkeit der diffundierenden Teilchen und $\overline{l}$ ist ihre mittlere freie Weglänge. D ist die Diffusionskonstante.

Die Maßeinheit der Diffusionskonstanten ist m^2/s.

Die Diffusionskonstante ist temperaturabhängig entsprechend der Arrhenius-Gleichung

$$D = D_0 \exp(-E_0 / kT)\,.$$

Dabei ist D_0 die Arrhenius-Konstante, E_0 eine Aktivierungsenergie (zwischen 3,4 und 4 eV), k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur.

Bei der Fremddiffusion ist es entscheidend, welcher Stoff in welchen diffundiert. Die Skale zeigt Beispiele für die Diffusion in Luft, Wasser und Silicium. Der letztere Fall ist für die Halbleitertechnik bei der Herstellung von Bauelementen sehr wichtig. Die großen Unterschiede der Diffusionskonstanten lassen sich für die Herstellung von pnp-Übergängen in Transistoren nutzen.

Auch für die Arrhenius-Konstanten sind einige Beispiele angegeben.

Eine Folge der Diffusion ist die Osmose. Hierbei wird durch eine semipermeable (halbdurchlässige) Membran die Ausbreitung einer Teilchenart in einer Richtung verhindert. So entsteht ein Druckgefälle (osmotischer Druck) an der Trennwand und dies bewirkt dann die Diffusion des Lösungsmittels statt der eigentlich diffundieren wollenden Moleküle. Diese Vorgänge sind im belebten Bereich der Natur von großer Bedeutung.

3.4 Elektrizität

Im Vergleich zu den bisher behandelten und in den entsprechenden Skalen dargestellten Größen sind die in diesem Abschnitt betrachteten von etwas anderer Natur. Während Länge, Zeit, Masse und die darauf basierenden Größen durch Verallgemeinerungen aus der makroskopischen Erfahrungswelt entstanden sind, wird dies beim Phänomen der Elektrizität etwas komplizierter. Diese ist für den Menschen nicht wahrnehmbar – er kann nur aufgrund bestimmter Effekte auf das Vorhandensein von Elektrizität schließen, indem er die Effekte als Auswirkungen der Elektrizität interpretiert.

Schon Thales (um 580 v.Chr.) war bekannt, daß Bernstein nach dem Reiben, z.B. mit einem Tuch, leichte kleine Körper anzieht. Ein weiterer wesentlicher Schritt zur Untersuchung dieses Phänomens ist mit dem Namen des englischen Arztes William Gilbert (1540–1603) verbunden (größere Aufmerksamkeit erregten allerdings seine Untersuchungen zum Magnetismus, vgl. Abschn. 3.5). Er erkannte die Identität dieser auch bei vielen anderen Stoffen beobachteten Kräfte, und auf ihn geht die Bezeichnung als elektrische Erscheinung zurück. In den dreißiger Jahren des 18. Jahrhunderts begann dann eine relativ systematische Erforschung der Phänomene der Reibungselektrizität, die zu den grundlegenden Erkenntnissen führten, daß

- ein elektrischer Körper alle nichtelektrischen anzieht und ihnen Elektrizität mitteilt, wonach er sie wieder abstößt;
- es zwei Arten von Elektrizität gibt.

Lichtenberg (1744–1799) unterschied dann 1777 zwischen positiver und negativer Ladung. Er legte das Vorzeichen so fest, daß die auf einem Glasstab beim Reiben auftretende elektrische Ladung als positiv, die beim Reiben eines Hartgummistabes als negativ anzusehen ist. Diese willkürliche Festlegung hat dann in der Folge dazu geführt, daß das Elektron ein negatives Ladungsvorzeichen erhält und beim Stromfluß in Metallen die Ladungen vom negativen zum positiven Pol wandern.

Interessant ist ein Blick auf die sprachliche Herkunft des Adjektivs **elektrisch**, das in den vielfältigsten Zusammenstellungen unser heutiges Leben bestimmt. Es ist seit dem 18. Jh. bezeugt und aus dem niederlateinischen *electricus* hervorgegangen, was soviel wie „durch elektrische Ladung magnetisch" bedeutet. Dies wiederum ist zu lateinisch *electrum* „Bernstein" gebildet, welches von dem griechischen Wort für Bernstein stammt. Im 18. Jh. sind dann entsprechende Ableitungen gebildet worden, die jeweils auf die französischen Bezeichnungen zurückgehen: **Elektrizität** (électricité), **elektrisieren** (électriser). Der Begriff der **Elektrode** (als eines der Enden eines Stromkreises, zwischen denen Strom durch eine anderes Medium geleitet wird) ist aus dem englischen *anode* (durch M. Faradays (1791–1867) Veröffentlichungen bekannt geworden) entlehnt, dem das griechische *hodos* („Weg") zugrundeliegt. Das **Elektron** ist dann im 19. Jh. vom englischen (durch G.J.S.Stoney (1826–1911) geprägten) *electron* entlehnt, von dem im 20. Jh. das heute eine kulturelle Revolution bezeichnende Adjektiv **elektronisch** abgeleitet wurde. Die Betrachtung unserer Sprache und der Herkunft der in ihr verwendeten Wörter spiegelt so auch ein Stück Wissenschaftsgeschichte wider.

Auffallend ist, daß zu Beginn der Betrachtung der elektrischen Phänomene dies gemeinsam mit den magnetischen geschah, indem z.T. die Erklärungsmuster für magnetische Erscheinungen auf die elektrischen übertragen wurden. Eine verstärkte Hinwendung zu den elektrischen Erscheinungen führte zur Ausprägung von (auf den Konzepten der klassischen Mechanik beruhenden) theoretischen Erklärungen, die sich dann aber nur mit Schwierigkeiten auf die magnetischen Erscheinungen übertragen ließen. Eine der Ursachen liegt in der Tatsache, daß die unterschiedlichen elektrischen Ladungen separierbar sind, während die analog gebildeten magnetischen Ladungen immer nur paarweise auftreten. Ein Durchbruch wurde dann mit der Entdeckung der magnetischen Wirkung elektrischer Ströme erzielt. Dies führte letztlich zur beide Phänomene vereinenden elektromagnetischen Theorie, die ihren Höhepunkt in den Maxwellschen Gleichungen hatte.

Aus dieser geschichtlichen Entwicklung heraus haben sich für die Beschreibung von Elektrizität und Magnetismus spezielle Größen erhalten. Die Schwierigkeiten bei der einheitlichen Beschreibung beider Phänomene spiegeln sich auch in den vielfältigen Versuchen wider, Einheitensysteme dafür zu konstruieren. Neben dem SI finden heute noch das elektrostatische cgs-System, das elektromagnetische cgs-System und das Gaußsche System Anwendung, die ohne eine zusätzliche elektrische Grundeinheit auskommen wollen. Für den induktiven, an den Prinzipien der Mechanik orientierten, Aufbau einer theoretischen Beschreibung der Phänomene ist die Einführung der elektrischen Ladung (und ihres Pendants, der magnetischen Ladung) grundlegend. Entsprechend wird bei diesen Darstellungen auch die Einheit der elektrischen Ladung (das Coulomb) als Basiseinheit betrachtet. Der von der Maxwellschen Theorie ausgehende deduktive Aufbau einer theoretischen Beschreibung schreibt dem auf der Bewegung der Ladungsträger basierenden elektrischen Strom eine wichtige Rolle zu. Aus diesem Grund und wegen der besseren meßtechnischen Darstellung ist dessen Einheit (das Ampere) im SI die Basiseinheit für die elektromagnetischen Vorgänge. Dem schließt sich unsere Darstellung an, wobei wir aber die Behandlung der Phänomene Elektrizität und Magnetismus in getrennten Kapiteln beibehalten haben, um auch die Besonderheiten darstellen zu können.

3.4.1 Elektrische Stromstärke in Ampere ([Stromstärke] = A)

Der elektrische Strom ist aus dem Leben der Menschen heute nicht mehr wegzudenken. Sein Einsatz bestimmt unser Leben maßgeblich – dies wird besonders dann deutlich, wenn er einmal nicht zur Verfügung steht. Dann sind viele alltägliche Funktionen unseres Lebens gestört, da schon der Tagesbeginn vom elektronischen Wecker gesteuert wird und die Kette der auf der Anwendung des elektrischen Stroms basierenden Hilfsmittel nicht abreißt. Dabei treten aber ganz unterschiedliche Stromstärken auf, von einigen Milliampere im elektronischen Radiowecker bis zu einigen Ampere beim Toaster.

Aus dem von Biot (1774–1862) und Savart (1791–1841) im Jahre 1820 formulierten Gesetzen über den Zusammenhang zwischen einem stromdurchflossenen Leiter und seinem Magnetfeld und der Kraft, die in einem Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkt, konnte Ampere eine Beziehung für die auf den Stromfluß durch zwei Leiter wirkende Kraft zwischen den Leiterstücken ableiten. Obwohl damit eine prinzipielle Rückführbarkeit der elektrischen Einheiten auf die mechanischen Grundeinheiten der Länge, der Zeit und der Masse möglich ist, wurde aus Gründen der Praktikabilität und der Meßtechnik im Gefolge der 9. und 10. Generalkonferenz das Ampere als Basiseinheit festgelegt und ist somit Bestandteil des SI.

Die Basiseinheit 1 Ampere (1 A) ist die Stärke des zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die den Abstand von 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im Vakuum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.

Die Benennung der Maßeinheit erfolgte nach dem französischen Physiker André Marie Ampère (1775–1836). Die in der Definition erwähnte Größe Permeabilität macht die Verbindung zum Magnetismus deutlich (vgl. dazu 3.5.4).

Die Darstellung der Einheit Ampere hat insofern schon immer Schwierigkeiten bereitet, als die Messung des Stroms nur durch meßtechnisches Erfassen seiner Auswirkungen erfolgen kann. So wurde das internationale Ampere 1893 mittels der durch den Stromfluß durch eine Silbernitratlösung erzeugten abgeschiedenen Silbermenge definiert. Auch in der praktischen Bestimmung des Stromverbrauchs wurde vor 100 Jahren auf die elektrolytische Wirkung des elektrischen Stromes zurückgegriffen. In zwei mit Zinksulfatlösung gefüllte Glasgefäße waren zwei Zinkelektroden getaucht. Immer wenn Gleichstrom durch den Zähler floß (zur damaligen Zeit wurde das elektrische Netz noch mit Gleichstrom betrieben, übrigens in einigen Städten Deutschlands auch noch nach dem Zweiten Weltkrieg), schied sich an der Kathode etwas Zink ab. Eine genaue Wägung der beiden Elektroden gab Aufschluß über den Stromverbrauch. Gegenüber der auch verbreiteten Methode, die Einschaltdauer der Glühlampen (zu Beginn der Elektrifizierung die haupsächlichste Anwendung) zu messen, war dies schon eine wesentlich genauere Methode.

Die heutigen technischen Lösungen realisieren die verschiedensten Möglichkeiten der Strommessung. Bei der Mehrzahl der Geräte wird die elektromagnetische Wirkung des Stromes ausgenutzt (Drehspulprinzip). Das durch den Stromfluß erzeugte und ihm proportionale Magnetfeld wird durch ein anderes bekanntes Magnetfeld derart beeinflußt, daß eine mechanische Auslenkung des stromdurchflossenen Leiters erfolgt. Diese wird dann mit unterschiedlichen Methoden auf eine Skale projiziert (Galvanometer, Zeigerinstrumente). Hierbei sind Empfindlichkeiten bis zu 10^{15} m/A erreichbar.

Von besonderem Interesse ist die Stromwaage, da sie für die Darstellung der Basiseinheit 1 A benötigt wird. In der Regel werden zwei vom Meßstrom durchflossene Spulen verwendet, von denen eine beweglich an einem Waagebalken aufgehängt ist. Durch entsprechende Gewichte wird die Kraftwirkung des Stromflusses kompensiert. Bei der Darstellung der Basiseinheit geht man so vor, daß man den Stromfluß so lange variiert, bis er die Wirkung der mechanischen Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N kompensiert.

Für Ströme ab ca. 0,1 A wird auch die thermische Wirkung des Stromes ausgenutzt (sogen. Hitzdrahtinstrumente). Diese Instrumente eigenen sich sowohl für Gleich- wie für Wechselstrommessungen, wobei sie bei letzteren die Effektivwerte messen.

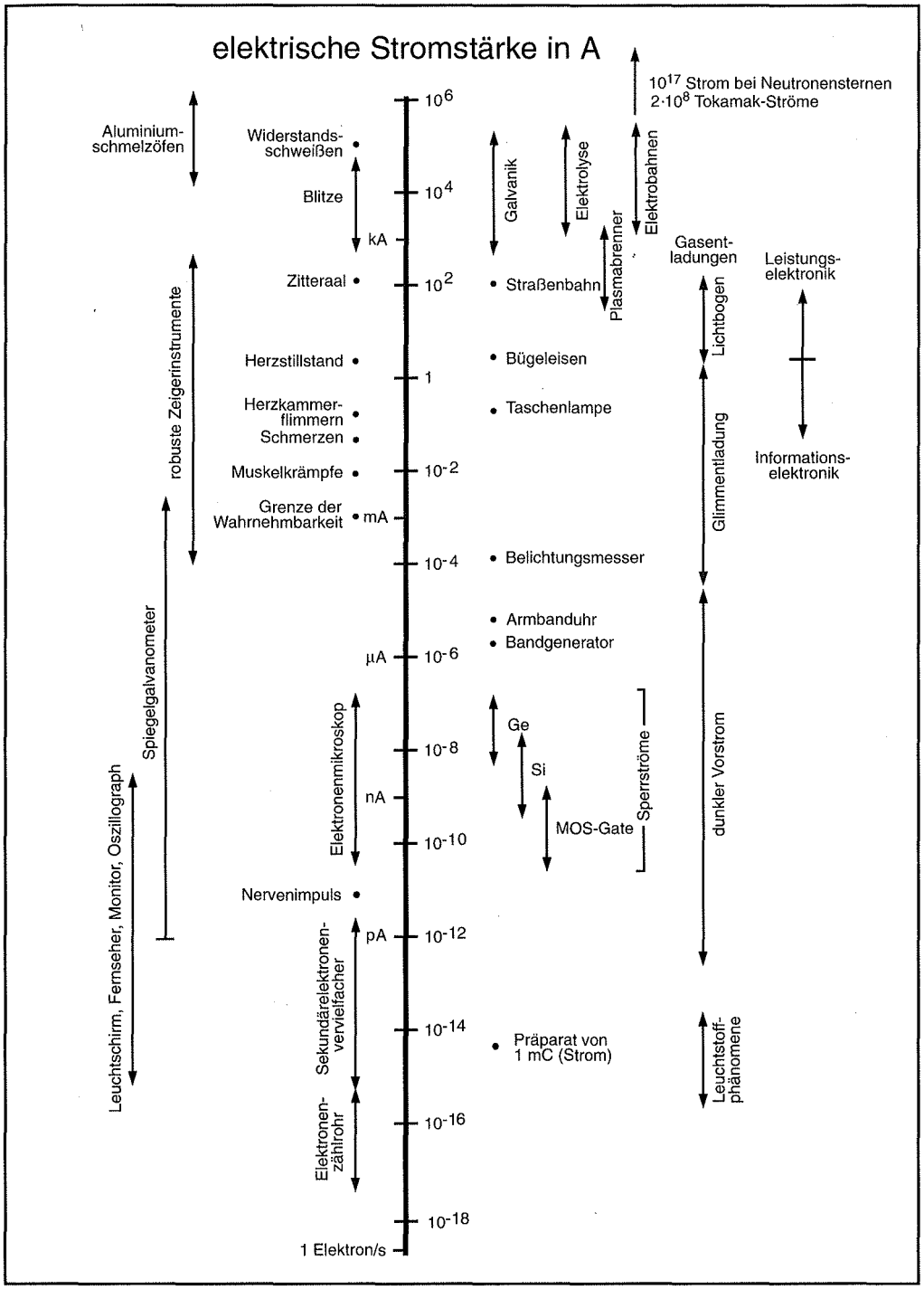
Die letzte Bemerkung weist auf einen Umstand hin, dem bei den elektrischen Erscheinungen Rechnung zu tragen ist. Bei den bisherigen Ausführungen wurde i.allg. stillschweigend unterstellt, daß der betrachtete Strom zeitlich keinen Veränderungen unterliegt. Diese Art nennen wir Gleichstrom (analog dazu gibt es die Gleichspannung). In der Mehrzahl der heute technisch interessanten Fälle haben wir aber einen Stromfluß vorliegen, der einer (i. allg. periodischen) Änderung unterliegt. Dieser heißt Wechselstrom (analog dazu die Wechselspannung). Der bekannteste ist der in jedem Haushalt verwendete Wechselstrom mit einem (angestrebten) sinusförmigen Verlauf seiner zeitlichen Änderung der (angestrebten) Frequenz von 50 Hz.

Beim Wechselstrom ist es nun wichtig zu sagen, welchen Stromwert man mißt. Ist es der Wert zwischen Nulldurchgang und Maximum der zeitlichen Änderung oder interessiert mich nur der Teil des Stromes, den ich effektiv nutzen kann (in Form von Wirkungen). Dies ist dann der Effektivwert des Wechselstromes und im Fall des sinusförmigen Verlaufs gilt $I_{\text{eff}} = I_0 / \sqrt{2}$, wobei I_0 der Maximalwert (Amplitude) des Stromes ist.

Prinzipiell ließe sich die Messung der Stromstärke auch unmittelbar an eine atomare Einheit anbinden. Bei atomarer Betrachtung basiert der Stromfluß auf der Bewegung elektrischer Ladungen. Die kleinste mögliche Ladung ist die Elementarladung, die ein Elektron trägt. Diese beträgt $e = 1{,}602177 \cdot 10^{-19}$ As. Daraus ergibt sich, daß für die Erzeugung des Stromes von 1 A Stärke $6{,}241457 \cdot 10^{18}$ Elektronen pro Sekunde fließen müssen. Schon bei Strömen oberhalb von 1 μA würde die Zählrate so groß, daß sie meßtechnisch nicht mehr zu bewältigen ist.

Eine weitere hochempfindliche Meßmethode beruht auf dem Josephson-Effekt. Mit sogenannten SQID-Anordnungen können noch Ströme bis zu 10^{-11} A nachgewiesen werden.

Die vielfältigen Wirkungen des elektrischen Stromes seien hier nur kurz aufgelistet, eine ausführliche Auseinandersetzung mit ihnen und ihren Größenordnungen


elektrische Stromstärke in A
10^{17} Strom bei Neutronensternen
$2 \cdot 10^8$ Tokamak-Ströme
Aluminium-schmelzöfen
Widerstands-schweißen
Blitze
kA
Zitteraal
Herzstillstand
Herzkammer-flimmern
Schmerzen
Muskelkrämpfe
Grenze der Wahrnehmbarkeit
mA
µA
nA
pA
1 Elektron/s
10^6
10^4
10^2
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
10^{-18}
Galvanik
Elektrolyse
Elektrobahnen
Plasmabrenner
Straßenbahn
Bügeleisen
Taschenlampe
Belichtungsmesser
Armbanduhr
Bandgenerator
Ge
Si
MOS-Gate
Sperrströme
Präparat von 1 mC (Strom)
Gasent-ladungen
Lichtbogen
Glimmentladung
dunkler Vorstrom
Leuchtstoff-phänomene
Leistungs-elektronik
Informations-elektronik
robuste Zeigerinstrumente
Spiegelgalvanometer
Leuchtschirm, Fernseher, Monitor, Oszillograph
Elektronenmikroskop
Nervenimpuls
Sekundärelektronen-vervielfacher
Elektronen-zählrohr

würde den Rahmen sprengen. Der elektrische Strom

- folgt einem elektrischen Feld;
- erzeugt ein Magnetfeld;
- ruft Erwärmung hervor;
- bewirkt chemische Reaktionen;
- übt auf andere Ströme oder auf Magnete eine Kraft aus;
- wird von magnetischen oder elektrischen Feldern abgelenkt;
- induziert bei seiner Änderung neue Ströme;
- hat bei schnellen Änderungen elektromagnetische Wellen zur Folge.

Alle diese Effekte haben auch technische Anwendungen gefunden, z.B. in elektrischen und elektronischen Bauelementen, bei Motoren und Dynamomaschinen, bei der elektrischen Wärmeerzeugung, beim Schweißen, in der Elektrochemie usw.

Auf eine wichtige Auswirkung elektrischer Ströme muß hier noch hingewiesen werden, nämlich auf die möglichen Wirkungen auf die menschliche Gesundheit. Je nach Stärke des einwirkenden Stromes und der einwirkenden Zeit ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen. So ergibt sich für eine Einwirkung von mehr als 300 ms eine Loslaßgrenze (Selbstbefreiung möglich) von 10 mA. Sehr deutlich wird der Einfluß der Wirkungsdauer bei der Sicherheitsgrenze. Sie fällt von ca. 700 mA bei Zeiten kleiner als 100 ms auf 50 mA bei Einwirkungszeiten größer als 100 ms. Der LD_{50}-Wert (50% der Fälle gehen tödlich aus) liegt bei Einwirkungszeiten kleiner als 500 ms knapp unter 5 A, ab einer Einwirkdauer von 1 s sinkt er auf ca. 400 mA. Die Skale enthält Orientierungswerte für die Auswirkungen auf den menschlichen Körper.

Die Skale zeigt über eine Spanne von mehr als 25 Zehnerpotenzen der elektrischen Stromstärke entsprechende durch diesen Strom hervorgerufene Erscheinungen bzw. entsprechende Anwendungen, in denen diese Ströme fließen. Die astronomischen Vorkommen von Strömen der Stärke 10^{17} A konnten dabei nur noch angedeutet werden. Der kleinste Wert der Skale, der durch den Fluß von einem Elektron innerhalb einer Sekunde erzeugt wird, entspricht einem Strom von $1{,}602177 \cdot 10^{-19}$ A. Noch geringere Werte wären durch eine noch geringere Geschwindigkeit der Elektronen zu erreichen, wobei dann die Frage zu stellen ist, ob dann noch von einem elektrischen Strom gesprochen werden kann, da in diesem Fall der diskrete Charakter der Erscheinung stärker gegenüber dem kontinuierlichen eines Stromes in den Vordergrund rückt.

Außerhalb des SI existieren keine anderen Einheiten für den elektrischen Strom. Mittels der Einheit Volt für die elektrische Spannung (vgl. 3.4.3) kann leicht der Übergang zu den Einheiten für Leistung ($W = V \cdot A$), für den Widerstand (vgl. 3.4.6) und für die elektrische Ladung (vgl. 3.4.8) erfolgen. Die Kopplung zu den magnetischen Erscheinungen ist über die Einheit der magnetischen Feldstärke (A/m – vgl. 3.5.1) erreicht.

3.4.2 Elektrische Stromdichte in Ampere pro Quadratmeter ([elektrische Stromdichte] = A/m^2)

In den meisten Anwendungsfällen fließt der elektrische Strom in Leitern mit konstantem Querschnitt. Diesem Stromfluß steht der ohmsche Widerstand des Leiters entgegen, wodurch Leitungsverluste auftreten, die z. B. in Wärme umgesetzt werden können (Verlust meint hier natürlich nur Verlust an nutzbarer Energie des elektrischen Stromes). Aber auch das durch den Stromfluß erzeugte magnetische Feld kann gewollte Anwendungen negativ beeinflussen. Aus diesem Grunde ist bei vielen Anwendungen die zulässige elektrische Stromdichte interessant. Da der Stromfluß im wesentlichen durch die geometrische Größe Querschnitt des Leiters begrenzt wird, ist diese Stromdichte eine Flächendichte. Entsprechend ergibt sich auch deren Maßeinheit.

Die aus den Basiseinheiten des SI abgeleitete Maßeinheit für die Stromdichte ist das A/m^2.

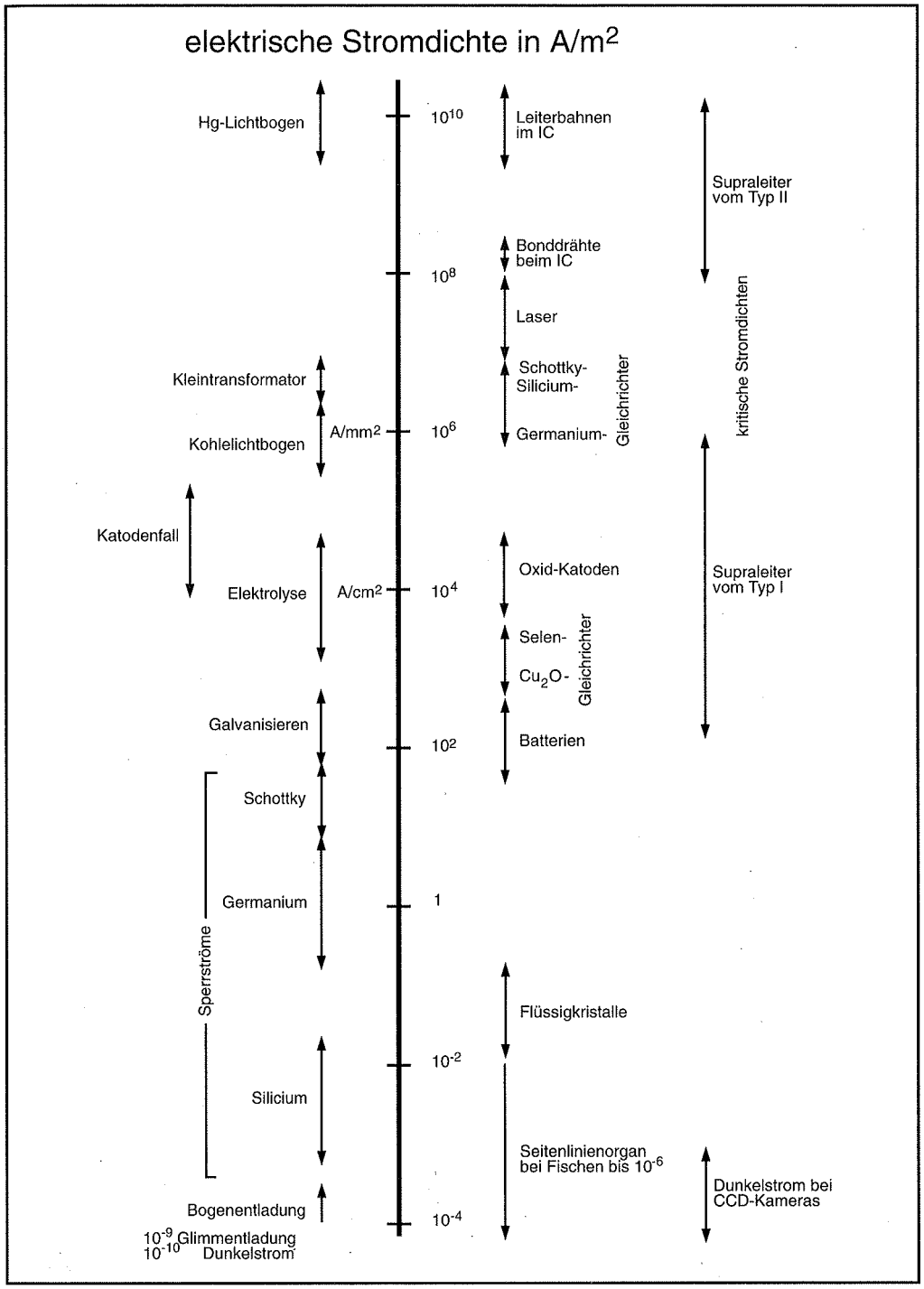
Die für Leiteranordnungen existierenden maximal zulässigen Stromdichten resultieren aus der begrenzten Wärmeabfuhr. Ein typisches Beispiel sind die zulässigen 3 A/mm^2 bei Kleintransformatoren. Ähnlich belastbar sind auch die modernen Halbleiterbauelemente (integrierte Schaltkreise, engl. integrated circuits – IC) in Durchlaßrichtung.

Viele Anwendungen lassen jedoch nur deutlich geringere Werte zu. So müssen die Sperrströme in Halbleiterbauelementen (häufig als Qualitätsmaß verwendet) möglichst klein sein, um die durch den Sperrstrom wesentlich beeinflußten Verluste der Bauelemente so gering wie möglich zu halten. Besonders vorteilhaft sind deshalb Si-Bauelemente. Für batteriebetriebene Schaltungen in Taschenrechnern und Armbanduhren sind sogar MOS-Bauelemente unabdinglich.

Auch bei der Supraleitung finden wir den Effekt, daß sie nur so lange aufrecht zu erhalten ist, wie die Stromdichte unterhalb eines Schwellenwertes bleibt und damit auch das durch den Strom erzeugte Magnetfeld einen kritischen Wert nicht übersteigt. Das hängt damit zusammen, daß ein äußeres Magnetfeld oberhalb eines kritischen Wertes in den Supraleiter eindringt und damit die Supraleitung zerstört. Unterhalb dieses Wertes wird das Magnetfeld aus dem Supraleiter herausgedrängt (Meißner-Ochsenfeld-Effekt). Bei Supraleitern vom Typ I (weich) bricht die Supraleitung bereits bei relativ geringen kritischen magnetischen Feldern B_c (< 0,2 T) zusammen. Sie können deswegen auch nicht in Spulen für supraleitende Magneten eingesetzt werden. Beim Typ II (hart) wird der Effekt beobachtet, daß ein Magnetfeld B_{c1} der Größenordnung wie beim Typ I zwar eindringt, aber dennoch die Supraleitung erhalten bleibt (Shubnikov-Phase). Erst wenn das eindringende Magnetfeld einen kritischen Wert B_{c2} erreicht, bricht die Supraleitung zusammen. Dieser Wert kann bis zu hundertfach größer sein als der Wert für B_c bei Supraleitern vom Typ I.

Auch Tiere sprechen auf Stromdichten an, bemerkenswert ist die hohe Empfindlichkeit des elektrischen Seitenlinienorgans (ein Sinnesorgan speziell zur Wahrnehmung von Strömungen) einiger Fischarten.

Die Skale zeigt die enorme Spannbreite, in der sich derzeit die technisch realisierten Stromdichten bewegen. Der Vergleich der in der gleichen Größenordnung liegenden Stromdichten beim Hg-Lichtbogen und bei Leiterbahnen im IC macht die beiden möglichen Wege zum Erzielen so hoher Stromdichten deutlich. Beim Lichtbogen fließen relativ hohe Ströme (5 bis 10 A), während im IC sehr geringe Ströme auf mikroskopischen Leiterbahnen fließen.


elektrische Stromdichte in A/m2
Hg-Lichtbogen
Kleintransformator
Kohlelichtbogen
Katodenfall
Elektrolyse
Galvanisieren
Schottky
Germanium
Silicium
Sperrströme
Bogenentladung
Glimmentladung
Dunkelstrom
A/mm2
A/cm2
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
1
10^-2
10^-4
Leiterbahnen im IC
Bonddrähte beim IC
Laser
Schottky-Silicium-Germanium-Gleichrichter
Oxid-Katoden
Selen-
Cu2O-Gleichrichter
Batterien
Flüssigkristalle
Seitenlinienorgan bei Fischen bis 10^-6
Supraleiter vom Typ II
kritische Stromdichten
Supraleiter vom Typ I
Dunkelstrom bei CCD-Kameras

3.4.3 Elektrische Spannung in Volt ([elektrische Spannung] = V)

Das Wort Spannung hat in unserer Umgangssprache die Bedeutung, daß ein Zustand aufrechterhalten wird, der verschiedene Möglichkeiten in sich birgt. Wird eine realisiert, ist die Spannung weg. Zum Beispiel ist beim Start eines 100m-Laufes die Spannung groß, welcher der Läufer gewinnen wird; es gibt so viele Möglichkeiten, wie Läufer am Start sind. Nach dem Zieleinlauf ist eine dieser Möglichkeiten realisiert, die Spannung ist weg.

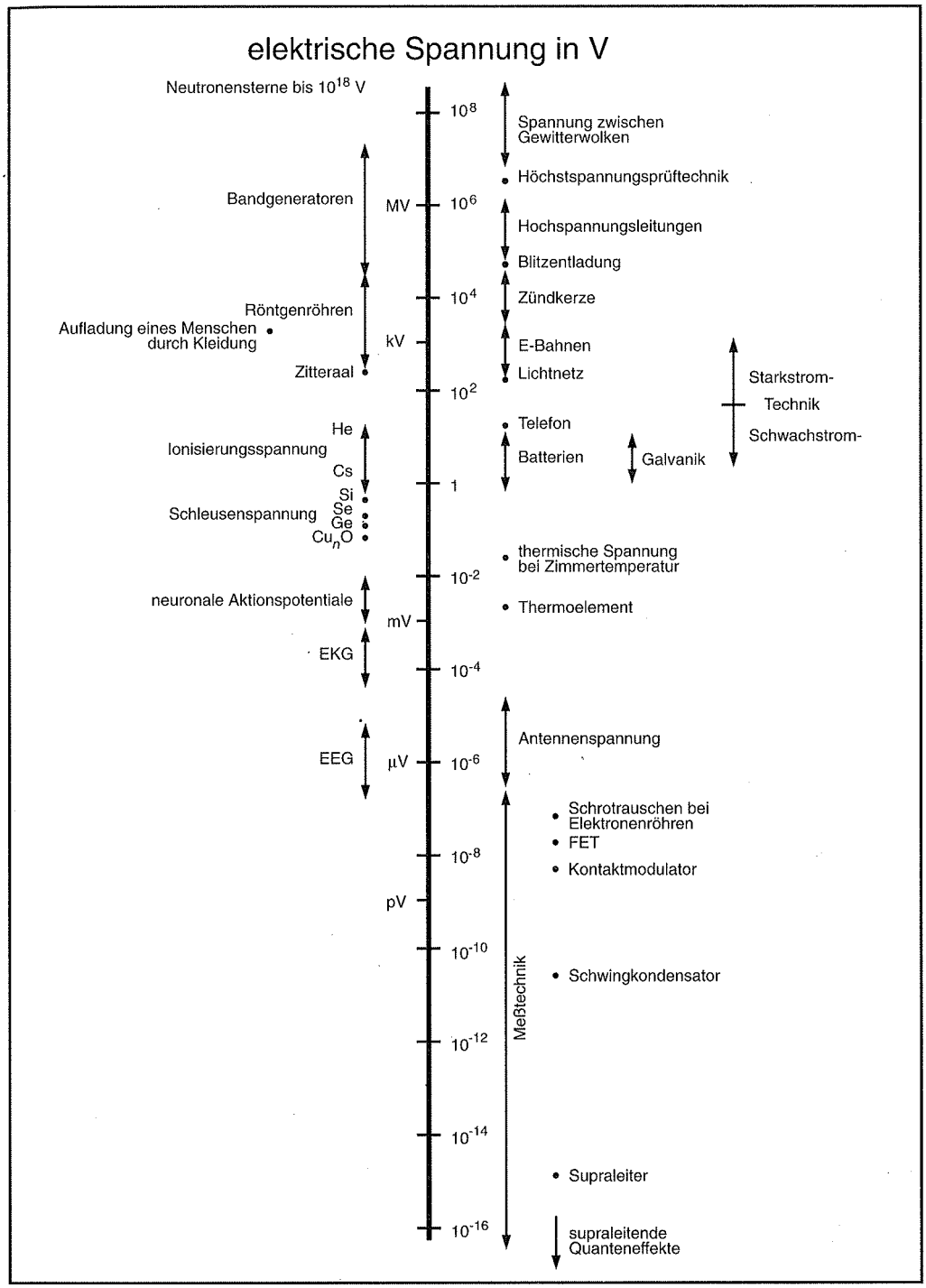
Ein ähnliches Bild können wir uns in der Elektrizitätslehre machen. Um eine elektrische Ladung in einem elektrischen Feld von einem Ort zum anderen zu bewegen, müssen wir eine bestimmte Arbeit verrichten. Es stellt sich aber heraus, daß die Größe dieser Arbeit nur von dem Anfangs- und dem Endpunkt dieser Strecke abhängt. Die Wahl des Weges ist beliebig. Man könnte also auch sagen, zwischen diesen beiden Punkten liegt eine gewisse Spannung.

Tatsächlich ist die elektrische Spannung als Potentialdifferenz zwischen zwei unterschiedlichen Punkten definiert. Verschiebt man eine elektrische Ladung von einem Punkt zu einem anderen, so ist die dabei aufzuwendende Arbeit proportional dem Produkt aus Ladung und Potentialdifferenz zwischen den beiden Punkten (was gleich der Spannung ist). Da bewegte elektrische Ladungen pro Zeiteinheit als elektrischer Strom (vgl. 3.4.1) aufgefaßt werden können, erhält man eine Darstellungsmöglichkeit der Spannung, indem man die Basiseinheit Ampere mit der Einheit für die Leistung (Arbeit pro Zeiteinheit) koppelt.

Ein Volt (1 V) ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, in dem bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W umgesetzt wird.

Die Einheit ist nach dem italienischen Physiker Graf Alessandro Volta (1745 bis 1827) benannt, der den Begriff der elektrischen Spannung prägte und ihn neben die seinerzeit schon bekannten Begriffe des elektrischen Stromes und der elektrischen Ladung setzte.

Die Darstellung des Spannungsnormals basierte bis jetzt auf dem Prinzip, das Volta bei der Entwicklung seiner Säulen zur Spannungserzeugung angewendet hatte. Platten von zwei unterschiedlichen Metallen werden im Wechsel aufeinandergelegt, wobei sie durch einen mit einem Elektrolyten getränkten Filzstreifen getrennt sind. Entsprechend der Auswahl der Metalle innerhalb der elektrochemischen Spannungsreihe und der Anzahl der Metallplatten kann man dann an den Enden der so entstehenden Säule eine Spannung abgreifen. Die technische Weiterentwicklung dieses Prinzips und das bessere Verständnis der diesem Phänomen zugrundeliegenden Effekte führte zur Entwicklung des Weston-Normal-Elements. Seit 1908 wird das Internationale Weston-Element (Cadmium-Normalelement) verwendet, für dessen elektromotorische Kraft (EMK) bei 20 °C in Washington 1910 der Nennwert 1,0183 V festgelegt wurde. Die EMK ist als die Spannung definiert, die an einer Spannungsquelle anliegt, wenn kein


elektrische Spannung in V
Neutronensterne bis 10^{18} V
10^{8}
Spannung zwischen Gewitterwolken
Höchstspannungsprüftechnik
Bandgeneratoren
MV
10^{6}
Hochspannungsleitungen
Blitzentladung
10^{4}
Zündkerze
Röntgenröhren
Aufladung eines Menschen durch Kleidung
kV
E-Bahnen
Zitteraal
Lichtnetz
10^{2}
Starkstrom-Technik
Schwachstrom-
Telefon
He
Ionisierungsspannung
Batterien
Galvanik
Cs
Si
Se
Schleusenspannung
Ge
Cu_nO
1
thermische Spannung bei Zimmertemperatur
10^{-2}
neuronale Aktionspotentiale
Thermoelement
mV
EKG
10^{-4}
Antennenspannung
EEG
µV
10^{-6}
Schrotrauschen bei Elektronenröhren
FET
10^{-8}
Kontaktmodulator
pV
10^{-10}
Schwingkondensator
Meßtechnik
10^{-12}
10^{-14}
Supraleiter
10^{-16}
supraleitende Quanteneffekte

Strom fließt. Damit kann die EMK nur zuverlässig durch Verfahren bestimmt werden, bei denen kein Strom fließt, wie z.B. Kompensationsverfahren. Bei der Messung der Spannung mit einem Voltmeter fließt immer ein, wenn auch noch so kleiner Strom. Die jährliche Instabilität dieser Elemente liegt in der Größenordnung von 10^{-7}.

Durch den Josephson-Effekt ist es jetzt möglich, die Spannungsmessung auf die Messung einer Frequenz zurückzuführen. Bestrahlt man einen Josephson-Kontakt mit Mikrowellen der Frequenz f, so erscheinen in der Strom-Spannungs-Kennlinie bei den Spannungen $U_n = nhf/2e$ ($n = 1, 2, ...$; h Plancksches Wirkungsquantum; e Elementarladung) Sprünge, deren Größe mit der Intensität der Strahlung zunimmt. Für 10 GHz und 50 Stufen beträgt die Spannung annähernd 1 mV. Diese Methode hat eine relative Meßunsicherheit von 10^{-8}. Aufgrund dieser extrem geringen Unsicherheit bei der Darstellung des Volt könnte damit auch dieses zur Basiseinheit anstelle des Ampere gemacht werden. Der Josephson-Effekt kann natürlich auch zur Spannungsmessung eingesetzt werden. Hier beträgt die erreichte Empfindlichkeit 10^{-15} V (der theoretische Wert liegt bei 10^{-18} V).

Um das Volt mit einer Unsicherheit von nur 0,3 Millionstel des Meßwertes darstellen zu können, wurde 1990 an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig eine Spannungswaage gebaut. An die zu messende Spannung werden zwei Elektroden gelegt. Die zwischen ihnen entstehende elektrostatische Anziehungskraft wird mit einer Balkenwaage gemessen. Über diese Kraft kann man das Volt in SI-Einheiten darstellen, da die Spannung im elektrostatischen Einheitensystem die Dimension $cm^{1/2}g^{1/2}s^{-1}$ hat.

Die Messung der Spannung stellt insofern ein Problem dar, als die Potentialdifferenz das Bestreben hat, sich nach Möglichkeit abzubauen. Das bedeutet, daß, wann immer durch Anschluß eines Meßgerätes möglich, mit einem Stromfluß durch das Gerät gerechnet werden muß, der damit das gemessene Ergebnis dahingehend verfälscht, daß eine zu kleine Potentialdifferenz gemessen wird. Man versucht diesen Effekt so gering wie möglich zu halten, indem man sehr hochohmige Strommeßgeräte einsetzt, die nur einen sehr kleinen Stromfluß ermöglichen, der für praktische Zwecke vernachlässigbar ist. Immerhin sind damit Empfindlichkeiten von 10^{11} m/V erreichbar. Es gibt auch elektrostatische Geräte, die, wie die oben erwähnte Spannungswaage, die Kraftwirkung elektrischer Ladungen ausnutzen. Außerdem besteht noch die Möglichkeit, durch das Anlegen einer variablen geeichten Gegenspannung den Stromfluß durch ein Meßgerät zu kompensieren. Mittels der geeichten Spannungsquelle kann man dann die unbekannte Spannung bestimmen.

Für die Anwendungen sind zwei Spannungsbereiche besonders wichtig, der Hoch- und der Niederspannungsbereich. Getrennt werden diese beiden Bereiche durch die Gebrauchsspannung von 220 V. Interessanter ist hingegen die Einteilung in Stark- und Schwachstrombereich, die auch Aussagen über die dazugehörigen Spannungen macht. Ursache ist die Tatsache, daß für die Wirkung auf den Menschen die bei den entsprechenden Spannungen fließenden Ströme maßgeblich sind. Das Starkstromnetz ist wiederum durch die 220 V charakterisiert, wobei Ströme in der Größenordnung von einigen Ampere fließen. Beim Schwachstrombereich (Batteriebetrieb) liegen die Spannungen etwa zwischen 1 und 12 V. Die eigentlich für den Menschen lebensgefährlich werdenden Spannungen liegen oberhalb 50 V (42 V ist der für den Arbeitsschutz maß-

gebliche Grenzwert). Die für den Menschen ungefährlichen Versuche mit Elektrisiermaschinen, die im 18. Jahrhundert in jedem Kuriositätenkabinett üblich waren, zeigen noch einmal die Rolle des Stromes bei der Wirkung auf den menschlichen Körper. Diese Elektrisiermaschinen erzeugten Spannungen von mehreren Kilovolt, durch ihren hohen Innenwiderstand und die kleine Kapazität floß aber nur ein sehr geringer Strom.

Der Starkstrombetrieb ist meist mit größeren Leistungen gekoppelt. Daher muß die Spannung möglichst groß gewählt werden, um so die Verluste auf den Zuleitungen hinreichend klein zu halten. Das übliche Netz mit 220 V stellt für die meisten Anwendungen, vor allem im Haushalt, einen günstigen Kompromiß dar. Für größere Leistungen sind Hochspannungen bis zu Megavolt erforderlich, wie sie z.B. bei den elektrischen Bahnen und Überlandleitungen auftreten.

Die größten irdischen Spannungen treten zwischen Gewitterwolken größeren Abstandes auf. Der Abbau dieser Potentialdifferenz erfolgt durch die Blitze. Etwa 80% der bei Gewittern auftretenden Blitze werden zwischen Gewitterwolken ausgetauscht. Die größten vom Menschen erzeugten Spannungen liefern Bandgeneratoren der Kern- und Elementarteilchenphysik. Relativ große Spannungen mit 10 bis 25 kV treten in den Hochspannungsteilen von Fernsehempfängern auf. Selbst im Wasser mit seiner relativ hohen elektrischen Leitfähigkeit sind die elektrischen Fische in der Lage, die beachtliche Spannung von mehr als 100 V zu erzeugen.

Kleinste Spannungen haben in der Meßtechnik und bei einigen elektronischen Geräten ihre Anwendung. Bei den Rundfunk- und Fernsehempfängern muß die die Information transportierende Antennenspannung von nV bis µV sogar meist aus dem thermodynamischen Rauschen herausgefiltert werden. In dieser Größenordnung liegen auch die Spannungen beim EKG oder die von der Kopfhaut abgeleiteten Spannungen der Hinströme (EEG).

Für die Spannung gibt es keine SI-fremden Einheiten.

3.4.4 Elektrische Feldstärke in Volt pro Meter ([elektrische Feldstärke] = V/m)

Wir betrachten zwei elektrische Ladungen. Zwischen ihnen ist eine Kraftwirkung festzustellen. Legt man eine der beiden Ladungen als Probeladung q_0 fest, deren Größe man kennt, und mißt die Kraftwirkung F auf diese Probeladung, so zeigt sich, daß der Quotient F/q_0 unabhängig von der Größe der Probeladung konstant bleibt. Man nennt diese Größe elektrisches Feld $E = F/q_0$. Das elektrische Feld charakterisiert somit die elektrischen Wirkungen vorhandener Ladungen im Raum. Da die Kraft eine vektorielle Größe ist (vgl. Abschn. 3.3.3), ist auch die elektrische Feldstärke vektoriell. Wie bisher auch, betrachten wir hier nur den skalaren Teil des elektrischen Feldes.

Die mögliche Maßeinheit für das elektrische Feld ist nach dieser phänomenologischen Herangehensweise der Quotient aus Krafteinheit und Ladungseinheit. Nimmt man die möglichen Vereinfachungen vor, erhält man die übliche Einheit V/m. Eine deduktive Einführung des elektrischen Feldbegriffs aus dem Theoriengebäude zur Beschreibung der elektromagnetischen Erscheinungen (die Maxwellschen Gleichungen)

führt das elektrische Feld auf das elektrische Potential zurück. Und die Potentialdifferenzen werden, wie in 3.4.3 gezeigt, in Volt gemessen. Damit ist auch eine inhaltliche Begründung der Rückführung der Maßeinheit für das elektrische Feld auf die der Spannung und der Länge gegeben.

Ein Volt pro Meter (1 V/m) ist die Stärke eines elektrischen Feldes, in welchem der Spannungsabfall zwischen zwei Punkten mit dem Abstand 1 m in Richtung des Feldes 1 V beträgt.

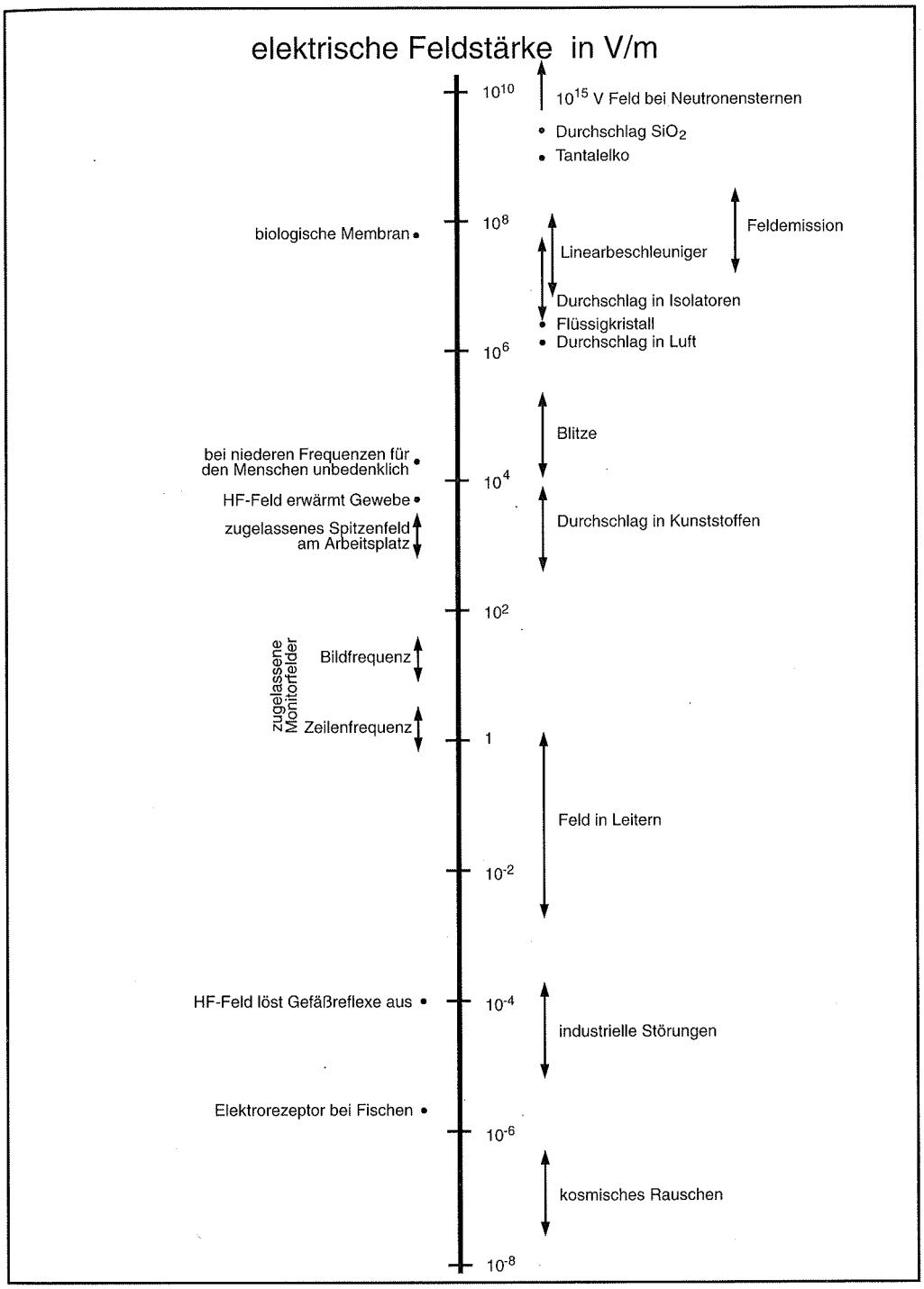
Das elektrische Feld bestimmt somit die Kraftwirkung auf elektrisch geladene Teilchen. Es lenkt auch bewegte elektrische Teilchen von ihrer Bahn ab. Dies macht man sich bei der Kathodenstrahlröhre in Oszillographen zunutze. Weiterhin bewirkt diese Kraftwirkung in leitenden und halbleitenden Materialien einen Stromfluß. Beachtet werden muß bei der Betrachtung der Wirkung von Feldern, daß diese sowohl zeitlich konstant (statische Felder) als auch zeitlich veränderlich (Wechselfelder) sein können. Besonders Wechselfelder haben vielfältige praktische Anwendungen, die auch sehr von der Frequenz des Wechselfeldes abhängen.

Entsprechend der Zusammensetzung der Maßeinheit für die elektrische Feldstärke wird diese gewöhnlich über die elektrische Spannung und die elektrische Länge gemessen. Dazu eignen sich im Prinzip alle üblichen Spannungsmesser, auch die existierenden elektrostatischen Meßsysteme. Für Spezialfälle bei der Bestimmung des Verlaufes des elektrischen Feldes wird der elektrolytische Trog benutzt. In ihm wird das zwischen zwei Modellelektroden entstehende Feld mittels Sonden ausgemessen und dann das Ähnlichkeitsgesetz bei der Umsetzung des Feldverlaufes auf die realen Größenverhältnisse ausgenutzt. Auch bei großer räumlicher Ausdehnung elektrischer Felder werden Sonden eingesetzt. Bekannt ist die nahezu direkte Messung elektromagnetischer Wechselfelder mittels geeichter Antennen, bei denen die Länge durch die Antennengeometrie festliegt.

Die kleinsten nachweisbaren Feldstärken müssen stets aus den verschiedenen Störungen wie dem thermischen Rauschen oder dem Quantenrauschen herausgefiltert werden. Als sehr empfindlich in bezug auf die elektrische Feldstärke erweisen sich auch die Elektrorezeptoren der elektrischen Fische.

Große Feldstärken treten in elektronischen Bauelementen wie Kondensatoren oder Halbleiterbauelementen auf. Auch an biologischen Membranen können beachtliche Feldstärken auftreten. Unvorstellbar hohe Werte erreichen die durch Neutronensterne aufgebauten elektrischen Felder.

In den meisten Leitern existieren Feldstärken deutlich unter 1 V/m. In Isolatoren bewirken hohe Feldstärken einen Durchschlag. Dabei überschreitet die Energie des elektrischen Feldes die zulässige Materialgrenze, bis zu der das Feld keinen Einfluß auf die Ladungsverteilung im Stoff hat. Im allgemeinen erzeugt das elektrische Feld durch Influenz bei den verschiedenen Materialien eine Ladungstrennung, durch deren Ausgleichsbestrebung ein Stromfluß auftreten kann. Für viele Kunststoffe liegt die Grenzfeldstärke deutlich unter der von Luft und anderen Isolatoren. Eine extrem hohe Durchschlagsfestigkeit hat reines Siliciumoxid.


elektrische Feldstärke in V/m
10^{10}
10^{15} V Feld bei Neutronensternen
Durchschlag SiO_2
Tantalelko
10^{8}
biologische Membran
Linearbeschleuniger
Feldemission
Durchschlag in Isolatoren
Flüssigkristall
Durchschlag in Luft
10^{6}
Blitze
bei niederen Frequenzen für den Menschen unbedenklich
10^{4}
HF-Feld erwärmt Gewebe
zugelassenes Spitzenfeld am Arbeitsplatz
Durchschlag in Kunststoffen
10^{2}
zugelassene Monitorfelder
Bildfrequenz
Zeilenfrequenz
1
Feld in Leitern
10^{-2}
HF-Feld löst Gefäßreflexe aus
10^{-4}
industrielle Störungen
Elektrorezeptor bei Fischen
10^{-6}
kosmisches Rauschen
10^{-8}

Auf den Menschen wirken elektrische Felder unterschiedlich. Relativ kleine Wechselfelder bewirken zuweilen Gefäßreflexe, aber erst erheblich größere rufen eine Gewebeerwärmung hervor, wie sie z.B. in der medizinischen Therapie angewendet wird. Die zulässigen Höchstwerte der elektrischen Feldstärke, denen Menschen ausgesetzt werden dürfen, hängen sehr stark von der Frequenz des Wechselfeldes ab. Für Frequenzen zwischen 0,01 bis etwa 2,1 MHz liegt der Wert bei 8300 V/m. Bei höheren Frequenzen ist der zulässige Wert z.T. auch direkt eine Funktion der Frequenz. So ergibt im Bereich der Frequenz f von 2,1–10 MHz der Höchstwert zu $17750/f$ V/m und im Bereich 400–2000 MHz zu $88{,}8f^{1/2}$ V/m[1]. Für den Umgang mit Monitoren von PC gibt es empfohlene Grenzwerte, die sich für die hohen Zeilenfrequenzen (10 bis 100 kHz) und für die Bildfrequenz (50 bis 100 Hz) deutlich unterscheiden (s. Skale). Gleichfelder sind dagegen bis zu beachtlichen Feldstärken unbedenklich.

Für die elektrische Feldstärke gibt es keine SI-fremden Einheiten.

3.4.5 Beweglichkeit von Ladungsträgern in Quadratmeter pro Voltsekunde ([Beweglichkeit von Ladungsträgern] = m^2/Vs)

Im allgemeinen bewegen sich in einem Leiter die elektrischen Ladungen so unregelmäßig wie die Atome oder Moleküle eines Gases. Man spricht deswegen auch bei der Betrachtung von metallischen Leitern von einem Elektronengas, weil die Elektronen die den Stromfluß hervorrufenden Ladungsträger sind. Werden diese sich bewegenden Elektronen einem elektrischen Feld E ausgesetzt, so überlagert sich der zufälligen Bewegung eine weitaus geringere Driftgeschwindigkeit v in Richtung des Feldes. Der Zusammenhang zwischen der Driftgeschwindigkeit und der elektrischen Feldstärke ist durch die Beweglichkeit μ der Ladungsträger gegeben:

$$v = \mu E.$$

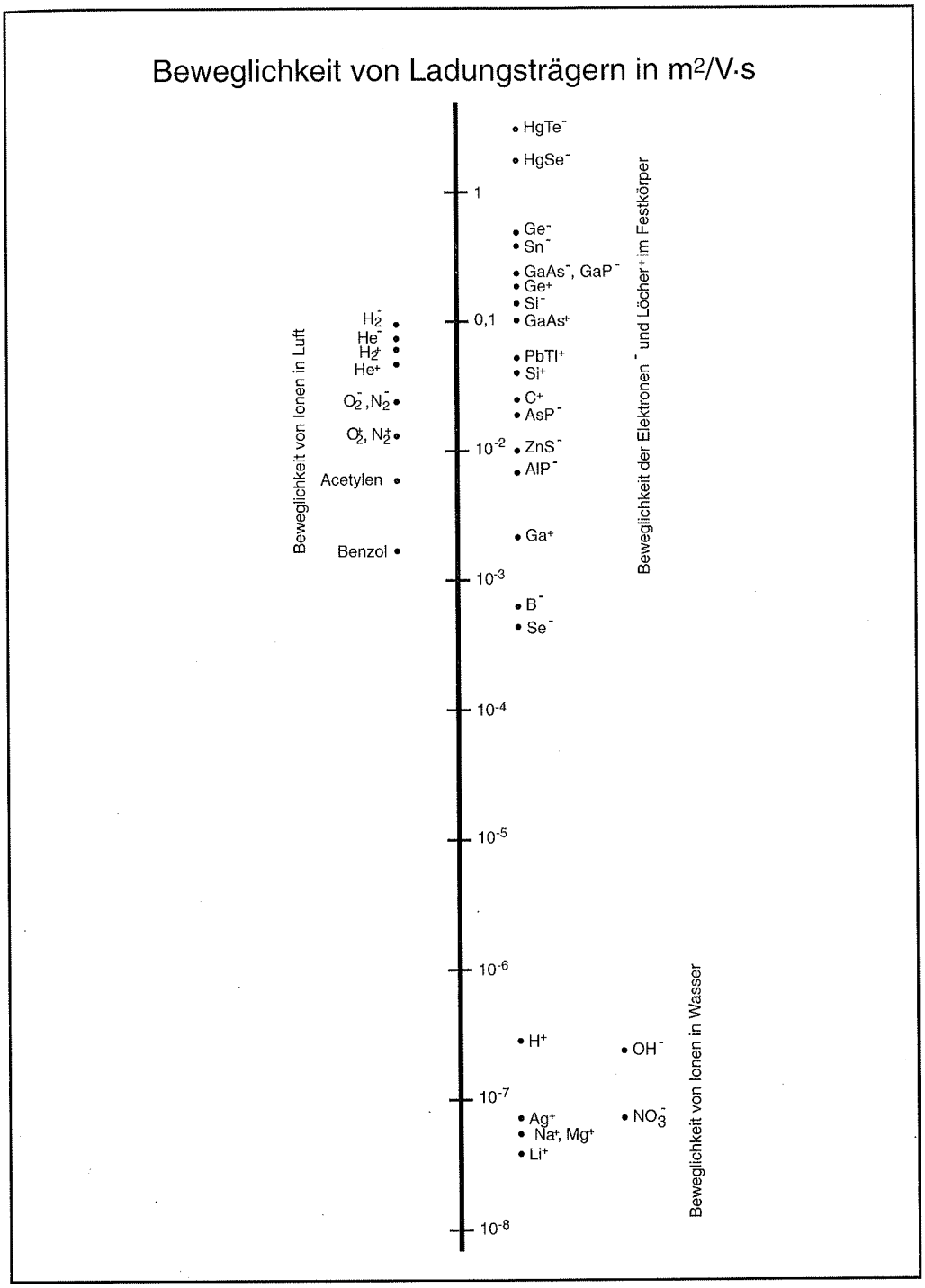
Aus diesem Zusammenhang ergibt sich die Maßeinheit für die Beweglichkeit der Ladungsträger.

Ein Quadratmeter pro Voltsekunde ($1\ m^2V^{-1}s^{-1}$) ist die Beweglichkeit von Ladungsträgern, bei der eine elektrische Feldstärke von 1 V/m eine Driftgeschwindigkeit von 1 m/s erzeugt.

Der Zusammenhang zwischen Driftgeschwindigkeit und Feldstärke ist die eigentliche Grundlage des Ohmschen Gesetzes. Nur solange μ bei der Stromleitung unverändert bleibt, gilt $U = RI$.

Infolge der Beweglichkeit gilt das Ohmsche Gesetz u.a. auch für Elektronen im Vakuum und in Plasmen (z.B. in Elektronen- oder Gasentladungsröhren) nicht. Auch in Halbleitern gilt es nur in begrenztem Umfang. Mit der Beweglichkeit ist daher auch nur eingeschränkt die Leitfähigkeit eines Materials charakterisiert. Dieser Zusammen-

[1] Eine Verordnung der Bundesregierung vom Mai 1996 legt für Deutschland geringere Werte fest.


Beweglichkeit von Ladungsträgern in m²/V·s
HgTe⁻
HgSe⁻
1
Ge⁻
Sn⁻
GaAs⁻, GaP⁻
Ge⁺
Si⁻
0,1
GaAs⁺
PbTl⁺
Si⁺
C⁺
AsP⁻
10⁻²
ZnS⁻
AlP⁻
Ga⁺
10⁻³
B⁻
Se⁻
10⁻⁴
10⁻⁵
10⁻⁶
H⁺
OH⁻
10⁻⁷
Ag⁺
Na⁺, Mg⁺
Li⁺
NO₃⁻
10⁻⁸
Beweglichkeit von Ionen in Luft
H₂⁻
He⁻
H₂⁺
He⁺
O₂⁻, N₂⁻
O₂⁺, N₂⁺
Acetylen
Benzol
Beweglichkeit der Elektronen⁻ und Löcher⁺ im Festkörper
Beweglichkeit von Ionen in Wasser

hang gilt nämlich nur solange, wie für den gewählten Strom auch genügend Ladungsträger (z.B. Elektronen) im Material vorhanden sind. Die freie Ladungsträgeranzahl eines Materials ist unabhängig von der Beweglichkeit seiner Ladungsträger. In Isolatoren ist die Ladungsträgeranzahl nahezu null, in Halbleitern stark begrenzt und nur in Leitern hinreichend groß. Bei den Halbleiterbauelementen wird die Zahl der Ladungsträger durch Dotierung gezielt verändert.

Die Skale macht drei Gruppen von Beweglichkeiten deutlich, die für Ionen in Luft, in Wasser und für Ladungsträger in Festkörpern. Es besteht offensichtlich ein Zusammenhang zwischen der stofflichen Struktur der Materialien und der Beweglichkeit freier Ladungsträger in ihnen.

Für die Messung der Beweglichkeit sind komplizierte Meßanordnungen notwendig. Große Bedeutung hat die Bestimmung dieser Größe für Elektrolyte, weswegen hier auch spezielle Meßverfahren entwickelt wurden.

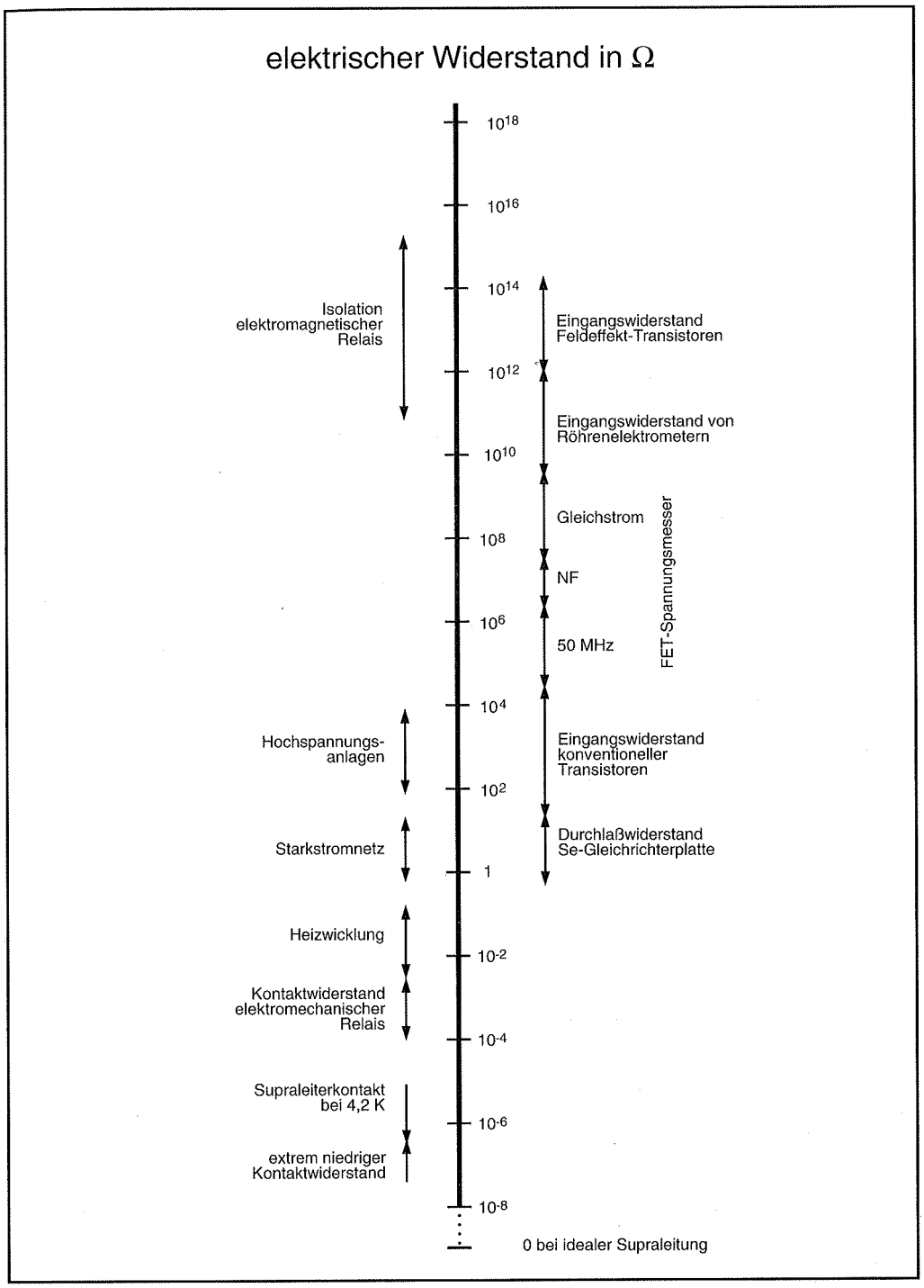
3.4.6 Elektrischer Widerstand in Ohm ([elektrischer Widerstand] = Ω)

Die verschiedenen Stoffe setzen dem Fluß des elektrischen Stromes unterschiedliche Widerstände entgegen. Bemerkbar wird dies z.B. bei der Erwärmung eines elektrischen Leiters, wenn die ihn durchfließende Stromstärke groß genug ist. Einerseits wird dieser Effekt in vielen praktischen Fällen ausgenutzt (z.B. bei elektrischen Heizgeräten), andererseits wird dieser Effekt als störend empfunden, vor allem, wenn er mit Verlust an nutzbarer elektrischer Energie verbunden ist. Um diesen zu vermeiden, müssen z.B. Leiter wegen hoher Ströme sehr hoch dimensioniert sein, was hohe Materialkosten verursacht. Auch an Geräteanschlüssen auftretende zu hohe Übergangswiderstände sind störend.

Einem durch eine Spannung (Potentialdifferenz) angeregten Stromfluß setzt der elektrische Leiter einen Widerstand entgegen. Je größer dieser Widerstand ist, um so kleiner ist der fließende Strom. Diesen Zusammenhang formuliert das Ohmsche Gesetz $U = RI$. Entsprechend ergibt sich auch die Maßeinheit für den Widerstand, die nach dem deutschen Physiker Georg Simon Ohm (1787–1854) benannt ist.

Ein Ohm (1 Ω) ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein zeitlich unveränderlicher Strom der Stärke 1 A fließt.

Die reproduzierbare und praktikable Darstellung des Ohm war seit seiner Definition ein Problem. Auf Werner Siemens (1816–1892) geht der Vorschlag zurück, das Ohm durch den Widerstand einer Quecksilbersäule darzustellen. So wurde in Chicago 1893 (1898 in das deutsche Gesetz übernommen) das Ohm als Widerstand einer Quecksilbersäule der Länge 106,3 cm und einer Masse von 14,4521 g (was einem, durchweg gleichen, Durchmesser der Säule von 1 mm^2 entspricht) bei der Temperatur des


elektrischer Widerstand in Ω
10^{18}
10^{16}
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
Isolation elektromagnetischer Relais
Hochspannungs-anlagen
Starkstromnetz
Heizwicklung
Kontaktwiderstand elektromechanischer Relais
Supraleiterkontakt bei 4,2 K
extrem niedriger Kontaktwiderstand
Eingangswiderstand Feldeffekt-Transistoren
Eingangswiderstand von Röhrenelektrometern
Gleichstrom
NF
50 MHz
FET-Spannungsmesser
Eingangswiderstand konventioneller Transistoren
Durchlaßwiderstand Se-Gleichrichterplatte
0 bei idealer Supraleitung

schmelzenden Eises definiert. Die durch diese Festlegung erreichte Genauigkeit betrug nur 0,1%. Als Reaktion auf die gestiegenen Genauigkeitsanforderungen aufgrund der höheren Meßgenauigkeiten wurde 1908 die Länge der Quecksilbersäule auf 106,300 cm festgelegt. Die Reproduktion und Weitergabe dieses Widerstandsnormals stellte jedesmal sehr hohe experimentelle Anforderungen, die besonders durch die erhebliche Temperaturabhängigkeit des Widerstands von Quecksilber (Widerstandsänderung von 0,1% je Kelvin) erschwert wurden. Deshalb wurden zur Bewahrung und Weitergabe der Normale entsprechende Normalwiderstände aus Drahtspulen geeigneter Legierungen eingesetzt (z.B. Goldchromdraht in Heliumatmosphäre).

Durch den 1980 von Klaus von Klitzing entdeckten Quanten-Hall-Effekt wird es möglich, den elektrischen Widerstand an atomare Einheiten zu knüpfen. Im Gegensatz zum normalen Hall-Effekt, bei dem die erzeugte Hall-Spannung von der Geometrie und von Materialparametern des im Magnetfeld befindlichen Plättchens abhängt, wird sie beim Quanten-Hall-Effekt allein durch die Naturkonstanten e_0 und h bestimmt. Sind diese hinreichend genau bekannt, hat man ein an atomare Einheiten gebundenes Widerstandsnormal $h/e_0^2 = 25812{,}81\ \Omega$.

In der Praxis werden Widerstände meist über Strom und Spannung gemessen. Dabei ist die Frage der strom- bzw. spannungsrichtigen Schaltung zu beachten. Breite Anwendung finden auch Meßbrücken. Besonders kleine und besonders große Widerstände werden mit speziellen Geräten gemessen. Die erreichte relative Meßunsicherheit beträgt etwa 10^{-7}.

Sowohl nach der technischen Bauweise wie auch nach ihrem Verhalten gegenüber Gleich- und Wechselströmen unterscheidet man verschiedene Arten von Widerständen. Technisch gibt es z.B. Draht-, Schicht-, Heiz- und Drehwiderstände (Potentiometer). Nach dem Verhalten gegenüber den Stromarten unterscheidet man

- Gleichstromwiderstände, z.B. als reelle Widerstände, Bauelemente und Innenwiderstände von Batterien;
- reelle Wechselstromwiderstände, sie sind bei Nichtlinearitäten differentiell definiert und betreffen oft Innenwiderstände von Bauelementen und Schaltungen;
- komplexe Wechselstromwiderstände, bei ihnen sind Strom und Spannung nicht in Phase zueinander. Man spricht dann von Impedanz bzw. elektrischen Scheinwiderständen. Sie treten durch induktive und kapazitive Komponenten des Widerstands auf. Die komplexen Widerstände kann man in einen Real- und einen Imaginärteil zerlegen. Der Realteil ist der den Stromfluß entsprechend dem Ohmschen Gesetz beeinflussende, der Imaginärteil bewirkt die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

Extrem kleine Widerstände von praktisch null treten bei der Supraleitung auf. Dieser Effekt wurde von Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926) 1911 zuerst an Quecksilber entdeckt. Für Metalle liegt die Sprungtemperatur, unterhalb der diese in den supraleitenden Zustand übergehen, bei wenigen Kelvin (0,14 K bei Iridium, 8,9 K bei Nobium), bei Legierungen und intermetallischen Verbindungen ist man in den technisch besser beherrschbaren Bereich von flüssigem Stickstoff (77,36 K) vorgedrungen. Der Supraleiter mit der bisher höchsten Sprungtemperatur von 127 K ist
$Tl_2Ba_2Ca_nCu_{1+n}O_{6+2n}$ ($n = 0, 1, 2, ...$).

Reziprok zum elektrischen Widerstand ist der elektrische Leitwert G definiert: $G = 1/R$. Er wird in Siemens gemessen ($[G] = \mathrm{S}$). Im angelsächsischen Sprachraum wird er in mho gemessen

$$1\ \mathrm{mho} = 1\ \mathrm{S} = 1\ \Omega^{-1}.$$

Eine besondere Form ist der Flächenwiderstand, für dessen Einheit

$$\Omega_{\square} = \Omega\mathrm{m}/d$$

gilt. Dieser Wert ist eine Materialkonstante. Er gilt für eine quadratische Widerstandsschicht der Dicke d und zwar unabhängig von der Größe der quadratischen Fläche. Damit besteht ein Zusammenhang zum spezifischen Widerstand (vgl. Abschn. 3.4.7).

Für den elektrischen Widerstand existieren keine Einheiten außerhalb des SI.

3.4.7 Spezifischer elektrischer Widerstand in Ohmmeter ([spezifischer elektrischer Widerstand] = Ωm)

Während bei der Betrachtung des Widerstands i. allg. die Betrachtung von Bauelementen oder Schaltungen als Ganzes im Vordergrund steht, ist bei der Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit von Materialien die Größe spezifischer Widerstand ρ interessant. Sie bezieht sich auf einen Leiter bestimmter geometrischer Abmessungen.

Ein Ohmmeter (1 Ωm) ist der spezifische Widerstand eines homogenen Leiters mit dem konstanten Querschnitt 1 m^2 und der Länge 1 m, dessen Widerstand 1 Ω beträgt.

Die Einheit Ωm ergibt sich durch Herauskürzen der Längeneinheit m aus dem sich aus der Definition ergebenden Ausdruck $\Omega m^2/m$. Durch diesen – mathematisch korrekten – Vorgang geht in der Maßeinheit der eigentliche sachliche Inhalt der Größe etwas verloren. Wir folgen hier aber trotzdem der üblichen Darstellung in Ωm.

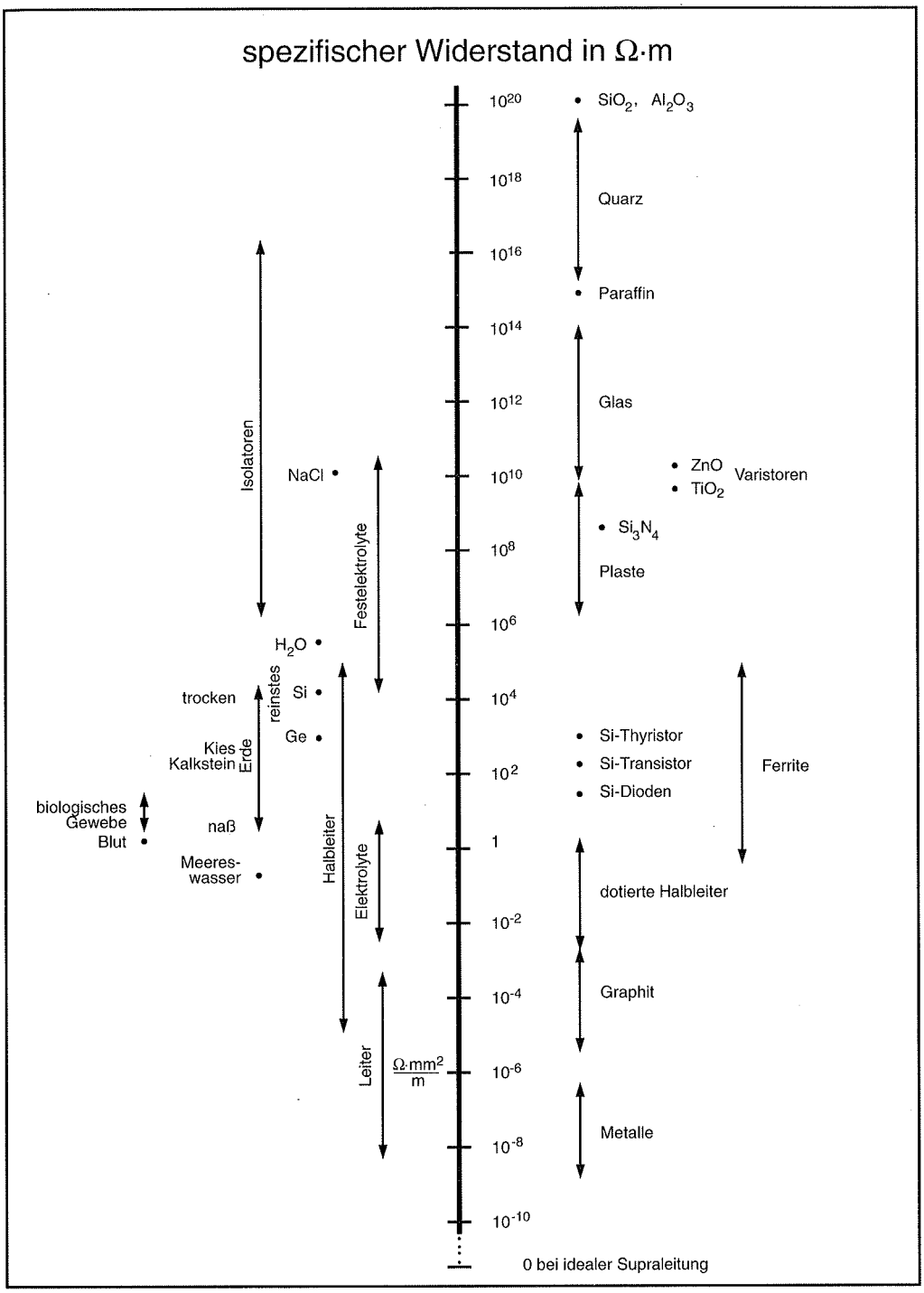
Der spezifische Widerstand ermöglicht eine genauere Betrachtung der Einflüsse der stofflichen Eigenschaften auf die elektrische Leitfähigkeit. So kann man bei Metallen feststellen, daß sich der spezifische Widerstand aus zwei voneinander unabhängigen Komponenten zusammensetzt, von denen nur die eine temperaturabhängig ist. Debye (1884–1966) fand heraus, daß unterhalb einer charakteristischen Temperatur (der sogen. Debye-Temperatur) der spezifische Widerstand von Metallen einen konstanten Wert annimmt, den spezifischen Restwiderstand. Die temperaturabhängige Komponente, die aus der Streuung der den Stromfluß tragenden Ladungsträger an den Schwingungen der Metallgitteratome (Phononen) resultiert, genügt in guter Näherung einem linearen Zusammenhang mit der Temperatur. Damit kann das Temperaturverhalten des spezifischen Widerstands gut durch die Gleichung $\rho = \rho_0(1 + \beta\vartheta)$ beschrieben werden. Dabei ist ϑ die Temperatur in °C und β der Temperaturkoeffizient, der sich dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des idealen Gases um so mehr nähert, je reiner das Metall ist. Auch dieses Verhalten ist ein Grund dafür, bei der elektrischen Leitung in Metallen das Modell des Elektronengases heranzuziehen.

Der von der Skale überstrichene Bereich von 30 Zehnerpotenzen ist beachtlich. Am unteren Ende der Skale wären zu kleineren Werten hin eigentlich die Supraleiter zu ergänzen. Hierfür existieren aber keine geeigneten Zahlenwerte, man kann abschätzen, daß dann wohl noch 15 Zehnerpotenzen zu ergänzen wären, womit der technisch beherrschte Bereich des spezifischen Widerstandes dann über 45 Zehnerpotenzen veranschlagt werden kann. Auffällig ist, daß es dabei praktisch keine Lücke gibt, womit prinzipiell für jeden Anwendungsfall ein geeignetes Material zur Verfügung steht. Die konkrete technische Lösung kann dabei trotzdem beliebig kompliziert sein.

Analog zum elektrischen Leitwert existiert auch eine elektrische Leitfähigkeit $\sigma = 1/\rho$. Ihre Maßeinheit ist dann entsprechend durch S/m = Sm/m^2 gegeben.

Für den Bezug zum Flächenwiderstand in $\Omega_\square$ sei auf Abschnitt 3.4.6 verwiesen.

Für den spezifischen Widerstand existieren keine Einheiten außerhalb des SI.


spezifischer Widerstand in Ω·m
10^{20}
10^{18}
10^{16}
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
SiO_2, Al_2O_3
Quarz
Paraffin
Glas
ZnO
TiO_2
Varistoren
Si_3N_4
Plaste
Si-Thyristor
Si-Transistor
Si-Dioden
Ferrite
dotierte Halbleiter
Graphit
Metalle
0 bei idealer Supraleitung
Isolatoren
NaCl
Festelektrolyte
H_2O
trocken
reinstes
Si
Ge
Kies
Kalkstein
Erde
biologisches Gewebe
Blut
naß
Meeres-wasser
Halbleiter
Elektrolyte
Leiter
$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

3.4.8 Elektrische Ladung in Coulomb ([elektrische Ladung] = C)

Die elektrische Ladung ist ein Grundphänomen der Elektrizität. Erst die Entdeckung der Elementarladung e_0 des Elektrons brachte die atomare Grundlage dieses Phänomens ans Licht. Eine beliebige Elektrizitätsmenge ist immer ein Vielfaches dieses kleinsten Quantums der Elektrizität. Elektrische Ladungen werden durch Ladungstrennung auf den im Normalfall elektrisch neutralen Körpern erzeugt. Das kann durch verschiedene Verfahren erfolgen. Die bekanntesten sind die Reibung bestimmter Stoffe. Aber auch der Einfluß anderer Ladungen kann durch Influenz auf neutralen Körpern Ladungstrennung hervorrufen. Experimentell läßt sich zeigen, daß sich gleiche Ladungen abstoßen und ungleiche anziehen (am bekanntesten sind die Versuche mit aufgeladenen Holundermarkkügelchen). Die Nichterklärbarkeit dieser Effekte mittels der Mechanik führte dann zur Herausbildung eines neuen Gebietes der Physik, der Elektrizitätslehre.

Da die sich bewegende elektrische Ladung der Träger des elektrischen Stromes ist, wird die Maßeinheit der Ladung, die nach dem französischen Physiker Charles Auguste de Coulomb (1736–1806) benannt ist, über die Zeitdauer eines Stromflusses definiert.

Ein Coulomb (1 C) ist die Elektrizitätsmenge, die während 1 s bei einem unveränderlichen Strom der Stärke 1 A durch den Querschnitt des Leiters fließt, 1 C = 1 As.

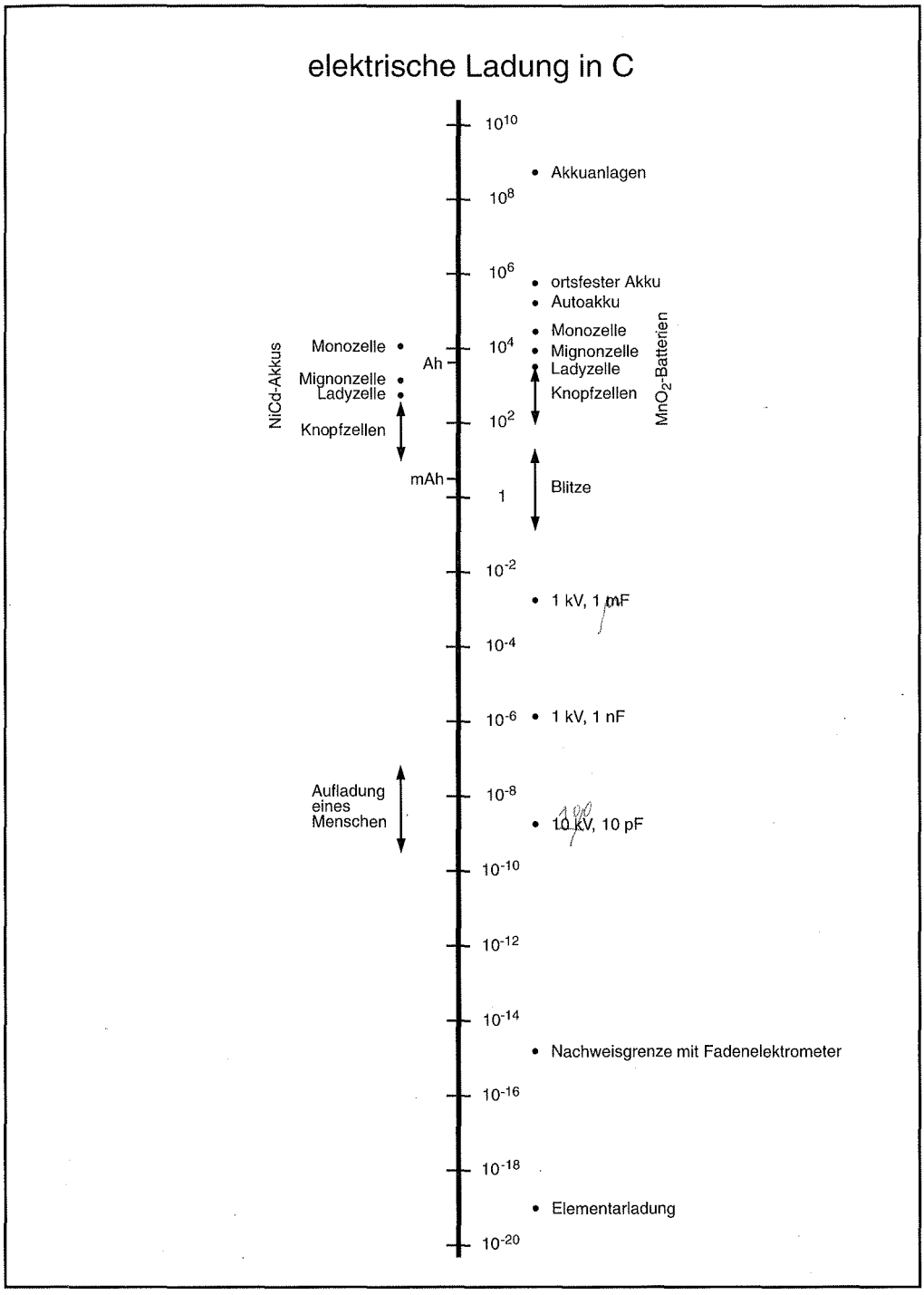
Im Prinzip ließe sich die Ladung einfach durch die Anzahl der entsprechenden Elementarladungen angeben. Aber einerseits ist deren Wert mit $1{,}602 \cdot 10^{-19}$C sehr klein und damit unpraktisch und andererseits würden sich meßtechnische und Darstellungsprobleme der Einheit ergeben.

Geht man beim Aufbau der Elektrizitätslehre induktiv vom Grundphänomen der Ladung aus, kann man aufgrund der Kraftwirkungen zwischen zwei elektrischen Ladungen deren Einheit Coulomb über die mechanische Einheit der Kraft definieren. Danach besitzen zwei Punktladungen gleichen Betrags, die im Vakuum in 1 m Abstand aufeinander die Kraft von $\frac{10^{12}}{4\pi \cdot 8{,}85418782}$ N ausüben, jede die Ladung 1 C.

Die Ladung Q kann man geeignet sammeln, die Aufnahmefähigkeit für elektrische Ladungen wird als Kapazität C bezeichnet (vgl. 3.4.9). Da sich zwischen der positiven und der negativen Ladung einer Kapazität ein elektrisches Feld aufbaut, existiert zwischen den Punkten der positiven und der negativen Ladung eine Potentialdifferenz, die eine Spannung U definiert. Der Zusammenhang ist gegeben durch $Q = UC$. Viele Meßmethoden zur Ladungsbestimmung nutzen diesen Zusammenhang.

Für höchste Empfindlichkeiten werden elektrostatische Meßgeräte, wie z.B. Fadenelektrometer, verwendet. Sie nutzen die Kraftwirkung F einer zu bestimmenden Ladung Q auf eine definierte Probeladung Q_0 entsprechend dem Coulombschen Gesetz aus:

$$F = \frac{QQ_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2},$$


elektrische Ladung in C
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
10^{-18}
10^{-20}
Ah
mAh
NiCd-Akkus
Monozelle
Mignonzelle
Ladyzelle
Knopfzellen
MnO_2-Batterien
Monozelle
Mignonzelle
Ladyzelle
Knopfzellen
Akkuanlagen
ortsfester Akku
Autoakku
Blitze
1 kV, 1 nF
1 kV, 1 nF
10 kV, 10 pF
Aufladung eines Menschen
Nachweisgrenze mit Fadenelektrometer
Elementarladung

wobei r der Abstand zwischen beiden Ladungen und $\varepsilon_0 = 8{,}8541 \cdot 10^{-12}\ CV^{-1}m^{-1}$ die elektrostatische Feldkonstante ist. Letztere ist gleich der Dielektrizitätskonstanten (vgl. 3.4.10) des Vakuums. Die Nachweisgrenze solcher Fadenelektrometer liegt bei etwa 10^{-15}C.

Eine zweite Methode beruht auf ballistischen Meßgeräten, wie z.B. Kriechgalvanometern. Ihre mechanische Zeitkonstante muß dabei sehr groß gegenüber der Entladungszeit sein. Man erhält dann einen Zeigerausschlag, welcher dem Strom-Zeit-Integral entspricht:

$$Q = \int I dt\,.$$

Eine dritte Meßmethode bietet das Coulomb-Meter, welches die elektrochemische Abscheidung aus Lösungen ausnutzt. Da die Definition der Stromstärke 1893 auf der Abscheidung von Silber aus einer Silbernitratlösung beruhte, kann die damalige Definition des Ampere auch für die Messung der Ladung genutzt werden. So scheidet 1 A innerhalb 1 s (das ist die Elektrizitätsmenge 1 C) aus einer $AgNO_3$-Lösung an der Kathode $1/F = 1{,}036 \cdot 10^{-5}$ mol Silber ab. Darin ist $F = 9{,}648 \cdot 10^4$C/mol die Faraday-Konstante. 1 mol Silber sind etwa 107,9 bis 1,118 mg.

Praktische Bedeutung hat die Ladung bei Akkumulatoren und Batterien. Hier wird sie jedoch als Entladekapazität in Ah bzw. mAh angegeben. Die Speichermöglichkeit elektrischer Ladungen wird auch in Kondensatoren ausgenutzt. Hier ist der wichtige Kennwert die Speichermöglichkeit, die mittels der Größe Kapazität erfaßt wird (vgl. 3.4.9).

Auch die Aufladung von Gewitterwolken kann mittels des Zusammenhanges zwischen Kapazität und Spannung ermittelt werden. Aufgrund des großen Abstandes der Wolken und ihrer geringen Kapazität ist diese aber relativ gering. Die Zerstörungskraft der Blitze geht nicht auf die Ladungsmenge, sondern auf die kurzfristigen (weniger als 1 µs) sehr hohen Ströme von mehreren tausend Ampere zurück.

Ein weiteres, auch praktisch wichtiges Phänomen ist die Bildung von elektrischen Dipolen. Diese entstehen, wenn zwei gleich große aber entgegensetzte Ladungen in einem festen Abstand miteinander verbunden sind. Solche Gebilde besitzen ein elektrisches Dipolmoment, welches z.B. in einem elektrischen Feld ausgerichtet wird. Die Maßeinheit für das Dipolmoment ist dann entsprechend Cm. Die meisten Moleküle besitzen aufgrund ihrer Geometrie ein solches Moment, z.B.

KCl	$27 \cdot 10^{-30}$Cm
H_2O	$6{,}17 \cdot 10^{-30}$Cm
SO_2	$5{,}3 \cdot 10^{-30}$Cm
HCl	$3{,}5 \cdot 10^{-30}$Cm.

Weitere Einheiten für die elektrische Ladung sind:

1 Amperesekunde	= 1 As = 1C
1 Amperestunde	= 1 Ah = 3600 C
1 elektrostatische Einheit	= 1 ESE = $3{,}335 \cdot 10^{-10}$ C
1 Elektronenladung	= 1 e_0 = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.

3.4.9 Elektrische Kapazität in Farad ([elektrische Kapazität] = F)

Mit Kapazität wird umgangssprachlich die Möglichkeit angedeutet, etwas aufzunehmen, zu speichern bzw. auch etwas abzugeben. Hohe Kapazität bedeutet, daß viel vorhanden ist bzw. aufgenommen werden kann. Die Speicherkapazität eines Computers oder einer Diskette sind Beispiele dafür. Auch die Charakterisierung eines Menschen als Kapazität seines Fachgebietes deutet an, daß dieser viel Wissen hat, welches er (nutzbringend) abgeben kann.

Im Fall der elektrischen Kapazität geht es darum, welche Menge elektrischer Ladung (Elektrizitätsmenge) gespeichert bzw. bei Bedarf abgegeben werden kann. Das Konstruktionsprinzip zur Lösung dieses Problems liegt darin begründet, daß die durch Ladungstrennung erzeugten negativen und positiven Ladungen auf zwei getrennten elektrischen Leitern gesammelt werden, die durch einen Isolator (der auch nur Luft sein kann) getrennt sind. Die einfachste konstruktive Lösung sind zwei Metallplatten mit einer Luftschicht dazwischen – der Plattenkondensator. Die Isolatorschicht bestimmt die Speichermöglichkeit der Anordnung wesentlich mit, da durch sie bestimmt wird, wann die durch die Ladungstrennung aufgebaute Potentialdifferenz abgebaut wird und damit die Ladungstrennung aufgehoben wird (Durchschlag des Kondensators). Die erste Form solcher Kondensatoren waren die im 18. Jahrhundert bei den Demonstrationen der Effekte der Elektrizität verwendeten Leidener Flaschen. Dies waren Glasflaschen, die innen und außen mit einer Metallfolie versehen waren, die Isolierschicht war das Glas.

Aufgrund dieser physikalischen Zusammenhänge ist die SI-Einheit der Kapazität, die nach dem englischen Physiker Michael Faraday (1791–1867) benannt ist, über die Elektrizitätsmenge und die durch sie aufgebaute Potentialdifferenz (Spannung) definiert.

Ein Farad (1 F) ist die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge 1 C auf die Spannung 1 V aufgeladen wird.

Am einfachsten läßt sich die Kapazität bei einem Plattenkondensator berechnen. Befinden sich zwei Kondensatorplatten der Fläche A im Abstand d voneinander, so gilt für die Kapazität C

$$C = \varepsilon \frac{A}{d},$$

wobei $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ die Dielektrizitätskonstante ist, die sich aus der elektrischen Feldkonstanten ε_0 und der relativen Dielektrizitätskonstanten ε_r zusammensetzt. Dabei gibt ε_r die Stoffeigenschaften des zwischen den Platten befindlichen Isolators wieder, für das Vakuum ist deshalb $\varepsilon_r = 1$. Aus dieser Beziehung ist ersichtlich, daß die Kapazität im wesentlichen durch die Plattengeometrie und die Eigenschaften des zwischen ihnen liegenden Isolators bestimmt wird.

Für die verschiedenen Anwendungsgebiete sind verschiedene konstruktive Lösungen entwickelt worden. So erhält man sehr große Flächen, indem man diese beim Folienkondensator aufwickelt. Die Isolierschicht (das Dielektrikum) ist hier eine bestimmte Folie. Auf der anderen Seite kann man die Speicherfläche erhöhen, indem man die

Oberfläche der Platten stark aufrauht. Dies wird z.B. bei den Elektrolytkondensatoren angewendet.

Das Verhalten der Kondensatoren ist für Gleichstrom und für Wechselstrom unterschiedlich. Bei fließendem Gleichstrom kann sich der Kondensator nur bis zum Erreichen seiner Kapazität aufladen, sein Verhalten könnte mit einem Akkumulator verglichen werden. Dann ist er in der Lage, bei Abschalten des Stromflusses durch seine Entladung einen Entladestrom zu erzeugen. Er funktioniert dann beinahe wie eine Batterie. Bei fließendem Wechselstrom lädt sich der Kondensator erst auf und durch die dann wechselnde Polarität des Stromes wieder ab. Dabei beeinflußt der Kondensator durch seine Kapazität aber wiederum den elektrischen Wechselstrom, man spricht deshalb bei Wechselstrom vom kapazitiven Widerstand eines Kondensators.

Diese Verhaltensweise erklärt auch die auf den ersten Blick ungewöhnliche Aufnahme von Batterien mit Angabe ihrer Kapazität in diese Skale. Mit dem 1978 erstmals auf dem Markt erscheinenden sogenannten Gold Cap konnte die bis dahin vorhandene Lücke zwischen den herkömmlichen Kondensatoren und den Batterien in der Kapazitätsskale geschlossen werden. Durch besondere technische Lösungen gelingt es beim Gold Cap, eine sehr hohe Kapazität auf kleinstem Raum zu erzielen (ein Gold Cap von 10 F bei 2,3 V ist etwa so groß wie ein Zahnbürstenkopf). Für manche Anwendungen, bei denen elektrische Energie gespeichert werden soll, ist der Gold Cap günstiger als die bisher eingesetzten Akkus, da er z.B. bei ständig anliegender Ladespannung nicht überladen werden kann, was bei den auf chemischen Vorgängen basierenden Akkumulatoren möglich ist.

Für die Speicherkapazität bei Informationsspeichern sei auf Abschnitt 3.10 verwiesen. In der Skale ist zum Vergleich die Kapazität im dRAM angegeben.

Die Messung der Kapazität erfolgt vorwiegend mit Meßbrücken durch Vergleich. Eine weitere Möglichkeit besteht in der meßtechnischen Bestimmung des Wechselstromwiderstands eines Kondensators. Für einen reinen Kondensator in einem Wechselstromkreis gilt analog das Ohmsche Gesetz $U = R_C I$, wobei R_C der kapazitive Widerstand des Kondensators ist, der durch die Kapazität und die Frequenz f des Wechselstromes bestimmt wird:

$$R_C = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Die relative Meßunsicherheit bei Kondensatoren beträgt etwa 10^{-6}.

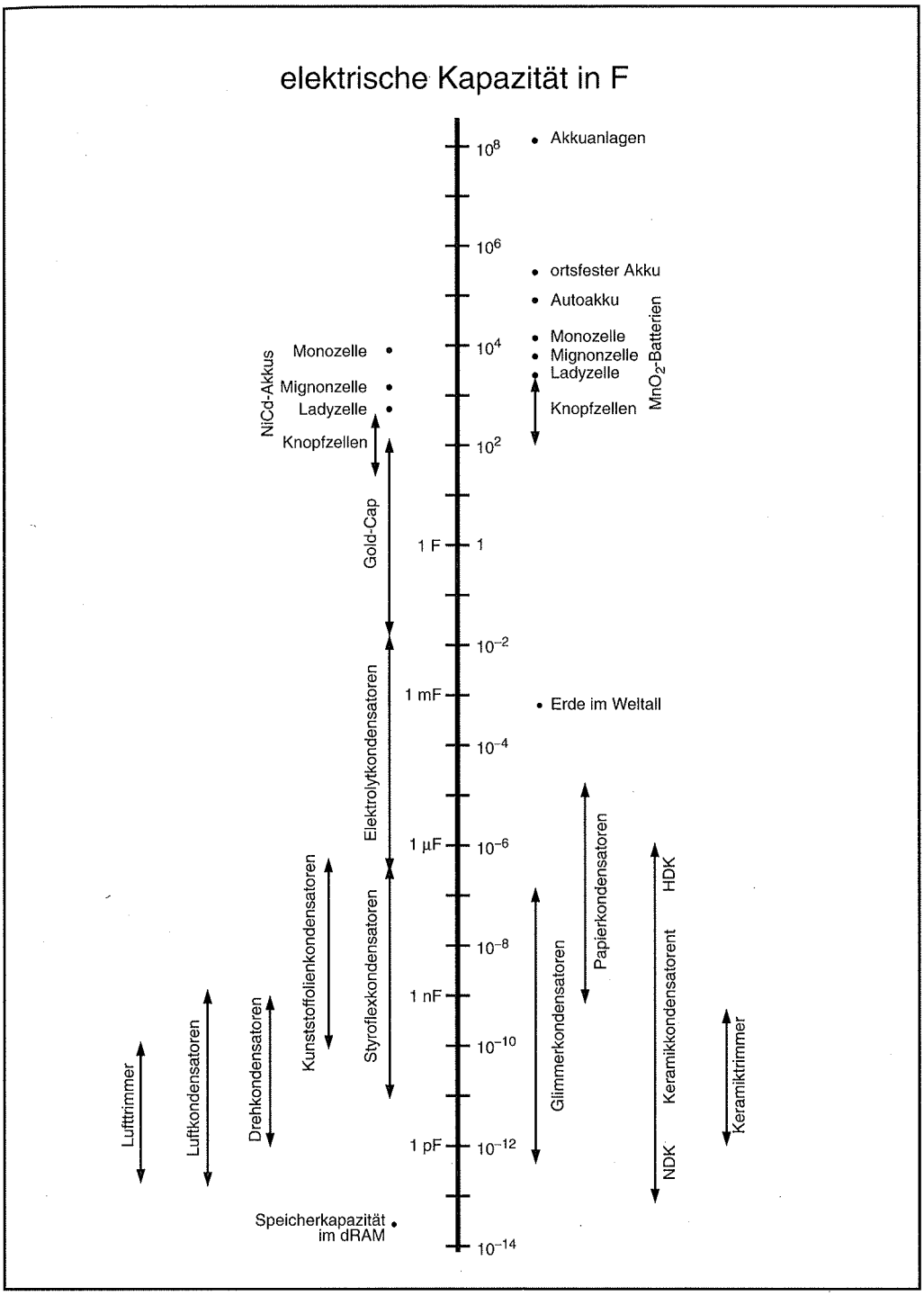
Mittels der Beziehung, mit der die Kapazität einer Kugel mit dem Radius r gegenüber dem Unendlichen ermittelt werden kann,

$$C = 4\pi\varepsilon_0 r,$$

läßt sich die Kapazität einer Gewitterwolke abschätzen. Bei einem Abstand von 10 km ergibt sich für diese eine Kapazität von ca. 1 µF. Das erklärt die selbst bei einer Spannung von 10^6 V relativ kleine Ladung um 1 C für die Gewitterwolke.

In der älteren Literatur findet man für die Kapazität entsprechend dem verwendeten Maßsystem auch andere Einheiten:

elektrostatisches System:	1 cm	(1 cm = 1,11 · 10^{-12} F)
elektromagnetisches System:	1 s^2/cm.	


elektrische Kapazität in F
10^8
10^6
10^4
10^2
1 F
1
10^{-2}
1 mF
10^{-4}
1 µF
10^{-6}
10^{-8}
1 nF
10^{-10}
1 pF
10^{-12}
10^{-14}
Akkuanlagen
ortsfester Akku
Autoakku
Monozelle
Mignonzelle
Ladyzelle
Knopfzellen
MnO_2-Batterien
Monozelle
Mignonzelle
Ladyzelle
Knopfzellen
NiCd-Akkus
Gold-Cap
Elektrolytkondensatoren
Erde im Weltall
Styroflexkondensatoren
Kunststoffolienkondensatoren
Papierkondensatoren
Glimmerkondensatoren
HDK
Keramikkondensatorent
NDK
Keramiktrimmer
Drehkondensatoren
Luftkondensatoren
Lufttrimmer
Speicherkapazität im dRAM

3.4.10 Relative Dielektrizitätskonstante

Das durch elektrische Ladungen aufgebaute elektrische Feld kann, wie bereits beschrieben, in in dieses Feld gebrachten Stoffen (Medien) durch Influenz eine Ladungstrennung erzeugen. Diese kann dadurch auftreten, daß sich die verschiedenen Ladungsschwerpunkte der Moleküle des Stoffes entlang des Feldes ausrichten. Um das Feld innerhalb des Stoffes beschreiben zu können, wurde die Größe elektrische Verschiebung D eingeführt. Sie hängt mit der elektrischen Feldstärke E über die Beziehung

$$D = \varepsilon \cdot E$$

zusammen. Die Proportionalitätskonstante ε heißt Dielektrizitätskonstante (Permittivität). Sie beschreibt wesentliche Stoffeigenschaften in bezug auf das Verhalten im elektrischen Feld. Es sei an dieser Stelle daran erinnert, daß die elektrische Feldstärke eine vektorielle Größe ist (sie hat einen Betrag und eine Richtung) und somit auch die elektrische Verschiebung. In vielen Fällen reicht es aus, die Dielektrizitätskonstante als skalare Größe (d.h., es liegt ein homogenes Medium vor) bzw. als skalare Ortsfunktion (bei inhomogenen Medien) zu betrachten. Für schnell veränderliche Wechselfelder kann die Dielektrizitätskonstante auch noch eine Funktion der Frequenz des Wechselfeldes werden. Für bestimmte Probleme, wie z.B. in der Kristalloptik, wird die Dielektrizitätskonstante dann zu einem symmetrischen Tensor 2. Stufe. Wir wollen hier nur den einfachsten Fall (skalare Größe) betrachten.

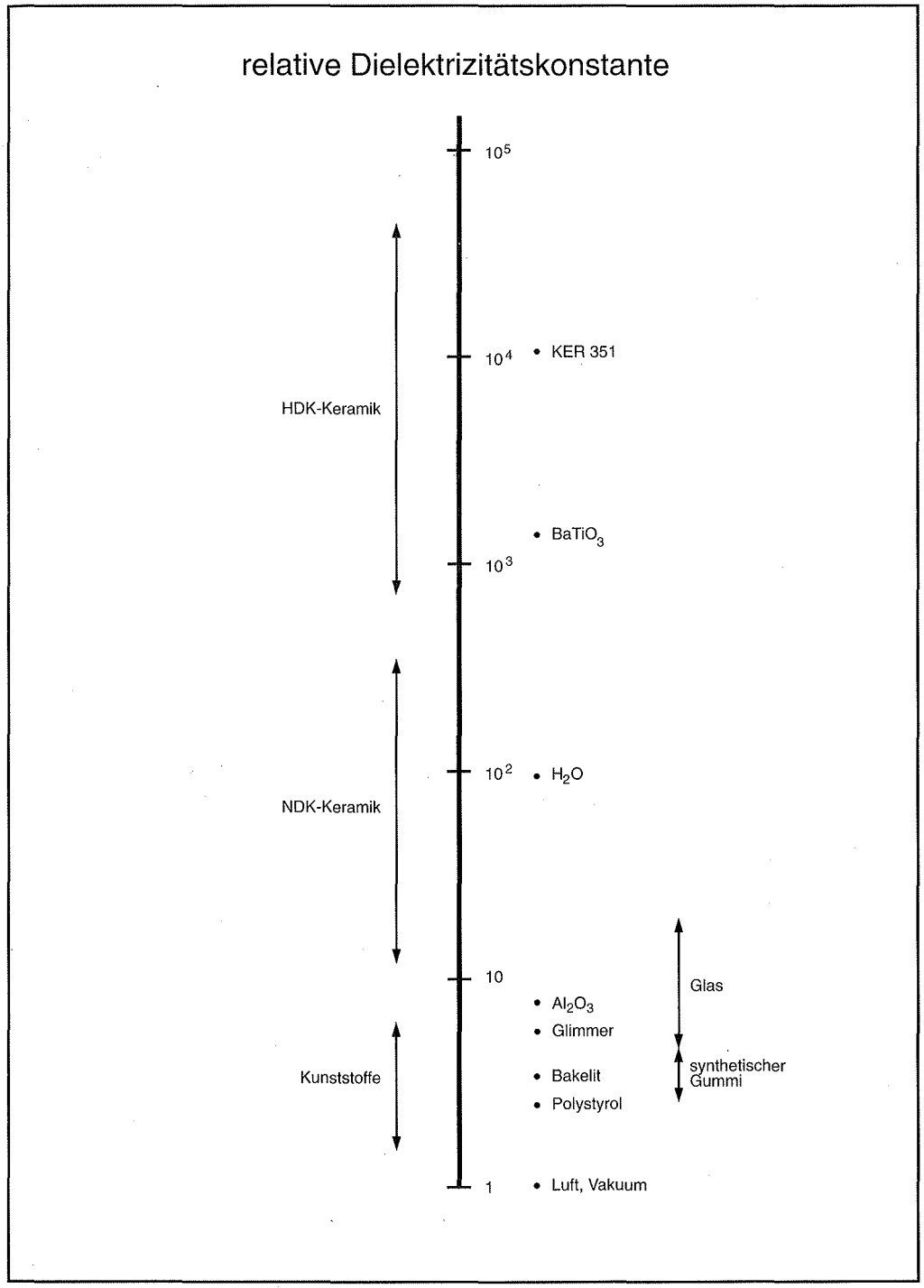
Man kann die Dielektrizitätskonstante in zwei Anteile zerlegen, die absolute Dielektrizitätskonstante (Feldkonstante, Influenzkonstante) ε_0 und die relative Dielektrizitätskonstante ε_r.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad \text{mit } \varepsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}\ \text{F/m}.$$

Die relative Dielektrizitätskonstante ist dann eine Zahl, die eine für das Verhalten des Stoffes in elektrischen Feldern typisches Charakteristikum ist. Ihr Wert für das Vakuum ist definitionsgemäß 1.

Die Messung der Dielektrizitätskonstanten wird im Prinzip auf die Messung der Kapazität eines Kondensators bekannter Geometrie zurückgeführt. Indem man in diesen Meßkondensator den zu untersuchenden Stoff einbringt, ändert sich seine Kapazität und man kann daraus ε_r bestimmen. Dies kann sowohl für Gleichstrom wie auch für Wechselstrom in Abhängigkeit von dessen Frequenz erfolgen.

Übliche Isolatoren haben relative Dielektrizitätskonstanten (abgekürzt DK) bis etwa 10. Einige keramische Materialien, vor allem Titanate, erreichen Werte bis um 100 000. Daher unterscheidet man bei den keramischen Dielektrika zwischen HDK (hohe DK) und NDK (niedrige DK). Die NDK weisen Zahlenwerte auf, die sich nur wenig durch äußere Einflüsse ändern. Es gibt sogar Materialien, die einen extrem geringen Temperaturkoeffizienten besitzen (nahezu null). Bei den HDK ändert sich die relative Dielektrizitätskonstante wesentlich mit der Temperatur und der Stärke des angelegten Feldes. Es tritt auch eine mehr oder weniger ausgeprägte Hysterese (vgl. dazu Abschn. 3.5) auf. Schließlich gibt es auch Materialien, die eine fest eingeprägte elektrische Polarisation (ähnlich den Dauermagneten) aufweisen. Sie heißen Ferroelektrika und gewinnen seit einiger Zeit größere Bedeutung für Mikrophone, Lautsprecher und Halbleiterspeicher.


relative Dielektrizitätskonstante
10^5
10^4
• KER 351
HDK-Keramik
• $BaTiO_3$
10^3
10^2
• H_2O
NDK-Keramik
10
• Al_2O_3
• Glimmer
Glas
synthetischer Gummi
Kunststoffe
• Bakelit
• Polystyrol
1
• Luft, Vakuum

3.5 Magnetismus

Auch der Magnetismus ist wie die Elektrizität ein Phänomen, das nicht direkt vom Menschen wahrnehmbar ist. Andere Lebewesen sind jedoch durchaus in der Lage, das Magnetfeld wahrzunehmen. So orientiert sich die Bakterienart *Aquaspirillum magnetotacticum* am Magnetfeld der Erde, um in dem für sie existentiellen Lebensbereich des Bodenschlamms von Gewässern zu bleiben. Auch für Haie und Rochen haben Studien nachgewiesen, daß diese Fische Schwankungen des Erdmagnetfeldes spüren und sich durch Bewegung im Erdfeld orientieren.

Weil der Mensch mit seinen Sinnesorganen den Magnetismus nicht direkt wahrnehmen kann, gehörte dieser – wie die Elektrizität – lange zu den sogenannten Imponderabilien, d.h. zu den nicht wägbaren Größen. Diese Zuordnung drückte aus, daß man die Erscheinung mit den damals möglichen meßtechnischen Verfahren nicht erfassen konnte. Erst mit den Arbeiten Coulombs waren Magnetismus (und Elektrizität) einer quantitativen Analyse unterziehbar.

Unabhängig von der physikalischen Untersuchung des Phänomens war Magnetismus schon vor 2 000 Jahren bekannt und wurde auch schon technisch genutzt. Am bekanntesten sind die Urformen des magnetischen Kompasses in China, wie der „Südwärts weisende Schöpflöffel" (sinan), der „Südwärts weisende Fisch" (zhinanyü) und die „Südwärts weisende Nadel" (zhinanzhen). Der „Südwärts weisende Schöpflöffel", der etwa ab 470 v. Chr. in Gebrauch kam, war ein Stück Magneteisenstein in Form eines Schöpflöffels, der sich auf einer sehr glatten Platte drehte und dessen Griff nach Süden zeigte, da der Hauptteil seines Körpers nach dem magnetischen Norden weist. Es ist überliefert, daß die Leute des Staates Zheng dieses Instrument bei sich trugen, wenn sie in die weit entfernten Jade-Steinbrüche gingen, um die Richtung nicht zu verlieren. Die Nachteile dieser Konstruktion (z.B. die große Reibung des Löffels auf der „Erdtafel") sollten dann durch den „Südwärts weisenden Fisch", der den Weg zur „Südwärts weisenden Nadel" ebnete, beseitigt werden. Der „Fisch" wurde aus einem Eisenblättchen geschnitten, der dann im Erdmagnetfeld magnetisiert wurde. Um als Kompaß zu dienen, ließ man den Fisch in einem Wassergefäß schwimmen, wobei der Kopf des Fisches südwärts weist. Die „Nadel" wurde dann schon mit einem Magneteisenstein gerieben und dadurch magnetisiert. Für die Aufhängung der Nadel wurden dem heutigen Grundprinzip des Magnetkompasses ähnelnde Techniken entwickelt. Ein wichtiges Einsatzfeld dieser Kompasse war das Militär. Der älteste Bericht der Verwendung des Kompasses für die chinesische Seefahrt findet sich um 1120.

Vermutlich über die Araber, die den Schwimmkompaß auch kannten, sind diese Kenntnisse nach Europa gelangt. Albertus Magnus (ca. 1193–1280), der bedeutendste Gelehrte des 13. Jahrhunderts, schöpfte seine Kenntnisse über den Magnetismus aus arabischen Quellen. Neben der in der „Epistola de magnete" (Brief über den Magneten) von Petrus Peregrinus (13. Jh.) vorgenommenen zusammenfassenden Darstellung der magnetischen Erscheinungen hat das 1600 erschienene Werk „De magnete" von Gilbert (1544–1603) in Europa die größte Wirkung gezeigt. Gilbert stellte den Unterschied von elektrischer und magnetischer Anziehung fest. Die Elektrizität wurde für

ihn von einer bestimmten Substanz verursacht, der Magnetismus dagegen von einer Form. Gilberts Erkenntnisse, daß die Erde als großer Magnet anzusehen ist und seine Anleitungen zur Herstellung guter Kompaßnadeln fanden im 17. Jahrhundert im sich zur Seemacht entwickelnden England große Aufmerksamkeit.

Die Unterteilung in Nord- und Südpol des Magneten finden wir schon bei Peregrinus. Er führte auch Versuche mit zerbrochenen Magneten durch, bei denen sich zeigte, daß jeder Teil des Magneten dieselben Eigenschaften besitzt wie der ganze Magnet.

Die physikalischen Erklärungsversuche für das Phänomen Magnetismus verliefen in Analogie zu denen der Elektrizität. Die experimentelle Erfahrung zeigte, daß es zwei unterschiedliche (positive und negative) magnetische Pole gibt (Nord- und Südpol) und daß gleichnamige Pole sich abstoßen und ungleichnamige sich anziehen. Führt man zur Kennzeichnung der Stärke dieser Pole die magnetische Polstärke ein (analog zur elektrischen Ladung), so kann man in Analogie zur Elektrizitätslehre auch ein Coulombsches Gesetz für Magnetpole aufschreiben. Natürlich lassen sich auch entsprechende Größen zur Charakterisierung des magnetischen Feldes einführen. Es gibt aber eine Besonderheit gegenüber der Elektrizität, die schon Peregrinus in seinen oben erwähnten Versuchen fand – es gibt keine magnetischen Monopole, positive und negative magnetische Pole treten immer zusammen auf (im Gegensatz zur elektrischen Ladung, die durchaus separiert werden kann). Daraus folgt auch, daß im Gegensatz zur möglichen Wanderung elektrischer Ladungen in Leitern magnetische Monopole dies nicht können. Daraus folgt, daß es keine magnetischen „Leiter" gibt. Jeder Stoff behält seine magnetischen Erscheinungen, bis durch innere Gefügeänderungen des Materials der Magnetismus zerstört wird.

Ein wichtiger Schritt für das Verständnis des Magnetismus war die Entdeckung des Zusammenhangs zwischen elektrischem Stromfluß und Erzeugung eines magnetischen Feldes durch Oersteds (1777–1851) Versuch. Mit Faradays Entdeckung der Induktion war neben den Dauermagnetismus bestimmter Stoffe der durch Stromfluß erzeugte Elektromagnetismus getreten. Die Maxwellschen Gleichungen führten dann die elektrischen und magnetischen Erscheinungen im theoretischen Gebäude der Elektrodynamik zusammen. Diese stieß das Tor zur Wellenoptik auf, mit der viele bekannte optische Phänomene auf einer einheitlichen theoretischen Grundlage beschrieben werden konnten.

Alle diese Theorien beschrieben den Magnetismus als makroskopisches Phänomen. Doch der Magnetismus ist eine typische Stoffeigenschaft. Es sei daran erinnert, daß Magnetismus ja auch zuerst als Eigenschaft des sogenannten Magneteisensteins beobachtet wurde. Als Stoffeigenschaft verlangt der Magnetismus nach einer mikroskopischen Beschreibung und damit letztlich nach der Quantentheorie.

Eine für das Verständnis brauchbare Näherung ist aber auch mit der klassischen Betrachtung zu erreichen. Im Atommodell von Niels Bohr (1855–1962) wird der Kern von Elektronen auf bestimmten Bahnen (den Elektronenschalen) umkreist. Diese Bewegung einer elektrischen Ladung entspricht einem Strom und ruft dadurch ein magnetisches Feld hervor. Jedes Elektron besitzt noch eine Eigenrotation, die Spin genannt wird. Beide Effekte zusammen bewirken einen magnetischen Dipol, das Bohrsche Magneton

$$\mu_B = \frac{h \cdot e_0}{4 \cdot \pi \cdot c \cdot m_0} = 9{,}274 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{Am}^2,$$

worin c die Vakuumlichtgeschwindigkeit, h das Plancksche Wirkungsquantum, e_0 die Elementarladung und m_0 die Ruhmasse des Elektrons sind. In den meisten Atomen kompensieren sich die Momente der Atome nach außen gegenseitig, wodurch die meisten Stoffe im Normalfall keinen Magnetismus aufweisen. Vor allem aber beim Fehlen von Elektronen in einer inneren Schale werden die Spinmomente nach außen wirksam und können sich zu makroskopischen Werten verstärken. Sind die Atome noch günstig im Kristallgitter des Festkörpers angeordnet, führt das zu einer weiteren Verstärkung. Ausgeprägte magnetische Eigenschaften besitzen die typisch ferromagnetischen Materialien Eisen, Cobalt und Nickel. Da die Stoffklasse der Ferromagneten eine breite technische Anwendung erfährt, soll ihr magnetisches Verhalten etwas genauer betrachtet werden.

Alle stark magnetischen Materialien bestehen aus einer Vielzahl kleiner Gebiete von 10^6 bis 10^9 Atomen, in denen die Elementarmagnete einheitlich orientiert sind. Diese sogenannten Weißschen Bezirke sind damit spontan magnetisiert, jeder einzelne vom anderen aber durch energetische Wände getrennt. Jeder Bezirk besitzt so seine eigene bevorzugte Achse für die Magnetisierungsrichtung, die durch Störungen im Kristallaufbau und Formanisotropien festgelegt ist. Diese Magnetisierungsrichtungen sind jedoch vielfach im Körper statistisch ausgerichtet. Das erklärt, warum die meisten dieser Stoffe nach außen hin (also pauschal) unmagnetisch sind.

Durch ein äußeres Magnetfeld können drei Effekte zur pauschalen Magnetisierung des Materials führen:

- Durch *Wandverschiebungen* im Material wachsen die spontan günstig magnetisierten Bereiche auf Kosten der anderen.
- Durch *Umklappen* des Magnetisierungsvektors kann Nord- und Südpol in einzelnen Bezirken vertauscht werden.
- Die Richtung der magnetischen Vektoren drehen sich um mehr oder weniger große Winkel stetig in die Richtung des äußeren Feldes (*Drehprozesse*).

Lediglich der letzte Effekt ist voll reversibel. Wenn das äußere Feld entfernt wird, drehen sich die Vektoren wieder in die für den Bezirk typische Vorzugsrichtung zurück. Die beiden anderen Effekte sind weitgehend irreversibel. Dadurch kehrt ein ferromagnetisches Material bei Wegnahme des äußeren Feldes auch nur teilweise in den ursprünglichen magnetischen Zustand zurück.

Mit diesen drei Effekten läßt sich das spezielle Verhalten eines ferromagnetischen Stoffes unter Einwirkung eines äußeren Feldes – die sogenannte Hysterese – in allen wesentlichen Eigenschaften erklären (vgl. dazu auch Abb. 3.3). Dafür müssen noch zwei Größen zur Beschreibung eingeführt werden, die magnetische Feldstärke H und die Magnetisierung M.

Die magnetische Feldstärke charakterisiert das (äußere) magnetische Feld, die Ma-

gnetpole sind seine Quellen und Senken. Seine Feldlinien entspringen am positiven Magnetpol und enden am negativen. Die Magnetisierung gibt hingegen die magnetische Dipoldichte im Stoff an, ist also ein Ausdruck des inneren, durch die Struktur des Materials bestimmten magnetischen Feldes. Der Zusammenhang ist durch die Gleichung $M = (\mu_r - 1)H$ gegeben, wobei μ_r die relative Permeabilität ist (vgl. 3.5.4). Genau genommen sind auch H und M wieder Vektoren, hier soll aber wie bisher nur ihr skalarer Anteil betrachtet werden.

Die Beschreibung der Hysterese beginnt beim nichtmagnetisierten (unmagnetischen) Zustand. Wird ein äußeres magnetisches Feld H angelegt und erhöht, wird die Neukurve durchlaufen. Die Magnetisierung steigt zunächst flach an, wird bis zu einem gewissen Punkt immer steiler um alsbald wieder abzuflachen und schließlich in eine zur H-Achse parallele Gerade überzugehen. Wird von dieser Sättigungsmagnetisierung das äußere Magnetfeld wieder abgesenkt, so fällt die Magnetisierung von der Sättigungsgeraden nur wenig ab, selbst bei völligem Verschwinden des äußeren Feldes bleibt eine deutliche Restmagnetisierung erhalten, die Remanenz M_r. Dieser Wert ist für Dauermagnete sehr groß und man versucht durch entsprechende Einflußnahme auf die Stoffstruktur eine möglichst hohe Remanenz zu erzielen. Vielversprechend sind neue Versuche mit feinkörnigen Dauermagneten.

Kehrt man das äußere Magnetfeld in seiner Richtung um, so kann die Magnetisierung weiter gesenkt werden und bei der Koerzitivfeldstärke H_c wird die pauschale Magnetisierung wieder null. Dieser Wert muß bei Dauermagneten auch möglichst groß sein, damit äußere Felder die magnetische Eigenschaft wenig beeinflussen können.

Der bisher geschilderte Prozeß kann systematisch zu einem geschlossenen Kreisprozeß erweitert werden und liefert die Grenzhysterese als symmetrische Schleife. Der Flächeninhalt dieser geschlossenen Kurve entspricht dem Energieverlust eines Ummagnetisierungszyklusses. Er wird im Magnetmaterial in Wärme umgesetzt. Jeder kennt die sich erwärmenden Netzteile elektrischer Geräte. Die Erwärmung rührt hier hauptsächlich von der ständigen Ummagnetisierung der Transformatorbleche her. Besonders für Materialien, die magnetischen Wechselfeldern ausgesetzt sind, fordert man eine schlanke Hysteresekurve, was kleine Koerzitivfeldstärken bedeutet. Für Dauermagneten ist hingegen eine möglichst rechteckige Hysteresekurve mit einer hohen Remanenz und großer Koerzitivfeldstärke gefordert. Durch entsprechende Auswahl der stofflichen Struktur läßt sich somit ein magnetisches Material vielen Forderungen anpassen.

Neben dem Ferromagnetismus gibt es noch mehrere andere Arten, wie den Dia-, Para-, Antiferro-, Meta- und Superparamagnetismus. Beim Diamagnetismus werden erst durch ein äußeres Feld magnetische Momente induziert. Eine solche Probe wird aus einem inhomogenen magnetischen Feld herausgetrieben. Beispiele für diamagnetische Stoffe sind Gold, Silber, Kupfer und auch Wasser. Beim Paramagnetismus sind die magnetischen Momente statistisch verteilt und werden erst durch das äußere Feld ausgerichtet, eine solche Probe wird in ein inhomogenes Magnetfeld hineingezogen. Beispiele für solche Stoffe sind Aluminium und Sauerstoff. Beide Arten stellen schwachen Magnetismus dar.

Die Abbildung 3.4 zeigt das Verhalten der Neukurven für die wichtigsten Magnetismusarten. Dabei ist die magnetische Feldstärke H mit der magnetischen Induktion B

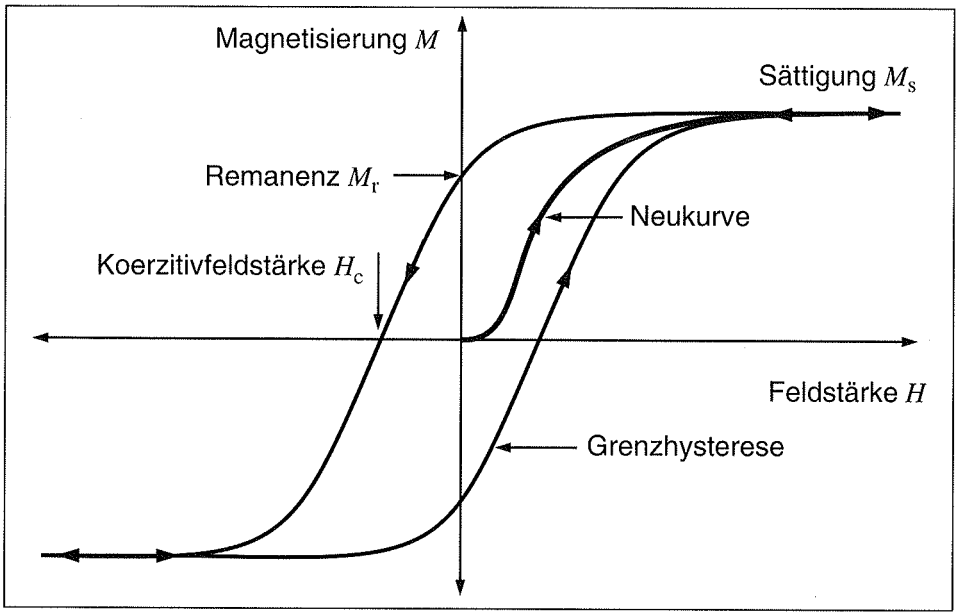


Abb. 3.3
Hysteresekurve

durch die Beziehung $B = \mu_0 \mu_r H$ gegeben. Somit ist die relative Permeabilität ein Unterscheidungsmerkmal für die einzelnen Magnetismusarten:

Diamagnetismus	$\mu_r < 1$
Paramagnetismus	$\mu_r > 1$
Ferromagnetismus	$\mu_r = \mu_r(H); \mu_{r,max} >> 1.$

Ferrimagnetismus (bei Ferriten) und Antiferromagnetismus (bei einigen Teilchen im Magnetband) sind komplizierte Varianten des Ferromagnetismus mit abweichenden Gitterstrukturen und Temperaturverhalten.

Die hier und auch im Abschnitt 3.4 angesprochenen Analogien zwischen Elektrizität und Magnetismus sollen an dieser Stelle zusammenfassend dargestellt werden. Der Analogieschluß erleichtert oftmals das Verständnis bestimmter Phänomene.

Ausgangspunkt ist jeweils die entsprechende Feldstärke, sie ruft als Ursache Änderungen bzw. Wirkungen im jeweiligen Material hervor. Der zwischen Ursache und Wirkung bestehende Gesetzeszusammenhang läßt sich mittels Materialkonstanten beschreiben. Beim stationären Strom ist dies der spezifische Widerstand ρ, in der Elektrostatik die Permittanz bzw. Dielektrizitätskonstante ε und beim Magnetismus die Permeabilität μ. Alle Wirkungsgrößen werden sinnvollerweise auf eine Fläche bezogen. Für die Gesamtwirkung muß dann mit der Fläche multipliziert bzw. über die Fläche integriert werden. Es entstehen dann die neuen Größen elektrischer Strom I,

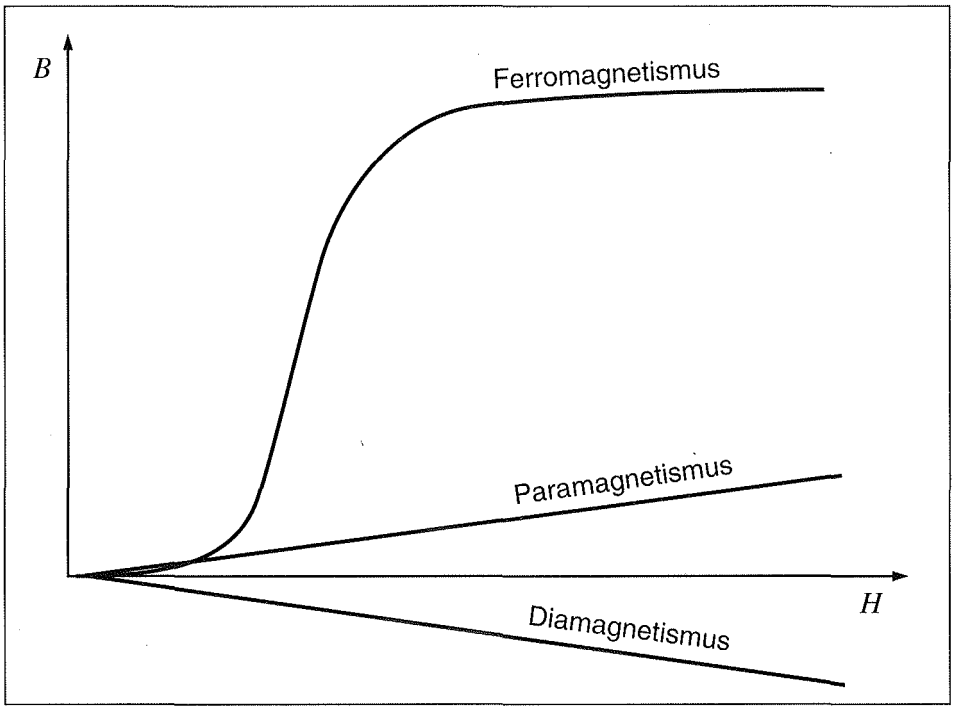


Abb. 3.4
Zusammenhang zwischen magnetischer Induktion und magnetischer Feldstärke für einige Magnetismusarten

elektrische Ladung Q und der magnetische Fluß Φ. In der Tabelle 3.1 sind diese Zusammenhänge verdeutlicht. Beseitigt man die Längennormierung der Ursache wiederum durch Multiplikation bzw. Integration, erhält man die neuen Größen elektrische Spannung U und die magnetische Durchflutung (magnetische Spannung) V. Die Tabelle enthält in eckigen Klammern auch Maßeinheiten für die einzelnen Größen, bei den magnetischen in geschweiften Klammern auch alte Maßeinheiten. Ihr Vorteil liegt gegenüber den SI-Einheiten, die z.T. wie A/m und A nicht eindeutig als magnetische Einheiten erkennbar sind, in dem klaren Bezug zum Magnetismus. Hier wäre es bei Schaffung des SI wohl notwendig gewesen, mindestens spezielle Namen für die einzelnen Einheiten zu verwenden. Nach Meinung einiger Experten ist für den Magnetismus eigentlich eine eigene Basiseinheit erforderlich.

Für einige Anwendungen des Magnetismus sind zwei weitere abgeleitete Kenngrößen erforderlich, die ausdrücken, welchen Einfluß das Material auf die Feldwirkung hat. Das ist einmal die oben schon eingeführte Magnetisierung $M = B/\mu_0 - H$ und die magnetische Polarisation $J = B - \mu_0 H$, die leider nicht immer eindeutig unterschieden werden.

Tabelle 3.1
Analogie elektrischer und magnetischer Größen

	stationärer Strom	Elektrostatik	Magnetismus
Ursache	elektrische Feldstärke E [V/m]	elektrische Feldstärke E [V/m]	magnetische Feldstärke H [A/m] {Oe}
Wirkung	Stromdichte i	elektrische Verschiebung D	magnetische Induktion B
Gesetz	$i = E/\rho$	$D = \varepsilon E$	$B = \mu H$ [T] {G}
Flächenbezug	$I = iA$ (elektrischer Strom)	$Q = DA$ (elektrische Ladung)	$\Phi = BA$ (magnetischer Fluß) [Wb] {Mx}
Längenbezug	$U = El$ (elektrische Spannung)	$U = El$ (elektrische Spannung)	$V = Hl$ (Durchflutung) [A] {Gb}
Bauelement	Draht $R = \rho l/A$	Plattenkondensator $C = \varepsilon A/l$	magnetischer Kreis $P = \mu A/l$
Energie	$E = UIt$	$E = CU^2/2$	$E = LI^2/2$
Energiedichte	$w = iEt/2$	$w = DE/2$	$w = BH/2$
differentielles Gesetz	$I = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$	$I = \mathrm{d}D/\mathrm{d}t$	$U = \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$

Zu den drei unterschiedenen Gebieten der Tabelle existieren jeweils spezifische elektrotechnische Bauelemente. Für charakteristische Anordnungen sind in der Tabelle entsprechende Beziehungen angegeben. Beim stationären Strom wird ein Drahtwiderstand mit dem Querschnitt A und der wesentlich größeren Länge l betrachtet. In der Elektrostatik ist dies ein Plattenkondensator mit den Flächen A und dem dagegen sehr kleinen Abstand l. Für den Magnetismus wird eine Induktivität betrachtet, bei der neben den geometrischen Größen noch das Quadrat der Windungszahl n eingeht. Beim magnetischen Kreis ist die Länge l im Verhältnis zum Querschnitt groß.

Der Vergleich der drei Beziehungen zeigt, daß die geometrischen Größen und die entsprechenden Materialkonstanten unterschiedlich als Zähler bzw. Nenner eingehen. So entspricht z.B. die Größe $P = \mu A/l$ einem magnetischen Leitwert. Er wird bei Eisenkernspulen oft als A_L-Wert bezeichnet. Bei technischen Problemen ermöglicht er ein schnelles Bestimmen der für eine Induktivität notwendigen Windungszahl. Eigentlich ist dieser Anteil das magnetische Bauelement, dieses wird aber erst durch eine Wicklung zu einer anwendbaren Induktivität. Die äquivalente Formel erhält man beim stationären Strom, wenn auch dort der Leitwert anstelle des Widerstands und zusätzlich der spezifische Leitwert $\sigma = 1/\rho$ verwendet wird.

Die Besonderheit der Wicklung einer Induktivität läßt sich auch leicht auf die magnetischen Größen übertragen. Für die Feldstärke gilt dann z.B. $H = In/l$ und für die magnetische Spannung (Durchflutung) $V = In = \Sigma I$. Darauf geht die (technisch übliche) Messung dieser Größe in Amperewindungen (Aw) zurück.

Der letzte Teil der Tabelle weist noch einige weitere Zusammenhänge zwischen den drei Gebieten aus. Hier ist auffällig, daß Elektrostatik und Magnetostatik in ihren Feldern Energie speichern, der stationäre Strom dagegen welche verbraucht, unter der Berücksichtigung der Zeit eigentlich Leistung.

Das Gesamttheoriegebäude des Elektromagnetismus, die Maxwellschen Gleichungen, eröffnen durch den interessanten Zusammenhang

$$1/c^2 = \varepsilon_0 \cdot \mu_0$$

einen Übergang von den Materialkonstanten zur Vakuumlichtgeschwindigkeit c. Damit ist der Zusammenhang der Wellenoptik mit den elektromagnetischen Wellen hergestellt.

Da die Skalen nicht alle magnetischen Größen abdecken, seien hier noch die Definitionen für wichtige SI-Maßeinheiten gegeben.

Ein Weber (1 Wb) ist der magnetische Fluß, der in einer ihn umschlingenden Windung die elektrische Spannung 1 V induziert, wenn er während der Zeit 1 s gleichmäßig auf null abnimmt (1 Wb = 1 Vs).

Benannt nach dem deutschen Physiker Wilhelm Weber (1804–1891).

Ein Ampere (1 A) – genauer 1 (A/m)m – ist die magnetische Spannung zwischen zwei Punkten im Abstand 1 m in Richtung des magnetischen Feldes der Feldstärke 1 A/m.

Zum Schluß seinen noch einige ebenfalls gebräuchliche Maßeinheiten angeführt.

1 Gauß	$= 1\ \mathrm{G} = 1 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{T}$
1 Gilbert	$= 1\ \mathrm{Gb} = 0{,}796\ \mathrm{A}$
1 Maxwell	$= 1\ \mathrm{Mx} = 1 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{Gcm}^2$ (seit 1958 nicht mehr zugelassen)
1 Oersted	$= 1\mathrm{Oe} = 79{,}6\ \mathrm{A/m} = 10^3/(4\pi)\ \mathrm{A/m}$
1 Tesla	$= 1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{Wb/m}^2 = 1\ \mathrm{Vs/m}^2 = 1\ \mathrm{kg/(s}^2\mathrm{A)}$
1 Weber	$= 1\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{Vs} = 1\ \mathrm{kgm}^2/(\mathrm{As}^2)$

1 magnetisches Flußquant $= 2{,}07 \cdot 10^{-15}$ Wb

Der Magnetismus ist einerseits etwas ausführlicher behandelt worden, weil er für viele technische Anwendungen von großer Bedeutung ist. Es sei nur an die von jedem an seinem PC genutzte elektromagnetische Speicherung von Daten erinnert, die auf magnetischer Grundlage erfolgt. Auf der anderen Seite sollte hier auch der Zusammenhang zwischen den in Abschnitt 3.4 behandelten elektrischen Phänomenen mit den magnetischen verdeutlicht werden.

3.5.1 Magnetische Feldstärke in Ampere pro Meter ([magnetische Feldstärke] = A/m)

Betrachtet man das Feld zwischen zwei magnetischen Polen, so läßt sich dieses mittels der magnetischen Feldstärke beschreiben. Ihre Feldlinien beginnen am positiven Magnetpol (Nordpol) und enden im negativen (Südpol). Wir hatten die magnetische Feldstärke als die Ursache der magnetischen Wirkungen festgestellt. Die Maßeinheit der magnetischen Feldstärke ist wie folgt definiert.

Ein Ampere pro Meter (1 A/m) ist die magnetische Feldstärke, die im Vakuum von einem elektrischen Strom der Stärke 1 A durch einen unendlich langen geraden Leiter von kreisförmigem Querschnitt auf dem Rand einer zum Leiterquerschnitt konzentrischen Kreisfläche von 1 m Umfang hervorgerufen wird.

Um der Schwierigkeit des klaren Erkennens als magnetische Größe zu begegnen, war vorgeschlagen worden, diese Einheit Lenz (L) zu benennen, nach dem russischen Physiker Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804–1865), bekannt durch die Lenzsche Regel.

Die Messung der Magnetfeldstärke beruht auf den durch sie hervorgerufenen Effekten. Die mechanischen Magnetometer messen die Auslenkung eines Magneten (Permanent- oder Dauermagnet) durch den Einfluß eines äußeren Feldes. Die Induktionsmethode beruht auf der Tatsache, daß ein äußeres, zeitlich verändertes magnetisches Feld in einer Spule eine Spannung induziert. Man schaltet entweder bei feststehender Spule das zu bestimmende Magnetfeld ein und aus oder man kippt die Spule im zu untersuchenden Feld. Damit kann über die Spannungsmessung auf die Magnetfeldstärke geschlossen werden.

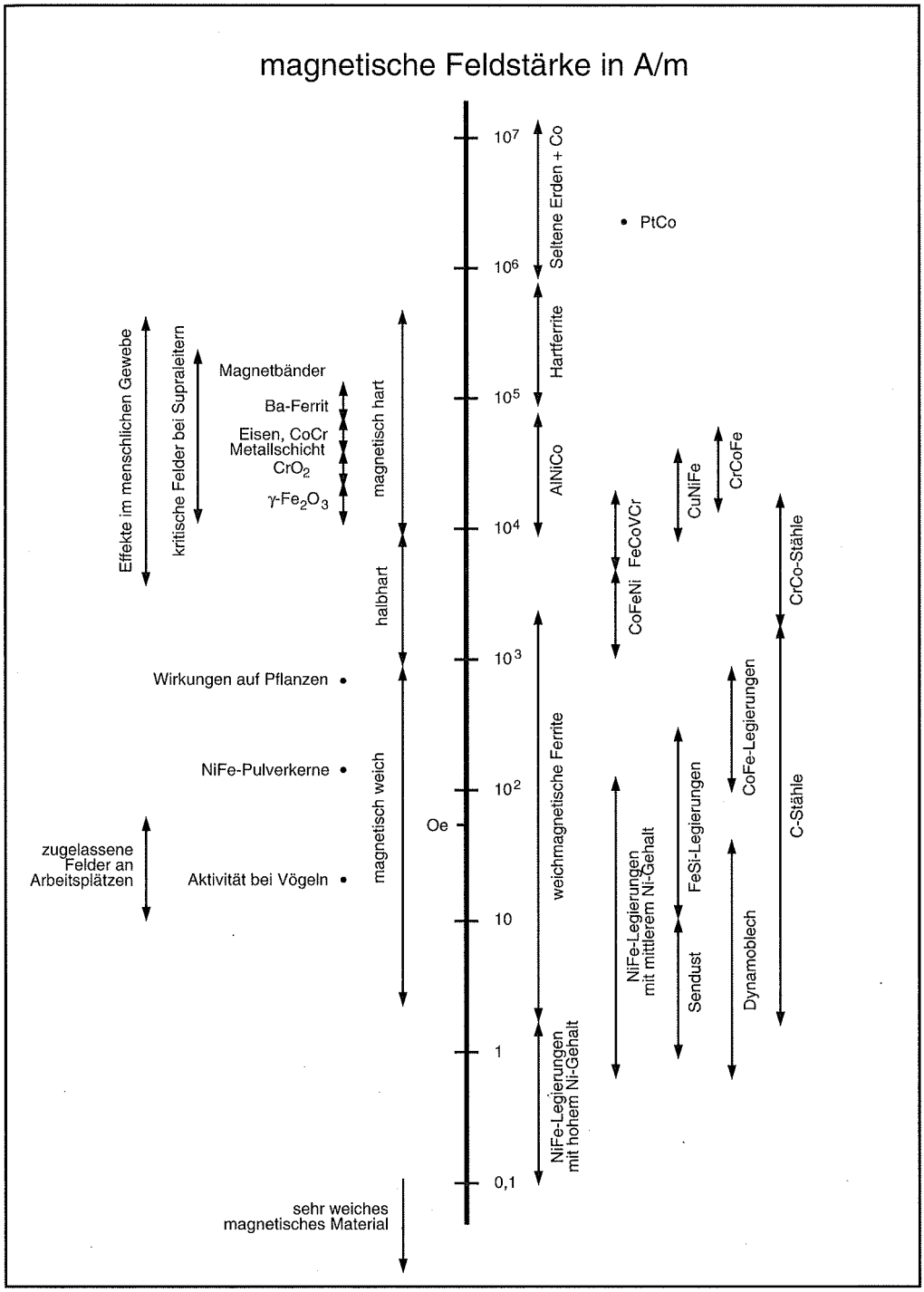
Für die Anwendungen sind zwei Feldstärken wichtig, die Charakteristika der Hysteresekurve sind:

- Die Koerzitivfeldstärke. Sie führt zuvor entgegengesetzt gesättigtes Material zur Magnetisierung null zurück. Ihr Wert ist für jedes Material relativ genau bestimmt.
- Die Sättigungsfeldstärke. Sie erzeugt magnetisch gesättigtes Material. Infolge der geringen Steigung der Hysteresekurve im Sättigungsbereich ist ihr Wert nur grob bestimmbar.

Die Sättigungsfeldstärke wird oft als Vielfaches der Koerzitivfeldstärke angegeben. Der entsprechende Faktor hängt fast nur von der Rechteckigkeit der Grenzhysterese ab. Bei exakt rechteckiger Form ist er 1, bei sehr geneigt verlaufender Kurve sind durchaus Werte von 10 bis 100 (maximal 1000) möglich.

Die Skale enthält für Stoffe vorwiegend Koerzitivfeldstärken. Aufgrund der vielfältigen technischen Anwendungen und der Variabilität von magnetischen Materialien ist hier ein beachtliches Spektrum erreichbar. Nach der Größe der Werte teilt man die Materialien in magnetisch weiche, halbharte und harte ein.

Feldstärkewerte aus anderen Bereichen standen nur in geringem Maße zur Verfügung. So können z.B. Vögel relativ kleine Magnetfelder wahrnehmen. Bekannt sind


magnetische Feldstärke in A/m
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0,1
Oe
Seltene Erden + Co
PtCo
Hartferrite
AlNiCo
CoFeNi FeCoVCr
CuNiFe
CrCoFe
CrCo-Stähle
C-Stähle
CoFe-Legierungen
Dynamoblech
FeSi-Legierungen
Sendust
NiFe-Legierungen mit mittlerem Ni-Gehalt
weichmagnetische Ferrite
NiFe-Legierungen mit hohem Ni-Gehalt
magnetisch hart
halbhart
magnetisch weich
Effekte im menschlichen Gewebe
kritische Felder bei Supraleitern
Magnetbänder
Ba-Ferrit
Eisen, CoCr Metallschicht
CrO_2
γ-Fe_2O_3
Wirkungen auf Pflanzen
NiFe-Pulverkerne
Aktivität bei Vögeln
zugelassene Felder an Arbeitsplätzen
sehr weiches magnetisches Material

auch Effekte bei einigen Bakterienarten, sowie Pflanzen- und Fischarten. Ab wann magnetische Felder nachteilige Einflüsse auf den Menschen bewirken, ist sehr umstritten. So werden bedenkenlos relativ hohe Felder bei einigen Tomographieverfahren eingesetzt. Andererseits gibt es eine Grenzempfehlung bei Monitoren. Zu beachten ist hier genau wie bei den elektrischen Feldern, daß sehr entscheidend ist, ob das Feld statisch oder ein Wechselfeld ist. Bei letzteren hängt der höchste zulässige Wert auch von der Frequenz des Wechselfeldes ab. Die Werte schwanken zwischen 42 A/m (Mittelwert) und 200 A/m (Spitzenwert) bei niederfrequenten Feldern bis zu Spitzenwerten von etwa $3 \cdot 10^{-2} f^{1/2}$ A/m für eine Frequenz von ca. 300 000 MHz[1].

Erinnert sei an die kritische magnetische Feldstärke bei Supraleitern, oberhalb derer sie ihre supraleitende Eigenschaft verlieren (vgl. Abschn. 3.4.2).

Im Vakuum und damit auch in guter Näherung in Luft sind die magnetische Feldstärke und die magnetische Induktion leicht (stoffunabhängig) ineinander umzurechnen. Gemäß

$$B = \mu_0 H \; (\mu_r = 1 \text{ für Vakuum})$$

ergibt sich für die Maßeinheiten

$$1 \text{ T} = \mu_0 \cdot \text{A/m} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ A/m} \approx 1{,}2566 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}.$$

Eine alte Einheit der Feldstärke ist das Oersted, nach dem dänischen Physiker Hans Christian Oersted (1777–1851) benannt.

$$1 \text{ Oe} = 1000/(4\pi) \text{ A/m} \approx 79{,}6 \text{ A/m}.$$

[1] Eine Verordnung der Bundesregierung vom Mai 1996 legt für Deutschland geringere Werte fest

3.5.2 Magnetische Induktion in Tesla ([magnetische Induktion] = T)

Eine weitere wichtige Größe zur Beschreibung des Magnetismus ist die magnetische Induktion. Das magnetische Feld ist mittels Feldlinien beschreibbar (deren Verlauf man auch durch Eisenfeilspäne sichtbar machen kann). Die Gesamtzahl dieser Feldlinien wird durch den magnetischen Fluß Φ beschrieben. Wird der magnetische Fluß auf die senkrecht durchsetzte Fläche A bezogen, so erhält man die magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion B. Da es keine magnetischen Monopole gibt, enthält jede geschlossene Fläche beide Pole und damit gleich viele B-Linien in jede Richtung. Dadurch läßt sich mittels der magnetischen Induktion auch die interne, flächenbezogene magnetische Erregung eines Materials beschreiben. Der Zusammenhang zur magnetischen Feldstärke H wird über die Permeabilität des jeweiligen Materials beschreibbar: $B = \mu_0 \mu_r H$.

Entsprechend der Definition der magnetischen Induktion als flächenbezogener magnetischer Fluß wird auch die Maßeinheit, die nach dem jugoslawischen Physiker Nicola Tesla (1856–1943) benannt ist, im SI definiert.

Ein Tesla (1 T) ist die Dichte eines homogenen magnetischen Flusses von 1 Wb, der eine Fläche von 1 m^2 senkrecht durchsetzt. 1 T = 1 Wb/m^2.

Bei der magnetischen Induktion ist die Betrachtung in den verschiedenen Stoffen von großem Interesse. Berücksichtigt man, daß die in Abbildung 3.3 auf der Senkrechten abgetragene Größe M mit der magnetischen Induktion i. allg. linear in Beziehung zu setzen ist, so muß man auch bei der magnetischen Induktion zwei typische Werte unterscheiden:

- Die *Sättigungsmagnetisierung* repräsentiert den Höchstwert der magnetischen Induktion eines Materials. Hiermit existieren für viele Anwendungen praktische Grenzen. Bei den Magnetköpfen werden hierdurch die nutzbaren hochkoerzitiven Magnetbänder begrenzt.
- Die *magnetische Remanenz* repräsentiert die magnetische Flußdichte, die nach einer Sättigung im Material zurückbleibt. Sie gibt an, wieviel Energie im Material gespeichert verbleibt. Diese Energie ist das Maß für die Leistungsfähigkeit von Magneten, z.B. in Lautsprechern oder Motoren. Hohe Remanenzwerte ermöglichen u.a. eine hohe Speicherdichte. In anderen Fällen, z.B. bei Magnetköpfen, stört selbst die kleinste Remanenz. Sie bewirkt nämlich ein zusätzliches Rauschen. Je nach dem Grad der Annäherung der Hysteresekurve eines Materials an ein Rechteck beträgt die Remanenz das 0,999- bis 0,0001fache der Sättigungsmagnetisierung. Ihre störende Wirkung läßt sich durch Luftspalte im magnetischen Kreis wesentlich reduzieren.

Auf der Skale sind bei den magnetischen Materialien vorrangig die Sättigungsmagnetisierungen aufgetragen. Beachtenswert ist die Tatsache, daß die Werte der technisch erzeugten magnetischen Induktion in der Größenordnung der

biologisch erzeugten bzw. wirksamen liegen. Auffällig sind die extrem großen Werte bei Neutronensternen. Sie entstehen durch gewaltige Elektronenströme. Am unteren Ende macht der Vergleich der Meßgrenze für magnetische Induktionen mittels SQID mit den bei Gehirnfeldern auftretenden Werten deutlich, daß hier noch interessante biologisch/medizinische Erkenntnisse zu erwarten sind.

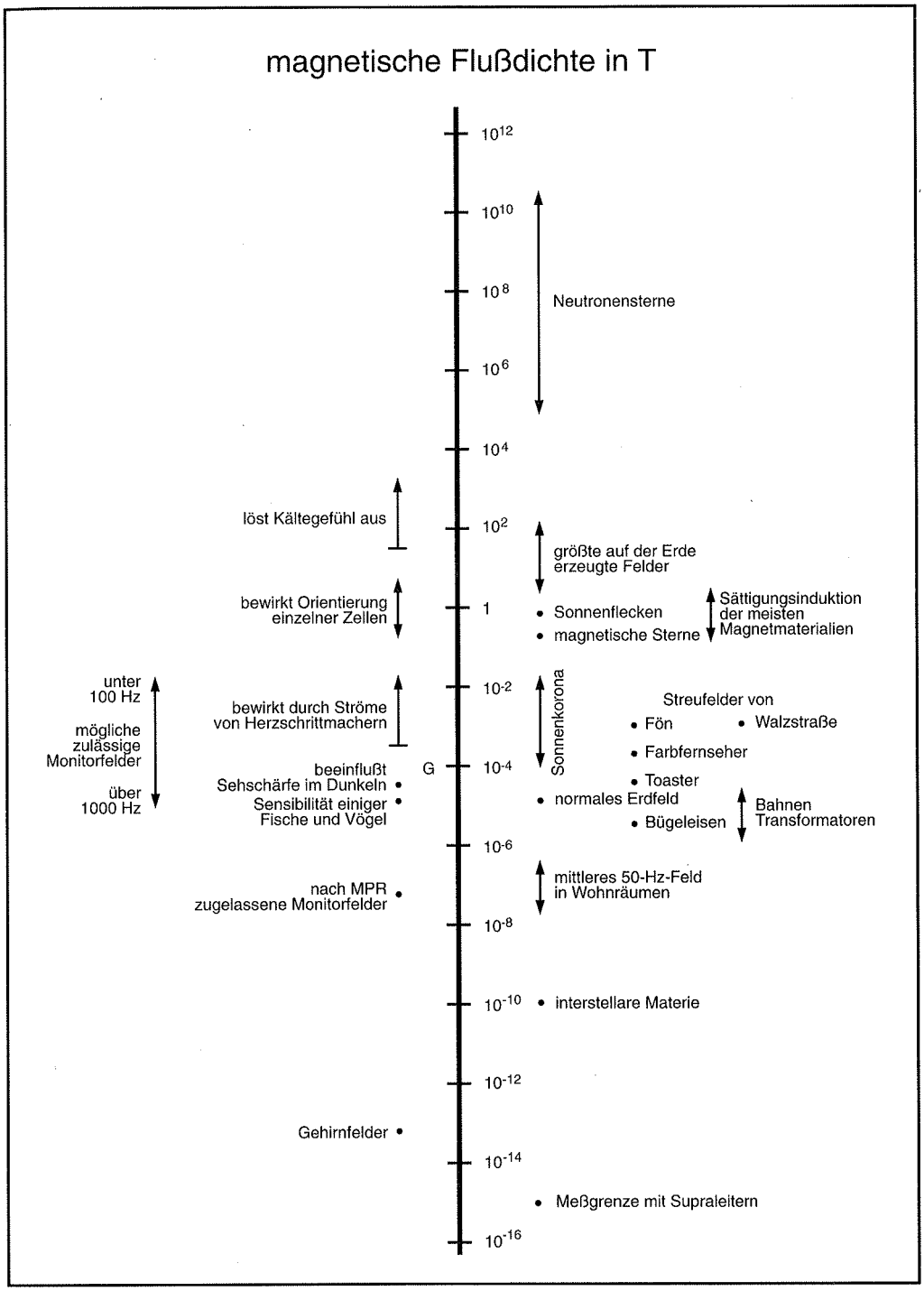
Eine neue USA-Studie eines Komitees des „National Council on Radiation and Measurement" (entspricht der Strahlenschutzkommission) hat gezeigt, daß auch schwache elektromagnetische Felder die menschliche Gesundheit erheblich schädigen können. Eine magnetische Induktion von 0,2 μT (diese sind im Haushalt allgegenwärtig) kann schon gesundheitliche Folgen haben (Krebs, Herzerkrankungen, degenerative Hirnerkrankungen, wie Alzheimer und Parkinson, Auswirkungen auf das Immun- und Fortpflanzungssystem). Aus diesem Grund streben die USA an, in 10 Jahren als Grenzwert für auf Menschen wirkende magnetische Induktionen 0,2 μT zu erreichen. Im Vergleich dazu liegt der entsprechende Grenzwert in Deutschland derzeit bei 400 μT und soll durch die Elektrosmogverordnung auf 100 μT festgelegt werden.

Die Messung der Induktion kann nach mehreren Methoden erfolgen. Die wichtigsten nutzen das Induktionsgesetz aus. Danach wird in einer Spule mit n Windungen beim magnetischen Fluß Φ die Spannung $U = -n \cdot d\Phi/dt$ induziert. Mit der Auflösung nach $\Phi \sim \int U \cdot dt$ und der Definition der magnetischen Induktion als magnetische Flußdichte kann die Bestimmung derselben auf die Messung einer Spannung zurückgeführt werden. Dabei werden ballistische elektrostatische Voltmeter eingesetzt. Ballistisch bedeutet, daß die Zeitkonstante des Voltmeters groß gegenüber der Zeitdauer der Änderung des magnetischen Flusses in der Spule ist (i. allg. durch Herausziehen derselben aus dem Feld bewirkt). Diese Geräte werden Fluxmeter genannt.

Andere Methoden nutzen die Widerstandsänderung von einigen Leitermaterialien durch das Magnetfeld oder den Hall-Effekt (vgl. Absch. 3.4.6).

Es gelten folgende Umrechnungen:

1 Tesla $= 1\ T = 1\ Wb/m^2 = 1\ Vs/m^2 = 1\ kgs^{-2}A^{-1}$
1 Tesla $= 1\ T = \mu_0 \cdot 1\ A/m = 4\pi \cdot 10^{-7}\ A/m \approx 1{,}2566 \cdot 10^{-6}\ A/m$ im Vakuum
1 Gauß $= 1\ G = 1 \cdot 10^{-4}\ T$ (nicht mehr zugelassen)


magnetische Flußdichte in T
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
G
Neutronensterne
größte auf der Erde erzeugte Felder
Sonnenflecken
magnetische Sterne
Sättigungsinduktion der meisten Magnetmaterialien
Sonnenkorona
Streufelder von
Fön
Walzstraße
Farbfernseher
Toaster
normales Erdfeld
Bügeleisen
Bahnen Transformatoren
mittleres 50-Hz-Feld in Wohnräumen
interstellare Materie
Meßgrenze mit Supraleitern
löst Kältegefühl aus
bewirkt Orientierung einzelner Zellen
bewirkt durch Ströme von Herzschrittmachern
beeinflußt Sehschärfe im Dunkeln
Sensibilität einiger Fische und Vögel
nach MPR zugelassene Monitorfelder
Gehirnfelder
unter 100 Hz
mögliche zulässige Monitorfelder
über 1000 Hz

3.5.3 Induktivität in Henry ([Induktivität] = H)

Wird ein elektrischer Leiter von einem Strom durchflossen, so bildet sich um ihn herum ein Magnetfeld aus, das sich entsprechend dem Biot-Savartschen Gesetz mittels der magnetischen Induktion beschreiben läßt. Gemäß dem Induktionsgesetz induziert diese magnetische Induktion in einem anderen Leiter einen magnetischen Fluß. Dieser dort induzierte magnetische Fluß ist der elektrischen Stromstärke des im ersten Leiter fließenden Stroms und einer Größe L direkt proportional. Diese Größe L heißt Induktivität und ist nur von der Leitergeometrie und den vorhandenen Stoffen, die durch die relative Permeabilität charakterisiert werden, abhängig. Betrachtet man den magnetischen Fluß, der durch den elektrischen Strom im durchflossenen Leiter induziert wird, spricht man von Selbstinduktivität.

Diese Selbstinduktivität ist eine wichtige Eigenschaft, die in elektrischen und elektronischen Bauelementen – Induktivitäten – ausgenutzt wird. Sie sind im Gegensatz zu den Widerständen und Kondensatoren jedoch meist keine fertigen Bauelemente. Die meisten Hersteller dieser Bauelemente gehen von genormten magnetischen Kreisen – Eisenkernpaketen, Ferritkernen, Wickelkörpern – aus, mittels derer die erforderliche Induktivität durch Aufbringen von Leiterwicklungen entsteht. Die Windungszahl bestimmt dann letztlich den Wert der Induktivität.

Mittels des schon eingeführten magnetischen Leitwertes A_L

$$P = \mu_r A/l = A_L$$

ergibt sich die Induktivität eines magnetischen Kreises mit der Windungszahl n zu

$$L = n^2 A_L = n^2 \mu_r A/l \,.$$

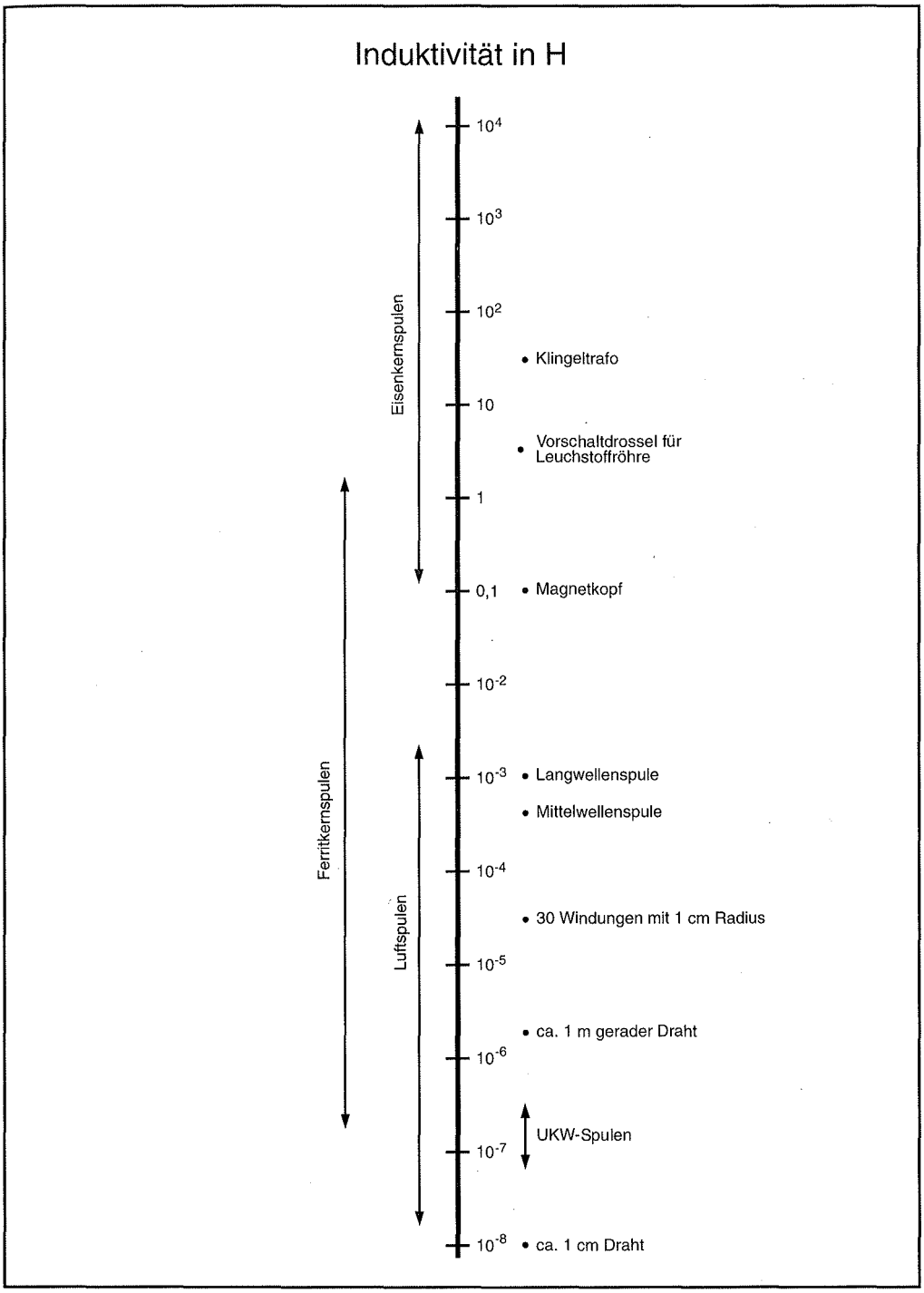
Entsprechend ist auch die nach dem nordamerikanischen Physiker Joseph Henry (1797 bis 1878) benannte SI-Einheit der Induktivität definiert.

Ein Henry (1 H) ist die Induktivität einer geschlossenen Windung, die, von einem elektrischen Strom der Stärke 1 A durchflossen, im leeren Raum den magnetischen Fluß 1 Wb umschlingt (1 H = 1 Wb/A).

Wird eine Induktivität (Spule) von einem sich ändernden magnetischen Fluß Φ durchsetzt, so entsteht an ihren Enden die Spannung $U = -n \cdot \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ (s. a. Abschn. 3.5.2). Wird nun umgekehrt der Spule eine Stromänderung aufgezwungen, dann wirkt das zugehörige Feld auf den Spulenstrom I zurück und es entsteht an den Enden der Spule die Spannung

$$U = -L \cdot \mathrm{d}I/\mathrm{d}t.$$

Dieser Wert ist meist groß gegenüber dem ohmschen Widerstand (Gleichstromwiderstand) der Wicklung. Diese Erscheinung wird vor allem bei Wechselstrom bedeutsam, da der Spule durch den Wechsel der Stromrichtung eine Stromänderung


Induktivität in H
10^4
10^3
10^2
Klingeltrafo
10
Vorschaltdrossel für Leuchstoffröhre
1
0,1
Magnetkopf
10^{-2}
10^{-3}
Langwellenspule
Mittelwellenspule
10^{-4}
30 Windungen mit 1 cm Radius
10^{-5}
ca. 1 m gerader Draht
10^{-6}
UKW-Spulen
10^{-7}
10^{-8}
ca. 1 cm Draht
Eisenkernspulen
Ferritkernspulen
Luftspulen

aufgezwungen wurde. Dies geschieht mit der Frequenz des Wechselstromes. Daher hat eine Induktivität für Wechselstrom zusätzlich noch einen induktiven Widerstand

$$R_L = \omega L,$$

wobei ω die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ des Wechselstromes der Frequenz f ist.

Für die Messung von Induktivitäten wendet man einerseits die mögliche Rückführung auf eine Spannungs-, Widerstands- oder Frequenzmessung an. Dies sind sogenannte absolute Induktivitätsmessungen. Die andere Möglichkeit ist die des Vergleichs, z.B. mittels Brückenschaltungen. Die relative Meßunsicherheit beträgt 10^{-5}.

Zu den Induktivitäten im weiteren Sinne gehören auch die Transformatoren. Soweit sie ohne wesentliche Sekundärbelastung betrieben werden, überwiegt deutlich ihre induktive Komponente. Die Kopplung zwischen der Primär- und der Sekundärwicklung wird durch den Begriff der Gegeninduktivität beschrieben. Sie entspricht dem eingangs geschilderten Fall der Induktion eines magnetisches Flusses in einem zweiten Leiter. Dieser magnetische Fluß erzeugt seinerseits wieder einen Stromfluß in diesem Leiter.

Ursprünglich war die Einheit Henry als 10^9 Einheiten des elektromagnetischen cgs-System definiert (1 H entspricht 10^9 cm), d.h., man gab die Induktivität in cm an.

3.5.4 Relative magnetische Permeabilität

Zur Beschreibung des Verhaltens der einzelnen Stoffe im Magnetfeld dient die relative magnetische Permeabilität. Sie ist wie der spezifische elektrische Widerstand oder die relative Dielektrizitätskonstante ein typischer Materialwert.

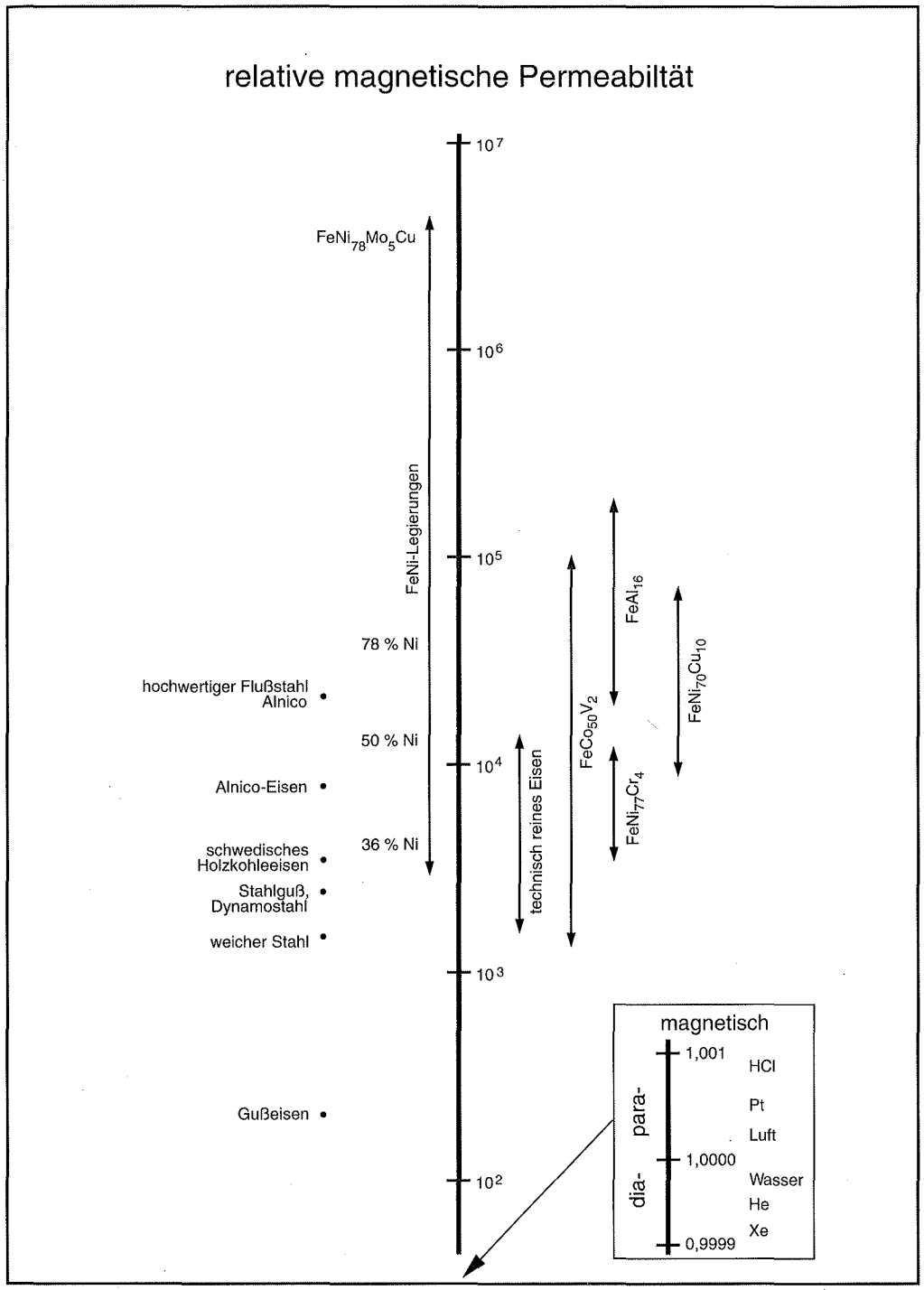
Die magnetische Permeabilität vermittelt den Zusammenhang zwischen dem magnetischen Feld und der magnetischen Induktion über die Beziehung

$$B = \mu_0 \mu_r H.$$

Dabei ist μ_0 die absolute Permeabilität des Vakuums (Feldkonstante, Induktionskonstante)

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\ \text{H/m} \approx 1{,}2566 \cdot 10^{-6}\ \text{H/m}.$$

Die relative Permeabilität μ_r ist dann ein reiner Zahlenwert als Materialeigenschaft, der für das Vakuum definitionsgemäß den Wert 1 erhält. Wie in der Einführung zum Magnetismus schon erwähnt, ist μ_r für Ferromagnetismus eine Funktion der magnetischen Feldstärke. Das führt wie bei der Hysterese zur Unterscheidung mehrerer Varianten der Permeabilität. Die Abbildung 3.5 zeigt im funktionellen Zusammenhang $B = f(H)$ diese Arten:


relative magnetische Permeabiltät
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
$FeNi_{78}Mo_5Cu$
FeNi-Legierungen
78 % Ni
50 % Ni
36 % Ni
hochwertiger Flußstahl
Alnico
Alnico-Eisen
schwedisches Holzkohleeisen
Stahlguß, Dynamostahl
weicher Stahl
Gußeisen
technisch reines Eisen
$FeCo_{50}V_2$
$FeAl_{16}$
$FeNi_{77}Cr_4$
$FeNi_{70}Cu_{10}$
magnetisch
dia-
para-
1,001
1,0000
0,9999
HCl
Pt
Luft
Wasser
He
Xe

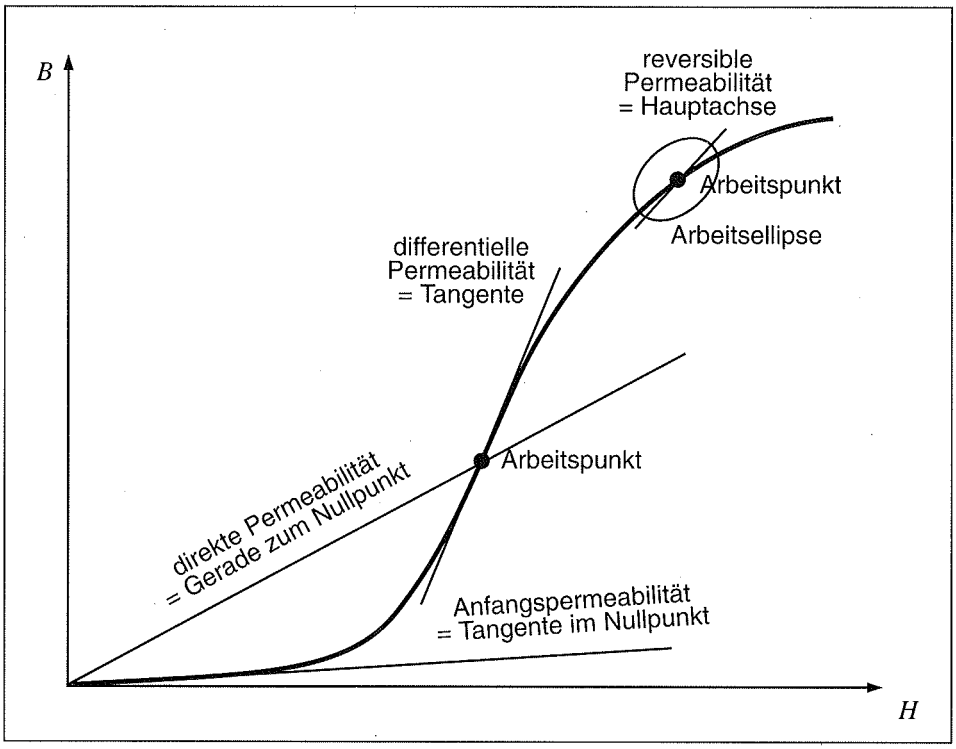


Abb. 3.5
Verschiedene Permeabilitätsvarianten aufgrund des Funktionsverlaufs für $B = \mu H$

- Direkte Permeabilität als Verhältnis B/H im jeweiligen Arbeitspunkt.
- Differentielle Permeabilität als $\mathrm{d}B/\mathrm{d}H$ (Tangente) im Arbeitspunkt.
- Reversible Permeabilität; zu ihrer Bestimmung müssen um den Arbeitspunkt kleine Änderungen, z.B. durch eine überlagerte Wechselspannung erfolgen. Dann wird eine Ellipse durchlaufen, bei der die Neigung der großen Halbachse den Wert für die Permeabilität ergibt.
- Die Anfangspermeabilität ist die Steigung der Magnetisierungskurve im Ursprung. Hier ist $B/H = \mathrm{d}B/\mathrm{d}H$.

Die maximale Permeabilität ist der größtmögliche Wert für ein Material. Die Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft die funktionelle Abhängigkeit $\mu_r = f(H)$ für die Neukurve (vgl. Abb. 3.3). Besonders groß ist der Wert für μ_r meist in der Nähe der Koerzitivfeldstärke.

Infolge der funktionellen Abhängigkeiten der relativen Permeabilität sind in der Skale nur grobe Richtwerte angegeben. Für viele Anwendungen werden vorwiegend hochpermeable Materialien benötigt.

Die Skale macht auch nochmals auf die Unterschiede von μ_r für Para- und Diamagnetismus aufmerksam. Für diese beiden Fälle liegt μ_r jeweils nahe bei 1, nur ist es

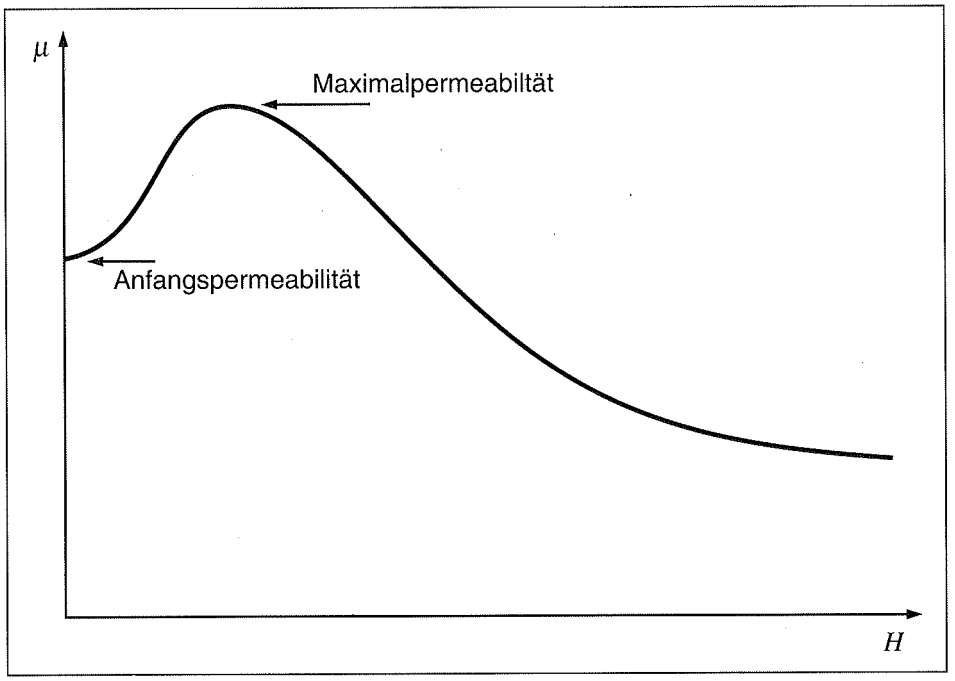


Abb. 3.6
Funktionsverlauf für $\mu = f(H)$

entweder kleiner (Diamagnetismus) oder größer (Paramagnetismus) als der Wert für das Vakuum ($\mu_r = 1$).

Die meßtechnische Bestimmung der relativen Permeabilität erfolgt durch Untersuchung des Verhaltens des entsprechenden Materials im Magnetfeld. Das kann einerseits durch die Bestimmung der Kraftwirkung auf eine in ein bekanntes Magnetfeld gebrachte Materialprobe geschehen. Auch die Messung der Veränderung der Induktivität einer Meßspule bekannter Geometrie und Windungszahl in Abhängigkeit des in sie hineingebrachten Materials wird zur Bestimmung von μ_r genutzt.

3.6 Stoffmenge in Mol ([Stoffmenge] = mol)

Die Untersuchungen der Naturwissenschaften drangen seit Beginn des 20. Jahrhunderts zunehmend bis zu den Grundlagen der stofflichen Zusammensetzung der makroskopischen Körper vor. Viele phänomenologisch beschriebene Eigenschaften der Stoffe konnten so auf der Basis ihres Verhaltens auf der Ebene der Atome bzw. Moleküle eine Erklärung finden (vgl. z.B. die Ausführungen zum Magnetismus). Diese zunehmende Bedeutung der Molekülphysik und mit ihr einhergehend der physikalischen Chemie machte eine Einigung über ein geeignetes Maß zur Angabe der eingesetzten Stoffe notwendig.

Die Chemie hat nach der Entdeckung ihrer fundamentalen Gesetze der Stoffumwandlungen und der Molekülbildungen zur genauen Angabe von Mengen verschiedener Elemente oder Verbindungen solche Einheiten verwendet, die eigentlich individuelle Masseneinheiten waren. Sie trugen Bezeichnungen wie „Grammatom", „Grammolekül" und auch „Mol". Ein Grammatom eines Elementes war sein „Atomgewicht" (jetzt richtiger relative Atommasse genannt) in Gramm. Die relative Atommasse des Elementes X ist heute definiert zu

$$A_r(\mathrm{X}) = \frac{12 m_a(\mathrm{X})}{m_a(^{12}\mathrm{C})} .$$

Sie ist damit auf das Kohlenstoffisotop ^{12}C bezogen.

Ursprünglich war die relative Atommasse auf das leichteste Isotop, das Wasserstoffisotop ^{1}H bezogen, dem die relative Atommasse 1 zugeordnet wurde. Aus praktisch chemischen Gründen wurde dann später das Atomgewicht des Sauerstoffs als Bezugsgröße gewählt, das auf den Wert 16 festgesetzt wurde (dieser Wert ergab sich in etwa für Sauerstoff bei Verwendung von ^{1}H). Die Physik stellte dann fest, daß der Wert 16 nur dem Sauerstoffisotop ^{16}O zukommt, die Chemie nutzte den Wert aber weiterhin für das natürliche Element, das eine Mischung aus den Isotopen ^{16}O, ^{17}O und ^{18}O darstellt. Im Jahre 1960 kam man dann überein, dem Kohlenstoffisotop ^{12}C den Wert 12 zuzuordnen und dieses Isotop als Vergleichsgröße zu verwenden. Dies ist aufgrund des vielfältigen Vorkommens von Kohlenstoff vor allem auch in organischen chemischen Verbindungen eine sehr praktikable Festlegung.

Es erwies sich bei den weiteren Betrachtungen als zweckmäßig, eine neu einzuführende Größe Stoffmenge zur Verfügung zu haben, mit der die Anzahl gleichartiger Objekte (Atome, Moleküle – diese sind die identischen Objekte eines Stoffes) in einem System erfaßt werden kann. Aufgrund der atomistischen Struktur der Materie läuft nämlich bei chemischen Reaktionen eine Wechselwirkung zwischen einzelnen Atomen bzw. Molekülen als Elementarakt ab. Chemische Umsetzungen müssen immer auf eine bestimmte Anzahl von Objekten (eine bestimmte Stoffmenge) bezogen werden, die Chemiker wollen mit abzählbaren Vergleichsmengen rechnen.

Da sowohl die früher betrachtete Masse wie auch die Anzahl der Teilchen allein nur spezielle Eigenschaften einer Stoffmenge sind, wurde 1957 von der IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) beschlossen, die Stoffmenge (oder

Teilchenmenge, im Englischen *amount of substance*) als neue Grundgrößenart einzuführen und die Einheit dafür Mol zu nennen. Aufgrund einer Empfehlung des CIPM aus dem Jahre 1967 wurde dann 1971 von der 14. CGPM das Mol in das SI übernommen.

Ein Mol (1 mol) ist die Stoffmenge eines System, das so viel Objekte enthält, wie Atome in 0,012 kg des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind.

Hierbei ist zu beachten, daß bei der Verwendung des Mol immer mit angegeben werden muß, welcher Art die Objekte sind. Es können Atome, Moleküle, Ionen, spezielle Elementarteilchen oder Gruppierungen solcher Teilchen sein. Es gibt also nicht die Angabe 12 mol, sondern es muß z.B. heißen 12 mol Eisen.

Es ergeben sich dann daraus entsprechende Einheiten für wichtige Größen in der Molekularphysik bzw. physikalischen Chemie, die hier nur aufgezählt seien:

molare Masse (stoffmengenbezogene Masse)	kg/mol;
molares Volumen	m^3/mol;
Molarität (Stoffmengenkonzentration)	mol/m^3.

In der Praxis kann man weder die Masse $m(^{12}C)$ eines Kohlenstoffatoms 12 noch die Masse $m(X)$ eines Atoms X genau messen. Aus diesem Grund verwendet man zur Berechnung der molaren Masse des Elementes X das Verhältnis $m(X)/m(^{12}C)$, welches mit Massenspektrometern sehr genau bestimmbar ist.

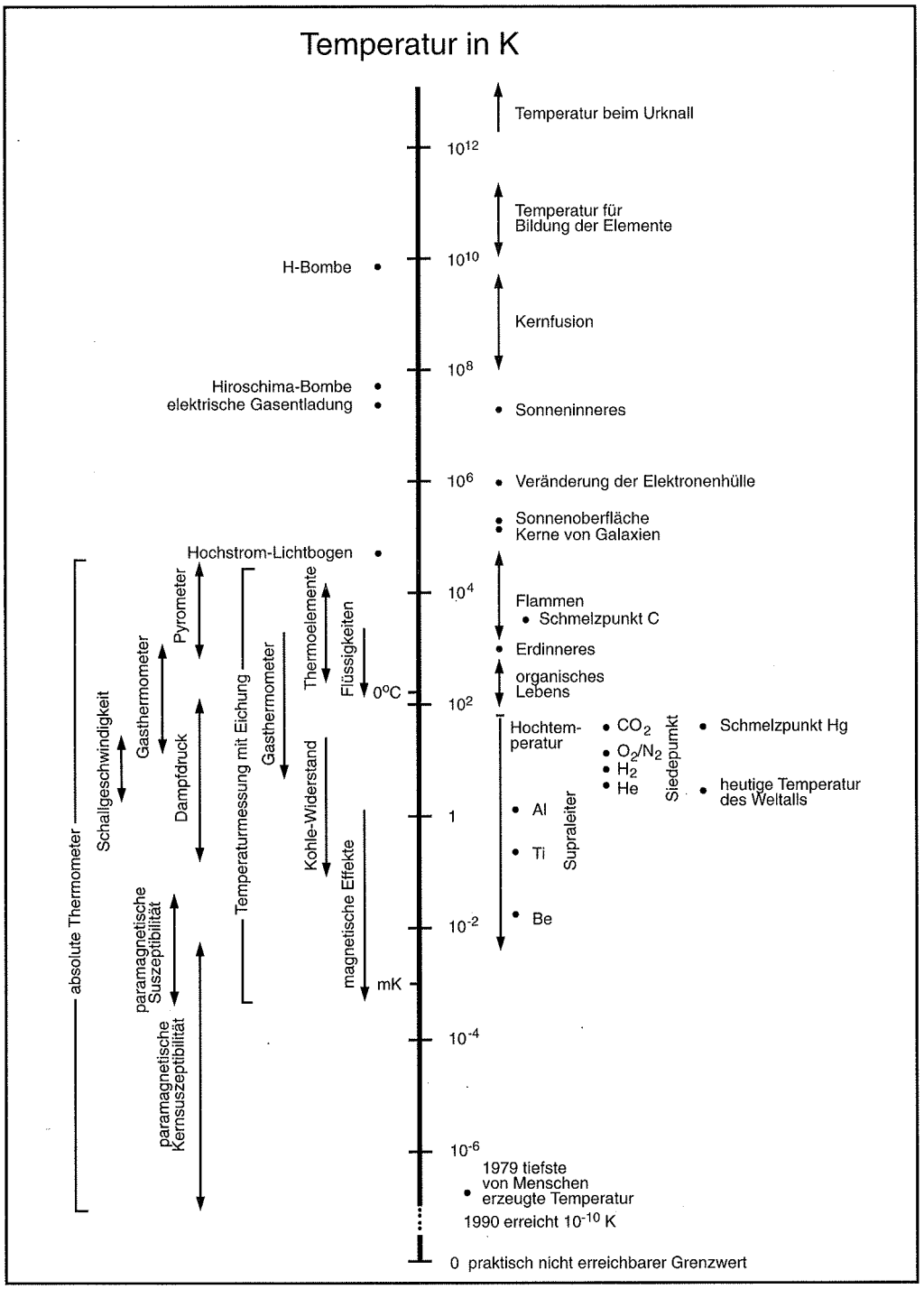
Da Stoffmengen immer spezifisch sind und es dann nur Vergleichswerte für den Umsatz bei bestimmten Prozessen gibt, konnte im Sinne der hier angegebenen Skalen für die Stoffmenge keine Skale erstellt werden.

3.7 Temperatur in Kelvin ([Temperatur] = K)

Das Empfinden von warm und kalt ist jedem Menschen geläufig. Schon der Säugling sucht den Hautkontakt mit der Mutter u.a. auch, weil er die Körperwärme braucht. Die Wärme ist für die Aufrechterhaltung unserer Lebensfunktionen entscheidend. Unser Körper hat auch bestimmte Mechanismen entwickelt, um Differenzen zwischen unserer Körperwärme und der Außenwelt auszugleichen. Wenn die Außenwelt zu warm ist schwitzen wir, weil die Verdunstung des Schweißes unserer Oberfläche Wärme entzieht. Ist es zu kalt, dann zittern wir buchstäblich am ganzen Körper, weil diese Bewegung Wärme erzeugt. Im Laufe der zivilisatorischen Entwicklung hat die Menschheit verschiedene Hilfsmittel entwickelt, um die natürlichen Unterschiede der Außenweltwärme auszugleichen und somit große Teile der Erde bewohnen zu können. Das beginnt mit der Nutzung natürlicher Höhlen, der Wärme des Feuers, geht über den Bau von Wohnstätten (man vergleiche die Anpassung der Architektur an die klimatischen Verhältnisse) bis zu den heutigen zivilisatorischen Errungenschaften wie Zentralheizung, Klimaanlage, Kleidung für jedes Wetter usw.

Bei genauerem Beobachten stellen wir aber fest, daß unser Empfinden für warm und kalt trügerisch sein kann. Dieses Empfinden basiert auf dem Vergleich mit der Wärme unseres Empfindungsorgans, der Haut. Damit gehen einmal weitere situationsbedingte Umstände mit ein, wie Beschaffenheit des Materials (Unterschiede bei Metall, Holz und Wolle) und äußere Umstände (Windstärke, Luftfeuchtigkeit) u.ä. In Nordamerika existiert der Chill-Faktor, der die Windgeschwindigkeit und die relative Feuchte berücksichtigt, damit aus der (objektiven) Temperatur die subjektiv notwendige Bekleidung abgeleitet werden kann. Auch die Situation der Haut ist entscheidend. Ist die Hand sehr warm, empfindet sie einen Körper als kalt, den eine andere Hand als warm empfindet (genauer wäre „sie empfindet ihn als kälter, während die andere Hand ihn als wärmer empfindet" – unser Empfinden ist relativ). Aber auch unsere Rezeptoren können uns einen Streich spielen. Ist nämlich der Unterschied zu groß, können die Rezeptoren keine Differenzierung mehr vornehmen. Bekannt ist der Versuch, bei dem man beide Hände in eine Schüssel mit lauwarmem Wasser hält und dann anschließend eine in eine Schüssel mit heißem und die andere in eine Schüssel mit eiskaltem Wasser. Wir sind nicht in der Lage, zu sagen, welche Schüssel das kalte und welche das heiße Wasser enthält, wir spüren nur einen starken Reiz. Erst wenn sich die Hand ein wenig an die Wärme des jeweiligen Wassers gewöhnt hat, sind wir in der Lage, die gewünschte Unterscheidung zu treffen.

Unsere Sinnesorgane sind also ein sehr unzuverlässiges „Meßgerät" für das Phänomen Wärme (Kälte ist weniger Wärme). Die Wärmelehre als der Bereich der Physik, der sich mit diesen Phänomenen befaßt, hat es mit noch einer weiteren Schwierigkeit zu tun. Wärme kann nicht stofflich isoliert werden, was ihre Meßbarkeit erschwert. Lange Zeit hielten sich Wärmestofftheorien und Bewegungstheorien (Wärme ist das Ergebnis der unmerklichen Bewegung von Molekülen) die Waage. Erst mit der Entwicklung im 18. Jahrhundert begann die systematische quantitative Untersuchung. Sie stützte sich auf zwei Entwicklungen, den Bau von Thermometern in der ersten Hälfte des 18. Jh. und der Herausbildung der experimentellen Kalorimetrie zwischen 1750


Temperatur in K
Temperatur beim Urknall
10^{12}
Temperatur für Bildung der Elemente
H-Bombe
10^{10}
Kernfusion
10^{8}
Hiroschima-Bombe
elektrische Gasentladung
Sonneninneres
10^{6}
Veränderung der Elektronenhülle
Sonnenoberfläche
Kerne von Galaxien
Hochstrom-Lichtbogen
10^{4}
Flammen
Schmelzpunkt C
Erdinneres
organisches Lebens
10^{2}
0°C
Hochtem-peratur
CO_2
O_2/N_2
H_2
He
Siedepunkt
Schmelzpunkt Hg
heutige Temperatur des Weltalls
Al
Ti
Be
Supraleiter
1
10^{-2}
mK
10^{-4}
10^{-6}
1979 tiefste von Menschen erzeugte Temperatur
1990 erreicht 10^{-10} K
0 praktisch nicht erreichbarer Grenzwert
absolute Thermometer
Schallgeschwindigkeit
Gasthermometer
Pyrometer
Dampfdruck
paramagnetische Suszeptibilität
paramagnetische Kernsuszeptibilität
Temperaturmessung mit Eichung
Gasthermometer
Thermoelemente
Flüssigkeiten
Kohle-Widerstand
magnetische Effekte

und 1780. Diese beiden Entwicklungsstränge forderten auch die begriffliche Unterscheidung zwischen Temperatur und Wärmemenge, die bis dahin noch recht unsauber vermischt wurden.

Die Temperatur gibt eine bestimmte Zustandseigenschaft des betrachteten Systems an. Sie ist nicht von der Vorgeschichte abhängig und auch nicht davon, wie groß man den betrachteten Teil des Systems wählt. Man spricht in der Physik dann von intensiven Größen. Kann zwei Systemen die gleiche Temperatur zugeordnet werden, dann befinden sie sich bezüglich der Wärme im selben Zustand. Ist die Temperatur unterschiedlich und die beiden System kommen in Kontakt, so wissen wir aus Erfahrung, daß das System mit der höheren Temperatur sich abkühlt, bis sich das mit der niederen soweit erwärmt hat, daß beide Systeme die gleiche Temperatur haben. Dieser Ausgleich geschieht dadurch, daß zwischen beiden Systemen eine bestimmte Menge Wärme ausgetauscht wird. Die Wärme ist also eine Energieform im Übergang, im Fluß von einem System zum anderen. Es hat keinen Sinn, von der Wärme eines System zu sprechen, sie ist damit keine Zustandsgröße. Es ist noch darauf hinzuweisen, daß die Menge der ausgetauschten Wärme von der Art des Weges abhängt, es ist durchaus unterschiedlich, ob man dabei das Volumen oder den Druck konstant hält. Die Temperatur ist also die Größe zur Charakterisierung des Systemzustandes und die Wärmemenge ist ein Maß für den Energieaustausch zwischen Systemen aufgrund von existierenden Temperaturunterschieden.

Im Jahre 1967 wurde für die Temperatur das Kelvin (benannt nach dem englischen Physiker Lord Kelvin [eigentlich William Thomson], 1824–1907) als Basiseinheit in das SI aufgenommen.

Ein Kelvin (1 K) ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.

Das Kelvin ist auch gleichzeitig die Einheit für die Temperaturdifferenz. Der Tripelpunkt eines jeden Stoffes und damit auch des chemisch reinen Wassers ist so definiert, daß nur bei dieser Temperatur und bei einem zugehörigen Druck gleichzeitig die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig existieren. Der Tripelpunkt mit 0 °C stimmt in guter Näherung mit dem üblichen, allerdings druck- und reinheitsabhängigen Gefrierpunkt des Wassers überein. Die Bestimmung des Tripelpunktes ist mit einem relativen Fehler kleiner als 10^{-6} bzw. einem absoluten von 0,2 K möglich. Der Zahlenwert 273,16 in der Definition sichert den Anschluß an die vorher gültige und im täglichen Leben noch weit verbreitete Celsius-Temperatur. Die Differenz aus einer Temperatur und der Temperatur $T_0 = 273{,}16\ \mathrm{K}$ wird als Celsius-Temperatur ϑ bezeichnet:

$$\vartheta = T - T_0.$$

Die Maßeinheit für ϑ ist das °C (Grad Celsius), die Einheit der Differenzen bei der Celsius-Temperatur ist Grad (grd). Damit kann es in der Celsius-Skala sowohl positive wie negative Temperaturwerte geben, während die thermodynamische Temperatur immer positive Werte hat, $T = 0$ wird absoluter Nullpunkt der Temperatur genannt.

Die Entwicklung der Temperaturmeßgeräte ging von der Erfahrung aus, daß sich bestimmte Eigenschaften von Stoffen bei Wärmezufuhr gesetzmäßig ändern. So kannte bereits Heron von Alexandria (um 120 v.Chr.) ein auf der Ausdehnung von Luft beruhendes Thermoskop. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts soll der Großherzog Ferdinand II. von Toskana die Fertigung eines Flüssigkeitsthermometers mit Alkohol veranlaßt haben. Der Durchbruch gelang dem in Amsterdam wirkenden Mechaniker Fahrenheit (1686–1736), der auf der Basis einer Quecksilberfüllung etwa zwischen 1710 und 1720 erste übereinstimmende Thermometer mit hoher Präzision anfertigte. Seine Skale basierte auf zwei Fixpunkten, dem Schmelzpunkt des Eises (den er mit 32 °F festlegte) und der Wärme des gesunden menschlichen Körpers („blutwarm"), wodurch sich für den Siedepunkt des Wassers 212 °F ergaben. Unabhängig davon entwickelte der französische Naturforscher de Réaumur (1683–1757) um 1730 seine Thermometerskale, die in die später ebenfalls weit verbreitete Skale mit dem Eispunkt des Wassers bei 0 °R und dem Siedepunkt bei 80 °R überging. Auf der Basis dieser Erkenntnisse schuf der schwedische Astronom Celsius (1701–1744) 1740/41 eine in 100 Teile geteilte Temperaturskala, wobei dem Siedepunkt des Wassers eine Temperatur von 0 Grad und dem Eispunkt eine von 100 Grad entsprach. Diese Skala wurde 1745 von Linné (1707–1778) umgedreht und dieses sogenannte „Schwedische Thermometer" war auch in Frankreich weit verbreitet und wurde 1794 in das metrische System aufgenommen. Es hat bis heute in vielen praktischen Fragen seine Bedeutung behalten, weil die Einteilung zwischen 0 °C für den Eispunkt und 100 °C für den Siedepunkt so gewählt ist, daß für die meisten praktischen Fragen handhabbare Meßwerte entstehen.

Da die Temperatur letztlich ein Maß für einen Energiezustand eines Systems ist und auch aus der kinetischen Gastheorie (die die mikroskopische Erklärung der Effekte der Wärmelehre liefert) eine Proportionalität zwischen der Temperatur und der mittleren kinetischen Energie der Teilchen folgt, gibt es Auffassungen, die Temperatur als abgeleitete Größenart zu behandeln. Für ein übliches Molekül mit drei Freiheitsgraden gilt

$E = \frac{3}{2} kT$, wobei $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante ist. Durch einfaches Umstellen kann man dann die Temperatur aus der kinetischen Energie ableiten. Diesen Überlegungen entgegen stehen aber solche, die darauf hinweisen, daß die Temperatur eine Qualitätsgröße und die Energie eine Quantitätsgröße sei.

Neben der theoretisch festgelegten thermodynamischen Temperaturskala gibt es eine praktische. Sie dient vor allem zur einfachen Eichung von Thermometern. Für sie existieren zur Zeit 17 definierte Fixpunkte (sie wurden relativ häufig ergänzt bzw. verändert). Beispiele für die Gewinnung solcher Reproduktionsfixpunkte in unterschiedlichen Temperaturbereichen sind:

- Tripelpunkt des Wasserstoffs bei 13,8033 K;
- Tripelpunkt des Neons bei 24,5561 K;
- Tripelpunkt des Argons bei 83,8058 K;
- Tripelpunkt des Wassers bei 273,16 K;
- Erstarrungspunkt des Zinns bei 505,078 K;

- Erstarrungspunkt des Kupfers bei 1357,77 K;
- ideales Gasgesetz für H_2 oder He;
- Schallgeschwindigkeit in Gasen;
- mittlere Rauschspannung eines elektrischen Widerstandes;
- Plancksches Strahlungsgesetz;
- Curiesches Gesetz des Paramagnetismus unter 30 K;
- akustische und magnetische Thermometer von 0,5 bis 30 K;
- PtRh-Pt-Thermoelement für 900 bis 1300 K;
- Spektralpyrometer oberhalb 1000 K;
- oberhalb 10 000 K werden Plasmastrahlquellen verwendet.

Darüber hinaus kommen weitere physikalische Gesetzmäßigkeiten und verschiedene Interpolationsmethoden zum Tragen. Diese Aufzählung macht auch deutlich, daß für viele Bereiche sehr unterschiedliche temperaturabhängige physikalische Phänomene zur Temperaturmessung herangezogen werden. Einige wichtige Beispiele für solche Effekte sind:

- Die Abmessungen der meisten festen Körper und Flüssigkeiten nehmen mit steigender Temperatur (in guter Näherung linear) zu. Deswegen müssen z.B. Dehnungsfugen und Schienenstöße eingebaut werden und hängen die Freileitungen entsprechend durch. Bei bestimmten Stoffen gibt es auch ein, in ihrer Struktur begründetes, umgekehrtes Verhalten. So zieht sich ein Gummi bei Erwärmung zusammen.
- Viele Gase dehnen sich ebenfalls mit steigender Temperatur aus; wenn dies nicht möglich ist (bei konstant gehaltenem Volumen) steigt der Gasdruck.
- Mit steigender Temperatur gehen Stoffe vom festen in den flüssigen, vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über.
- Bei sehr hohen Temperaturen entstehen Plasmen, in denen die Atome bzw. Moleküle ionisiert sind.
- Der spezifische elektrische Widerstand steigt bei Metallen mit der Temperatur, bei Halbleitern sinkt er.
- Die von einem Körper ausgehende Temperaturstrahlung verlagert sich mit wachsender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen.
- Magnetische Materialien werden ab einer bestimmten Temperatur unmagnetisch.

Für viele elektronische Anwendungen hat die Temperatur praktische Bedeutung. Noch immer muß die Kathode der Bildröhre auf rund 1000 °C erhitzt werden, damit aus ihr die für die Bildschirmdarstellung erforderlichen Elektronen austreten können. Umgekehrt sind z.B. tiefe Temperaturen erforderlich, um das störende thermodynamische Rauschen zu mindern. An einem idealen, also nicht durch zusätzliche Effekte rauschenden Widerstand R tritt z.B. bei der Bandbreite B die Rauschspannung $U_r = \sqrt{4kTBR}$ auf. Falls weiteres Rauschen, z.B. durch Materialinhomogenitäten oder bei Antennen auch durch empfangene Störstrahlung z.B. aus dem All, auftritt, spricht man von einer äquivalenten Rauschtemperatur. Sie ist eine fiktive Größe, die aber für technische Anwendungen einen guten Vergleichswert darstellt.

Der Skalenbereich für die Temperatur ist sehr groß. Es sei hier nochmals darauf verwiesen, daß der absolute Nullpunkt mit $T = 0$ K von keinem System erreicht werden kann. Diesem System (oder Stoff) müßte jegliche Energie entzogen sein. Der Stoff dürfte absolut keine Wärmeschwingungen der Atome bzw. Moleküle mehr ausführen und müßte ein ideales Kristallgitter besitzen. Jeder noch so kleine Kristallbaufehler, jede extrem kleine Magnetisierung führen bereits zu einer Energie und damit zu einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt. Neben diesen stofflichen Gründen gibt es noch weitere Systemeigenschaften (Entropie, spezifische Wärmen), die ein Erreichen des absoluten Nullpunktes verhindern. Die Erklärung der Systeme mit den sogenannten negativen absoluten Temperaturen (die aber heißer als die positiven Temperaturen sind) geht über den Rahmen dieses Buches hinaus.

In der Tiefsttemperaturphysik werden hohe experimentelle Anstrengungen unternommen, um sich schrittweise in tausendstel, millionstel Kelvin dem absoluten Nullpunkt zu nähern. Die Verflüssigung von Gasen, die Hyperflüssigkeit von Helium, die elektrische Supraleitung und der Josephson-Effekt sind nur einige der vielen dabei in Erscheinung tretenden Besonderheiten.

Das Erreichen hoher und höchster Temperaturen ist dagegen nahezu unbegrenzt, nämlich nur von der Zufuhr weiterer Energie abhängig. Einige der dabei auftretenden Erscheinungen sind in der Skale angegeben. Die prinzipiell höchste Temperatur dürfte zum Zeitpunkt des Urknalls des Universum existiert haben. Mit der Ausdehnung des Weltalls sank dann die mittlere Temperatur und gleichzeitig traten Inhomogenitäten auf. So entstanden die Elementarteilchen, die chemischen Elemente und später die Galaxien. Die mittlere Temperatur des Weltalls liegt heute bei etwa 2,7 K, sie wird kosmische Hintergrundstrahlung genannt. Nur an für das Weltall sehr kleinen singulären Punkten können höhere und sehr hohe Temperaturen auftreten. Dies sind z.B. die heißen Sterne, welche die hierzu notwendige Energie hauptsächlich aus Prozessen der Kernumwandlung gewinnen.

Interessant ist auch die Vielfalt der thermischen Effekte, die für die Konstruktion von Thermometern über einen großen Temperaturbereich von fast 11 Zehnerpotenzen genutzt werden.

Für die teilweise noch genutzten alten Temperaturskalen gelten folgende Umrechnungen:

1 Grad Réaumur $= 1\ ^{\circ}\mathrm{R} = 1{,}25\ ^{\circ}\mathrm{C}$;
n Grad Fahrenheit $= n\ ^{\circ}\mathrm{F} = 5/9 \cdot (n - 32)\ ^{\circ}\mathrm{C}$.

3.7.1 Wärmeleitfähigkeit in Watt pro Meter mal Kelvin ([Wärmeleitzahl] = $Wm^{-1}K^{-1}$)

Unsere Erfahrung lehrt uns, daß zwischen Systemen unterschiedlicher Temperatur ein Austausch von Wärmemengen so stattfindet, daß ein Wärmestrom vom System höherer Temperatur zum System niedrigerer Temperatur fließt, bis beide Systeme die gleiche Temperatur haben. Die ausgetauschte Energie wird mittels der Größe Wärmemenge Q beschrieben. Sie ist definiert als

$$Q = mc\Delta\vartheta,$$

wobei m die Masse des Systems, c seine spezifische Wärme und $\Delta\vartheta$ die Temperaturdifferenz sind. Ist diese positiv, spricht man von Wärmezufuhr, ist sie negativ von Wärmeabgabe. Da die Wärme eine Energieform ist, wird sie in Joule gemessen (früher wurde eine eigene Einheit verwendet, die Kilokalorie; 1 kcal = 4186,8 J). Das Produkt mc ist ein Maß für die Wärmespeicherkapazität eines durch die Masse m und die spezifische Wärme c charakterisierten Systems und wird deshalb auch Wärmekapazität genannt.

Zur Betrachtung des Austauschprozesses der Wärmemengen ist es praktisch, den fließenden Wärmestrom zu betrachten. Er ist die Änderung der Wärmemenge pro Zeiteinheit, also letztlich eine Leistung. Er hängt einmal von der herrschenden Temperaturdifferenz und andererseits vom durchflossenen Material ab. Letzteres wird durch seine Wärmeleitfähigkeit λ, seinen Querschnitt A und seine Länge l charakterisiert,

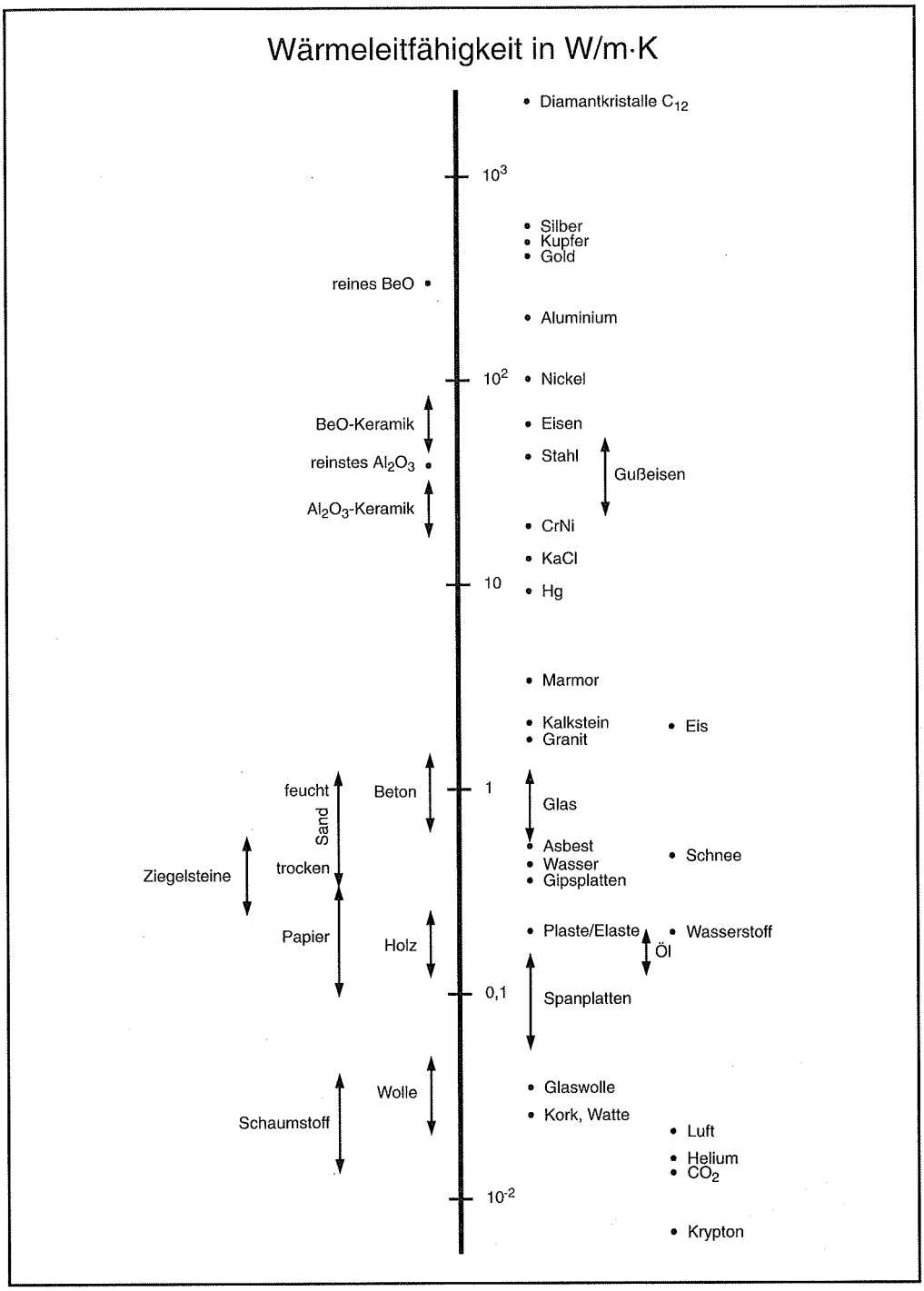
$$\Phi = \lambda\Delta T \cdot A/l.$$

Entsprechend dieser Beziehung leitet sich die Maßeinheit für die Wärmeleitfähigkeit ab.

Die Wärmeleitfähigkeit wird in $Wm^{-1}K^{-1}$ gemessen.

Große praktische Bedeutung hat dieser Prozeß bei allen Isolationsproblemen. Hier muß zwischen die Systeme unterschiedlicher Temperatur (z.B. Inneres eines Hauses und Außenwelt) ein Stoff gebracht werden, der einen möglichst kleinen Wärmefluß zuläßt. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten liegen entweder in der Verkleinerung der Außenwandfläche, in der Vergrößerung der Wanddicke oder in der Verwendung von Stoffen mit möglichst kleiner Wärmeleitfähigkeit λ.

Die Gleichung für den Wärmestrom entspricht in ihrer Struktur der Gleichung für den stationären Strom (vgl. Abschnitt 3.4). Deshalb werden Probleme der Wärmeleitung häufig mit elektrischen Ersatzschaltbildern modellhaft behandelt. Dabei ist es üblich, Φ durch den elektrischen Strom I und ΔT durch die Spannung U (die Potentialdifferenz) zu ersetzen. Dann entspricht der Term $S_t = \lambda \cdot A/l$ einem reziproken elektrischen Widerstand (Leitwert) und λ dem spezifischen elektrischen Leitwert. Die im Abschnitt 3.7.2 behandelte spezifische Wärmekapazität ist dann einer elektrischen Kapazität zuzuordnen. Insgesamt entsteht so die folgende, vor allem in der Halbleitertechnik angewandte Analogie:


Wärmeleitfähigkeit in W/m·K
Diamantkristalle C_{12}
10^3
Silber
Kupfer
Gold
reines BeO
Aluminium
10^2
Nickel
BeO-Keramik
Eisen
Stahl
Gußeisen
reinstes Al_2O_3
Al_2O_3-Keramik
CrNi
KaCl
10
Hg
Marmor
Kalkstein
Granit
Eis
feucht
Sand
Beton
1
Glas
Asbest
Wasser
Gipsplatten
Schnee
Ziegelsteine
trocken
Papier
Holz
Plaste/Elaste
Wasserstoff
Öl
0,1
Spanplatten
Wolle
Glaswolle
Kork, Watte
Schaumstoff
Luft
Helium
CO_2
10^{-2}
Krypton

Wärme			Elektrik		
Leistung	P	W	Strom	I	A
Temperaturdifferenz	ΔT	K	Spannung	U	V
Wärmeleitfähigkeit	λ_t	W/K	spezifische Leitfähigkeit	$1/\rho$	$1/\Omega m$
Wärmekapazität	C_t	J/K	elektrische Kapazität	C	As/V
Wärmewiderstand	R_t	K/W	elektrischer Widerstand	R	Ω

Solche Analogien gelten nicht nur formal, sie lassen sich auch als direkte Schaltungen aufbauen und so analysieren. Dies gilt sowohl für stationäre Flüsse wie für das zeitliche Verhalten.

Die Abbildung 3.7 zeigt die Anwendung des elektrischen Modells der Wärmeleitung auf einen Leistungstransistor. Die Wärme entsteht bei ihm vorwiegend am Basis-Kollektor-pn-Übergang. Die Wärmequelle entspricht der Stromquelle in der elektrischen Schaltung. Der zugehörige Wärmefluß (im Modell elektrischer Strom) wird fast ausschließlich über die Wärmewiderstände des Kollektors, der Goldschicht und des dickeren Molybdäns zur Wärmesenke abgeleitet. Die Wärmeableitung über die Basis und den Emitter kann deshalb vernachlässigt werden, weil sie von dort abgestrahlt werden müßte. Dazu gehört aber bei der relativ kleinen Fläche ein sehr großer Widerstand. Die Wärmesenke ist in der Praxis meist ein Kühlkörper, der zum Teil noch durch zusätzliche Ventilation auf einer relativ tiefen Temperatur gehalten wird. Jede der drei Schichten speichert weiter eine gewisse Wärmemenge. Dies wird im Modell durch die Kondensatoren zum Ausdruck gebracht. Über das Modell sind nun die einzelnen Größen der elektrischen Ersatzschaltung zu berechnen. Dann ergeben sich auch die verschiedenen Temperaturen.

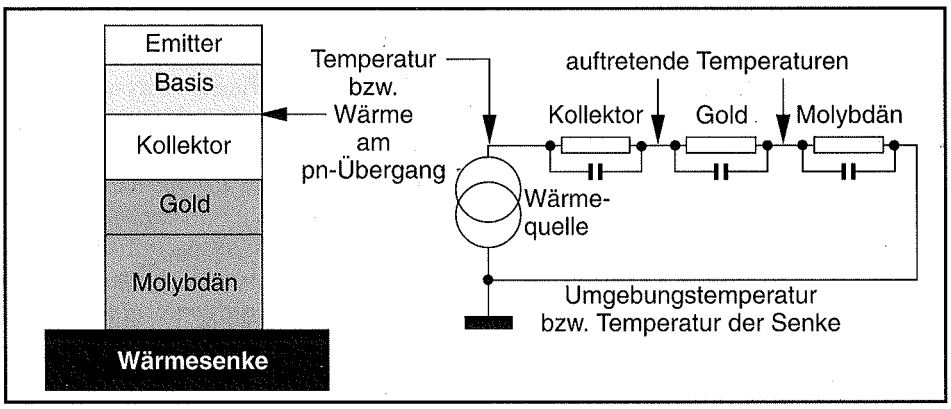


Abb. 3.7
Beispiel eines elektrischen Modells der Wärmeleitung in der Halbleitertechnik

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit spezieller Stoffe werden sowohl stationäre als auch nichtstationäre Methoden angewendet. Sie gehen alle davon aus, daß die Versuchsanordnungen so gewählt werden, daß einfache Lösungen der den Wärmestrom beschreibenden Differentialgleichung angewendet werden können. Dazu werden in der Regel die geometrischen Randbedingungen entsprechend gewählt (planparallele Platten, Zylinder etc.). Die Bestimmung von λ erfolgt dann entweder durch Vergleich mit bekannten Wärmeleitfähigkeiten oder durch Messung der entstehenden Temperaturdifferenz nach stationärem Aufheizen über einen bestimmten Zeitraum. Nichstationäre Methoden beheizen die Mitte einer Probe (i. allg. ein Stab) periodisch und bestimmen die Wärmeleitfähigkeit aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit der entstehenden Temperaturwellen. Es gibt auch Verfahren, die die Analogie zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit ausnutzen und durch Vergleich dieser Werte die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes bestimmen.

Die Skale gibt einen guten Überblick über Wärmeleitfähigkeiten von möglichen Einsatzstoffen. Deutlich wird die hohe Wärmeisolationswirkung von Gasen, die den Erfolg der entsprechenden technischen Lösungen (Doppelfenster, Hohllochsteine etc.) erklären. Die für Gase relativ hohe Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs wird oft technisch ausgenutzt, z.B. beim Eisen-Wasserstoff-Widerstand zur Stromstabilisierung.

Bei der Wärmeübertragung gibt es neben der behandelten Wärmeleitung noch zwei weitere Mechanismen, die Wärmestrahlung und die Wärmekonvektion.

Die Wärmestrahlung erfolgt wie die Lichtstrahlung über einen speziellen Abschnitt des elektromagnetischen Frequenzspektrums und bedarf daher keines Übertragungsmediums. Allerdings absorbieren verschiedene Medien die Wärmestrahlung unterschiedlich stark, sind damit auch unterschiedlich durchlässig für sie. Die Wirkung der Frühbeete beruht z.B. auf der Tatsache, daß Glas für die Lichtstrahlung durchlässig ist, aber nicht für die langwelligere Wärmestrahlung,

Bei der Wärmekonvektion wird die Wärmeenergie an fluide Stoffe gebunden, die dann mechanisch transportiert werden. Eine hocheffektive Anwendung dieses Prinzips ist um 1950 mit dem Wärmeleitungsrohr entstanden. Auch die Heizung unserer Räume mittels einer Wärmequelle beruht zu einem großen Anteil auf der Konvektion der warmen Luft.

3.7.2 Spezifische Wärmekapazität in Joule pro Gramm mal Kelvin ([spezifische Wärmekapazität] = J $g^{-1}K^{-1}$)

In der Beziehung für die bei einer Temperaturdifferenz übertragene Wärmemenge (vgl. Abschn. 3.7.1) kommt als charakteristische Materialkonstante die spezifische Wärmekapazität c vor. Entsprechend der Umstellung dieser Gleichung nach

$$c = \frac{Q}{m\Delta\vartheta}$$ ergibt sich auch die Maßeinheit für die spezifische Wärmekapazität.

Die spezifische Wärmekapazität wird in $Jg^{-1}K^{-1}$ gemessen.

Da die spezifische Wärmekapazität nur durch Vergleich der entsprechenden Wärmemengen, die verschiedene Stoffe bei gleicher Temperaturdifferenz aufnehmen (bzw. abgeben) können, bestimmbar sind, bleibt die spezifische Wärmekapazität für *einen* Stoff frei wählbar. Aus der früheren Definition der Maßeinheit Kalorie für die Wärmemenge ergibt sich die Festlegung für die spezifische Wärmekapazität des Wassers im Temperaturintervall 14,5 °C ≤ ϑ ≤ 15,5 °C zu c_{Wasser} = 1,000 ... kcal kg^{-1} grd^{-1}.

Es werden verschiedene Wärmekapazitäten unterschieden.

Die (*absolute*) Wärmekapazität eines Stoffes ist die Energie, die notwendig ist, um seine Temperatur um 1 K zu erhöhen und wird in J/K gemessen. Diese Wärmemenge ist bei Abkühlung auch wieder nutzbar, da sie im Stoff gespeichert ist.

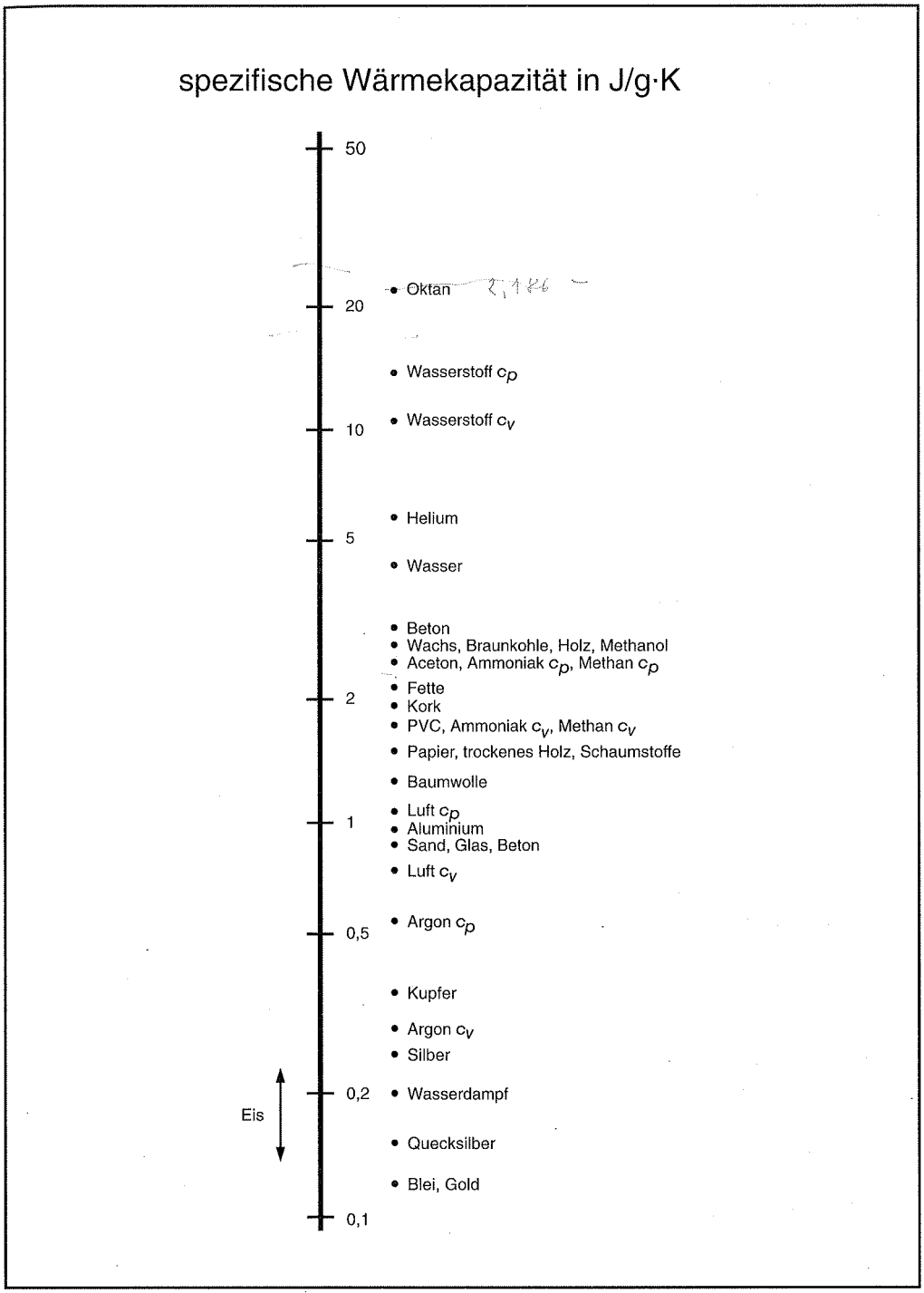
Die *spezifische* Wärmekapazität wird zusätzlich auf die Masse (seltener auch auf das Volumen) bezogen. Sie wird dann entsprechend in $Jg^{-1}K^{-1}$ (oder $Jm^{-3}K^{-1}$) gemessen. Die Skalenwerte zeigen den i.allg. üblichen massebezogenen Wert.

Bei Gasen sind immer zwei typische Wärmekapazitäten zu unterscheiden, nämlich jene für ein konstant gehaltenes Volumen c_V und jene für einen konstanten Druck c_p. Der Wert für c_p enthält zusätzlich die Arbeit, die das Gas bei Wärmeausdehnung leisten muß. Daher gilt stets $c_p > c_V$.

Die *molare* Wärmekapazität (veraltet Molwärme) bezieht sich auf die Stoffmenge 1 mol und wird damit in $Jmol^{-1}K^{-1}$ gemessen. Für Festkörper gilt mit guter Näherung die bereits 1819 von Dulong und Petit formulierte Regel

$$c_{mol} = N_A fk/2 \approx 24{,}9 \text{ J/molK},$$

wobei $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ die Avogadro-Konstante, $k = 1{,}381 \cdot 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante und f die Anzahl der Freiheitsgrade pro Molekül sind.


spezifische Wärmekapazität in J/g·K
50
20
10
5
2
1
0,5
0,2
0,1
Eis
Oktan
Wasserstoff c_p
Wasserstoff c_V
Helium
Wasser
Beton
Wachs, Braunkohle, Holz, Methanol
Aceton, Ammoniak c_p, Methan c_p
Fette
Kork
PVC, Ammoniak c_V, Methan c_V
Papier, trockenes Holz, Schaumstoffe
Baumwolle
Luft c_p
Aluminium
Sand, Glas, Beton
Luft c_V
Argon c_p
Kupfer
Argon c_V
Silber
Wasserdampf
Quecksilber
Blei, Gold

3.8 Lichtstärke in Candela ([Lichtstärke] = cd)

Das Licht hat von jeher eine besondere Rolle für den Menschen gespielt. Das spiegelt sich schon in den ältesten Mythen der Menschheit wider – so verehrten z.B. viele Religionen einen Sonnengott. Die Auswirkungen des Lichtes auf den Menschen – d.h. letztlich auf sein Auge – waren schon immer im Interesse der Religionen und auch der Wissenschaften. Eine wichtige Ursache liegt wohl darin, daß der Gesichtssinn für den Menschen ein fast lebensnotwendiger Sinn ist. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des menschlichen Auges und der Fähigkeit, mittels der neuronalen Verschaltungen den dreidimensionalen Raum wahrzunehmen, wird das Auge zum wichtigsten Signalempfänger, das dann vom Ohr gefolgt wird. Deutlich wird dies bei den Menschen, bei denen einer der beiden Sinne oder gar beide nicht voll oder gar nicht funktionstüchtig sind. Hier gibt es spezielle Hilfen für Blinde, für Taube und für taubblinde Menschen, sich in unserer auf Bild und Sprache basierenden Gesellschaft zurechtzufinden. Für die anderen Sinne ist das nicht der Fall, sie spielen keine so wichtige Rolle.

Spätestens seit dem sich bis in unser Jahrhundert hinziehenden Streit zwischen der Newtonschen und Goetheschen Auffassung über den Charakter der Farben (und damit des Lichtes) ist es klar, daß es zwei unterschiedliche Sichtweisen auf das Phänomen Licht gibt. Newton steht hier für die vom Menschen abstrahierende analytische Richtung (die i. allg. mit der modernen Naturwissenschaft gleichgesetzt wird). Goethe (1749–1832) dagegen steht für die Richtung, die den Menschen in den Vordergrund stellt und damit das Licht unter dem Gesichtspunkt seiner Wirkung auf den Menschen – auf das lichtempfindliche Organ Auge – betrachtet. Dabei ist für Goethe das Auge mehr als nur ein einfacher Empfänger. Dies kommt in seinen Worten aus der Einleitung zum didaktischen Teil der „Farbenlehre" zum Ausdruck:

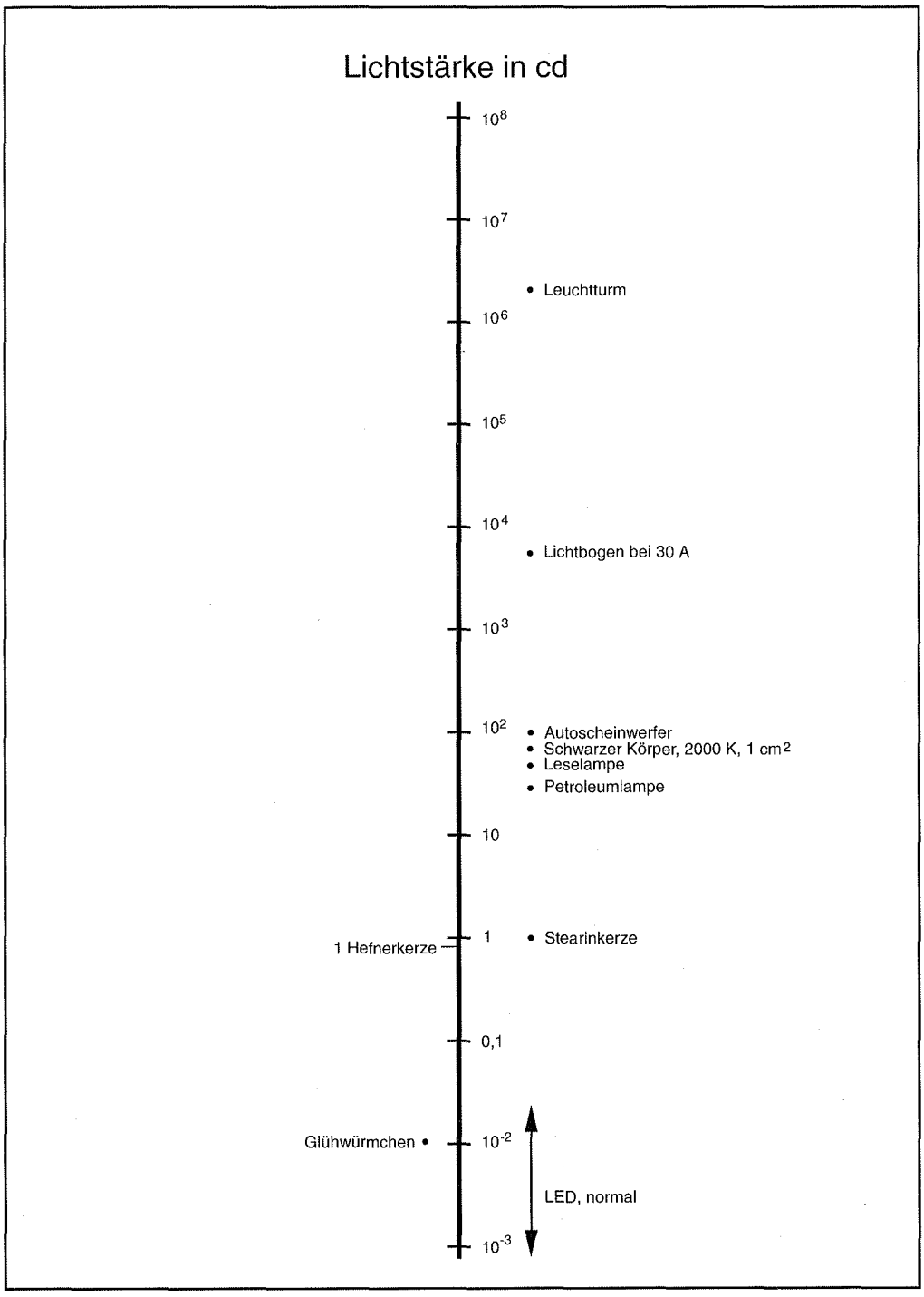
> Wär' nicht das Auge sonnenhaft,
> Die Sonne könnt' es nie erblicken.

Es hat wenig Zweck, die in der newtonschen und die in der goetheschen Tradition stehenden Betrachtungsebenen konträr gegenüberzustellen, sie sind wohl eher im Sinne Bohrs komplementäre Betrachtungsweisen eines Phänomens.

Das hat dazu geführt, daß bei der Lichtmessung beide Sichtweisen Berücksichtigung finden mußten. Die meßtechnische Erfassung der Lichtwirkung auf das Auge ist vor allem bei vielen technischen Anwendungen von Bedeutung. Man unterscheidet deshalb zwischen der Radiometrie und der Photometrie.

Die Radiometrie ist die quantitative Messung von Licht, unabhängig von seiner Wirkung auf das menschliche Auge. Es ist auch unerheblich, ob das Licht direkt von einer Lichtquelle stammt oder ob es indirektes Licht, z.B. von einem reflektierenden Körper ist. Die je nach Art der Messung verschiedenen radiometrischen Größen besitzen entsprechende Einheiten und sind spektral abhängig, d.h., sie sind Funktionen der Wellenlänge des gemessenen Lichtes.

In der Photometrie wird quantitativ bestimmt, wie hell sich die Lichtquelle dem menschlichen Auge darstellt. Genau wie bei der Radiometrie gibt es hier ebenfalls je


Lichtstärke in cd
10^8
10^7
• Leuchtturm
10^6
10^5
10^4
• Lichtbogen bei 30 A
10^3
10^2
• Autoscheinwerfer
• Schwarzer Körper, 2000 K, 1 cm²
• Leselampe
• Petroleumlampe
10
1 Hefnerkerze
1
• Stearinkerze
0,1
Glühwürmchen •
10^{-2}
LED, normal
10^{-3}

nach Art der Messung verschiedene Größen. Dabei korrespondiert jede photometrische Größe mit einer radiometrischen, d.h., jede photometrische Größe kann aus der ihr korrespondierenden radiometrischen errechnet werden. Dies geschieht mit einer Funktion, die die spektrale Lichtempfindlichekeit des Auges eines „durchschnittlichen jungen Betrachters" beschreibt.

Eine besondere Eigenschaft unseres Auges besteht darin, daß wir Farben erst von einer gewissen Helligkeit – etwa dem Tageslicht – an wahrnehmen. Bei geringerem Licht, z.B. nachts, können wir nur Helligkeiten, also Grautöne erkennen. Die Erfahrung zeigt weiter, daß wir aber auch bei hellem Licht uns ganz gut ohne Farben, also in Abstufungen schwarz–grau–weiß, in der Bilderwelt zurechtfinden. Dies zeigen viele Zeichnungen und auch der alte Schwarzweißfilm. Diesen Fakt nutzt die Lichtmeßtechnik.

Licht besteht meist aus einem breiten Spektrum unterschiedlicher Frequenzen (Wellenlängen). Das übliche weiße (nicht farbig erscheinende) Licht enthält alle für uns wahrnehmbaren Frequenzen mit nahezu gleicher Intensität. Viele Lichtquellen strahlen in einzelnen Frequenzbereichen unterschiedlich stark und erscheinen uns daher farbig. Licht, welches aus nur einer Frequenz besteht, hat eine reine Spektralfarbe (ist monochromatisch). Alle für uns sichtbaren Spektralfarben zeigt der Regenbogen. Durch Mischung aus verschiedenen Frequenzen können wir aber viel mehr Farben wahrnehmen.

Im Sinne einer grauen Helligkeit nimmt unser Auge die einzelnen Spektralfarben unterschiedlich gut war. Trotz beachtlicher Individualitäten besitzen ca. 94 % aller Menschen eine nahezu gleichartige Licht- und Farbwahrnehmung. Dabei muß man noch zwischen der Sensitivität bei Tag (photopik) und bei nacht (scotopik) unterscheiden. Über eine große Population erhält man dann die gemittelte Kurve der Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$, die um 1930 als Norm für die Bewertung von Licht festgeschrieben wurde (vgl. Abb. 3.8).

Diese Kurve der Augenempfindlichkeit vermittelt zwischen der betont physikalischen Strahlungsmeßtechnik (Radiometrie), die mit den üblichen Energie- und Leistungseinheiten und deren Flächenbezug auskommt, und der betont auf unser Auge bezogenen Lichtmeßtechnik. Die Strahlungsmeßtechnik mißt die Strahlung einer Lichtquelle summiert über alle Frequenzen, ihre Größen erhalten den Index e (für emittiert). Bei der Lichtmeßtechnik erfolgt dagegen eine zusätzliche Bewertung aller Frequenzen durch die Augenempfindlichkeit $V(\lambda)$, und die so ermittelten Größen erhalten den Index v (für visuell). Die allgemein gültige Formel für die Beziehung zwischen radiometrischen und photometrischen Größen lautet:

$$\Phi_v = K_m \cdot \int V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \cdot d\lambda .$$

Hierin bedeuten $\Phi_e(\lambda)$ die unbewerteten und Φ_v die bewerteten Strahlungsanteile, $V(\lambda)$ ist die Augenempfindlicheit und K_m ist das Strahlungsäquivalent als Konstante mit nach Konvention 683 Lumen/Watt.

In Tabelle 3.2 sind die korrespondierenden Größen der Radio- und Photometrie gegenübergestellt. Da sowohl die radiometrischen wie die photometrischen Größen auf drei Schnittstellen bezogen werden können, sind diese mit angegeben. Bei einer Quelle

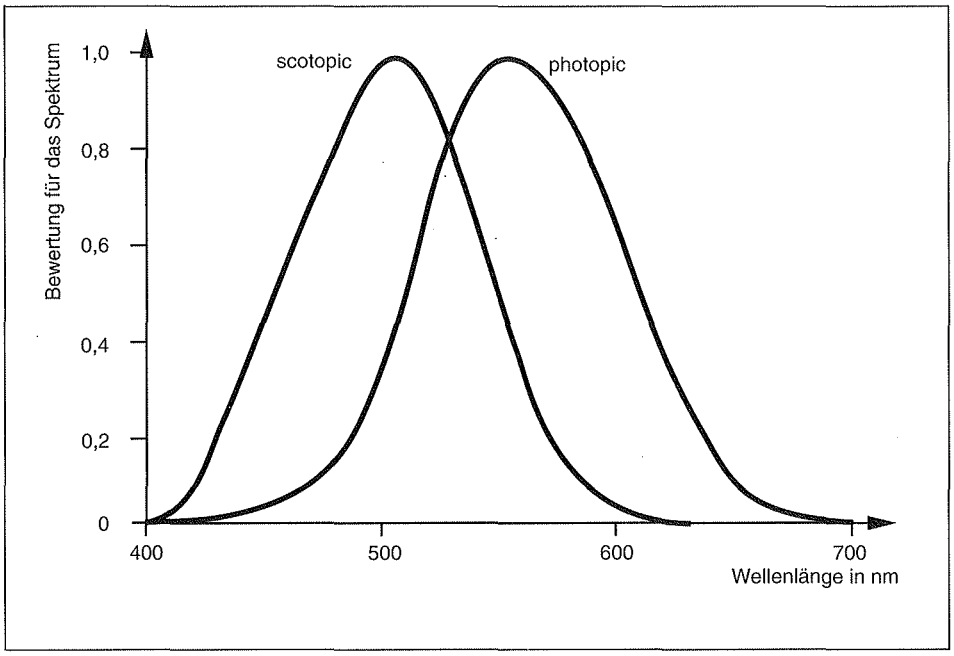


Abb. 3.8
Frequenzabhängigkeit der Augenempfindlichkeit

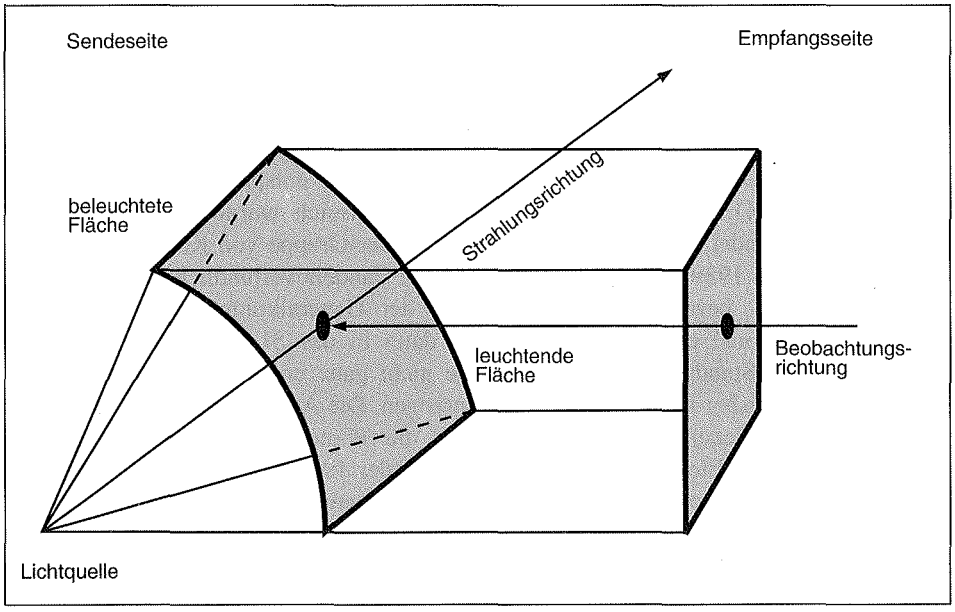


Abb. 3.9
Schnittstellen für die photometrischen Größen

Tabelle 3.2
Korrespondierende Größen der Radiometrie und Photometrie

Radiometrie		Photometrie		Bezug
Strahlungsenergie	J = Ws	Lichtmenge	lms	totale
Strahlungsleistung	W	Lichtstrom	lm = cds	Quelle
Strahlstärke	W/sr	Lichtstärke	cd	
Strahldichte	W/srm^2	Leuchtdichte	cd/m^2	Sender
spezif. Ausstrahlung	W/m^2	spezif. Lichtausstrahlung	lm/m^2	
Bestrahlungsstärke	W/m^2	Beleuchtungsstärke	$lx = lm/m^2$	Empfänger
Bestrahlung	J/m^2	Belichtung	lxs	

wird bevorzugt die totale Strahlung über den gesamten Raum erfaßt. Auf der Sendeseite wird dagegen bevorzugt die Strahlung innerhalb eines Raumwinkels erfaßt und auf der Empfangsseite wird die auf eine Fläche bezogene (auftreffende) Strahlung ausgewählt (s.a. Abb. 3.9).

Die Versuche, für die Lichtstärke eine Einheit zu definieren, begannen erst Mitte des 18. Jahrhunderts. Zu dieser Zeit hatte man Lichtquellen bemerkenswerter Stärke entwickelt, um damit Räume und nächtliche Straßen zu beleuchten, und auch das System der lichttechnischen Größenarten war entwickelt worden. Die zuerst verwendeten Wachskerzen (daher der Name der Einheit: „Kerze") ließen in puncto Reproduzierbarkeit natürliches einiges zu wünschen. Die von Hefner-Alteneck (1845–1904) entwickelte Lampe, die mit Amylacetat betrieben eine Flamme hoher Konstanz lieferte, galt ab 1884 in Deutschland als Vergleichsnormal. Die entsprechende Einheit hieß Hefner-Kerze (HK). In Amerika, England und Frankreich wurde die Internationale Kerze (IK) verwendet, die durch die Lichtstärke einer Gruppe von Kohlefadenlampen definiert war. Von 1939 an galt in Deutschland die Candela verbindlich (bis 1942 auch als „Neue Kerze" bezeichnet), die 1948 von der Generalkonferenz für Maß und Gewicht international empfohlen wurde und dann in das SI einging. Obwohl ihre Einordnung vom Standpunkt der Größenlehre nicht ganz unproblematisch ist, wurde ihre Einordnung bisher kaum einer Kritik unterzogen. Die Arbeiten zur Schaffung eines Systems von Größenarten und Einheiten für die Photometrie wurden zu Beginn vom Internationalen Elektrikerkongreß, später von der 1910 gegründeten Internationalen Lichtmeßkommission und ab 1913 von der Internationalen Beleuchtungskommission betreut.

Ein Candela (1 cd) ist die Lichtstärke, mit der ein schwarzer Strahler bei der Temperatur des beim Druck einer physikalischen Atmosphäre erstarrenden Platins senkrecht zu seiner Oberfläche leuchtet, wenn diese 1/600 000 m^2 beträgt.

Lange Zeit war für die Definition eine monochromatische Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 555 nm (Maximum der Augenempfindlichkeit; $V(555\ \text{nm}) = 1$) mit einer Leistung von 1/683 W verbindlich.

Die Messung von Licht (Lichtstärke, Beleuchtungsstärke) kann mit den üblichen Strahlungsmeßmethoden, etwa geeichten Photozellen, erfolgen. Dabei muß allerdings die Augenempfindlichkeit durch Filter nachgebildet werden. Deshalb existiert auch immer noch die vergleichende subjektive Meßtechnik. Hierbei wird die zu messende Lichtgröße als Leuchtdichte auf eine Fläche abgebildet und mit der Leuchtdichte aus einer geeichten Quelle gleich hell eingestellt. Die Änderung der geeichten Quelle erfolgt meist mittels Veränderung der Entfernung gemäß dem quadratischen Abstandsgesetz. Als Vergleichsfläche existieren u.a. das alte Fettfleck-Photometer (mittels Fett durchscheinend gemachtes Papier) und der Lummer- bzw. Photometerwürfel. Die relative Meßunsicherheit in der Photometrie liegt bei etwa 10^{-2}.

Auf der Skale sind einige typische Lichtstärken aufgetragen. Der große Wert für den Leuchtturm ergibt sich durch die enorm starke Bündelung seines Lichtes.

Für die Umrechnung zu anderen Einheiten gilt:

1 Hefner-Kerze	= 1 HK = 0,903 cd	
1 Internationale Kerze	= 1 IK = 1,019 cd	(= 1,128 HK).

Die Helligkeitsbestimmung von Sternen in der Astronomie erfolgt mittels einer Größenklassenskala, die durch ein hochgestelltes m (von magnitudo) symbolisiert wird. Der Anschluß an das cd erfolgt folgendermaßen:

Die Lichtstärke 1 cd aus einem Abstand von 1 m betrachtet entspricht der Helligkeit eines Objektes von $-13^{\text{m}}94$. Das ist etwas mehr als Vollmondhelligkeit.

3.8.1 Leuchtdichte in Candela pro Quadratmeter ([Leuchtdichte] = cd/m^2)

Für die optische Wahrnehmung ist von entscheidender Bedeutung, wie hell das wahrzunehmende Objekt erscheint. Dabei ist es unbedeutend, ob das Objekt selbst strahlt oder nur beleuchtet ist. Um reproduzierbare Vergleiche zu ermöglichen, wird die Leuchtdichte als Maß für die Helligkeit auf eine Fläche des Objekts bezogen.

Ein Candela pro Quadratmeter (1 cd/m^2) ist die Leuchtdichte einer Fläche von 1 m^2, die in Richtung der Flächennormalen mit der Lichtstärke 1 cd leuchtet.

In einigen Ländern wird dafür auch die Benennung Nit (nt) benutzt, die aber von der Generalkonferenz nicht bestätigt wurde.

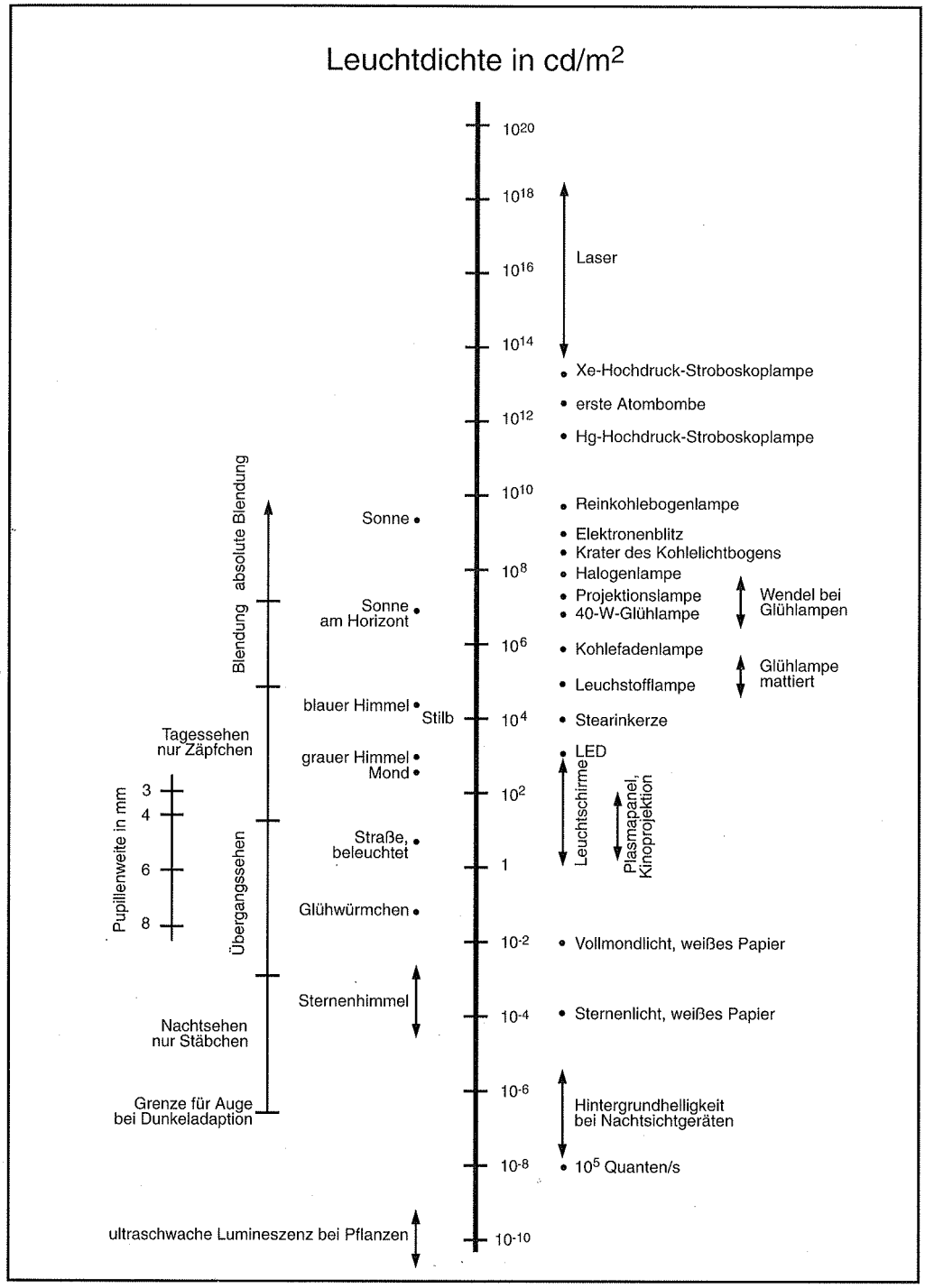
Von allen lichttechnischen Maßen hat die Leuchtdichte den größten Variationsbereich von 30 Zehnerpotenzen. Dabei kann das Auge immerhin einen Bereich von rund 15 Zehnerpotenzen wahrnehmen. In einem kleineren Bereich (etwa 5 Zehnerpotenzen) paßt sich das Auge der Leuchtdichte durch Adaption an. Dabei ändert sich sowohl die Pupillenweite als auch die Netzhautempfindlichkeit. Die Adaptionszeiten können mehrere Minuten dauern, vollständige Dunkeladaption sogar bis zu einer Stunde. Dies kennen sowohl Astronomen als auch Photographen bei ihrer Dunkelkammerarbeit. In diesem Fall ist sogar ein spezielles, sogenanntes extrafoviales Sehen erforderlich. Dies bedeutet, daß die Blickrichtung gegenüber dem üblichen Tagessehen etwas geändert werden muß, um die zu betrachtenden Objekte nicht mehr auf die Fovia zentralis, sondern auf die davon abseits liegende Stelle der höchsten Stäbchendichte abzubilden.

Die verschiedenen Arten unseres Sehens können folgendermaßen gegliedert werden. Unterhalb von 10^{-3} cd/m^2 sehen wir nur noch mit den Stäbchen und können daher keine Farben mehr erkennen (darauf weist auch das Sprichwort „Nachts sind alle Katzen grau" hin). Dann folgt ein Übergangsbereich und ab etwa 5 cd/m^2 sind vor allem die Zäpfchen in Aktion, so daß wir hier besonders gut Farben erkennen. Ab ungefähr 750 cd/m^2 ist die Blendung absolut und schädigt schnell das Auge. Besonders gutes Farbsehen ist nur von 100 bis 500 cd/m^2 möglich.

Neben natürlichen Lichtquellen sind in der Skale auch die Leuchtdichten zahlreicher technischer Quellen aufgenommen. Die hohen Werte des Lasers ergeben sich aus seiner enormen Bündelung (so kann das Licht eines Rubinlasers auf einen Brennfleck von ca. 700 nm Durchmesser fokussiert werden).

Für ebenfalls noch in Gebrauch befindliche (nicht SI-) Einheiten gelten folgende Umrechnungsbeziehungen:

1 Stilb	= 1 sb = 10^4 cd/m^2
1 Apostilb	= 1 asb = 0,318 cd/m^2
1 Lambert	= 1 La = 3,183 cd/m^2
1 candela per square inch	= 1 cd/in^2 = 1550 cd/m^2.


Leuchtdichte in cd/m2
10^20
10^18
10^16
10^14
10^12
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
1
10^-2
10^-4
10^-6
10^-8
10^-10
Laser
Xe-Hochdruck-Stroboskoplampe
erste Atombombe
Hg-Hochdruck-Stroboskoplampe
Reinkohlebogenlampe
Elektronenblitz
Krater des Kohlelichtbogens
Halogenlampe
Projektionslampe
40-W-Glühlampe
Wendel bei Glühlampen
Kohlefadenlampe
Leuchstofflampe
Glühlampe mattiert
Stearinkerze
LED
Leuchtschirme
Plasmapanel, Kinoprojektion
Vollmondlicht, weißes Papier
Sternenlicht, weißes Papier
Hintergrundhelligkeit bei Nachtsichtgeräten
10^5 Quanten/s
Sonne
Sonne am Horizont
blauer Himmel
Stilb
grauer Himmel
Mond
Straße, beleuchtet
Glühwürmchen
Sternenhimmel
ultraschwache Lumineszenz bei Pflanzen
absolute Blendung
Blendung
Übergangssehen
Nachtsehen nur Stäbchen
Grenze für Auge bei Dunkeladaption
Tagessehen nur Zäpfchen
Pupillenweite in mm
3
4
6
8

3.8.2 Lichtstrom in Lumen ([Lichtstrom] = lm)

Gehen wir von dem Denkmodell einer Punktlichtquelle aus, das oft eine gute Näherung ist, so ist die Strahlungsmenge einer Lichtquelle in einen bestimmten Raumwinkel für ihre Effizienzbewertung von praktischem Interesse. Diese Bewertung erfolgt mittels des Lichtstromes in der Einheit Lumen. Sie ist vor allem für den Vergleich von Lichtquellen wichtig.

Ein Lumen (1 lm) ist der Lichtstrom, den eine Lichtquelle der Lichtstärke 1 cd in den Raumwinkel 1 sr aussendet (1 lm = 1 cd · sr).

Die Lichtströme werden mit der Ulbrichtschen Kugel bestimmt. Im Inneren einer diffus reflektierenden Kugel wird eine Lichtquelle so angebracht, daß nur das diffuse Streulicht auf das Photometer fallen kann. Die im Photometer bestimmte Beleuchtungsstärke ist dem Lichtstrom der Lampe proportional. Durch Eichen der Kugel mit einer Normallampe kann mittels dieser Anordnung der Lichtstrom einer Lampe photometrisch bestimmt werden. Dabei muß die auszumessende Lampe stets an der gleichen Stelle wie die Normallampe angeordnet werden.

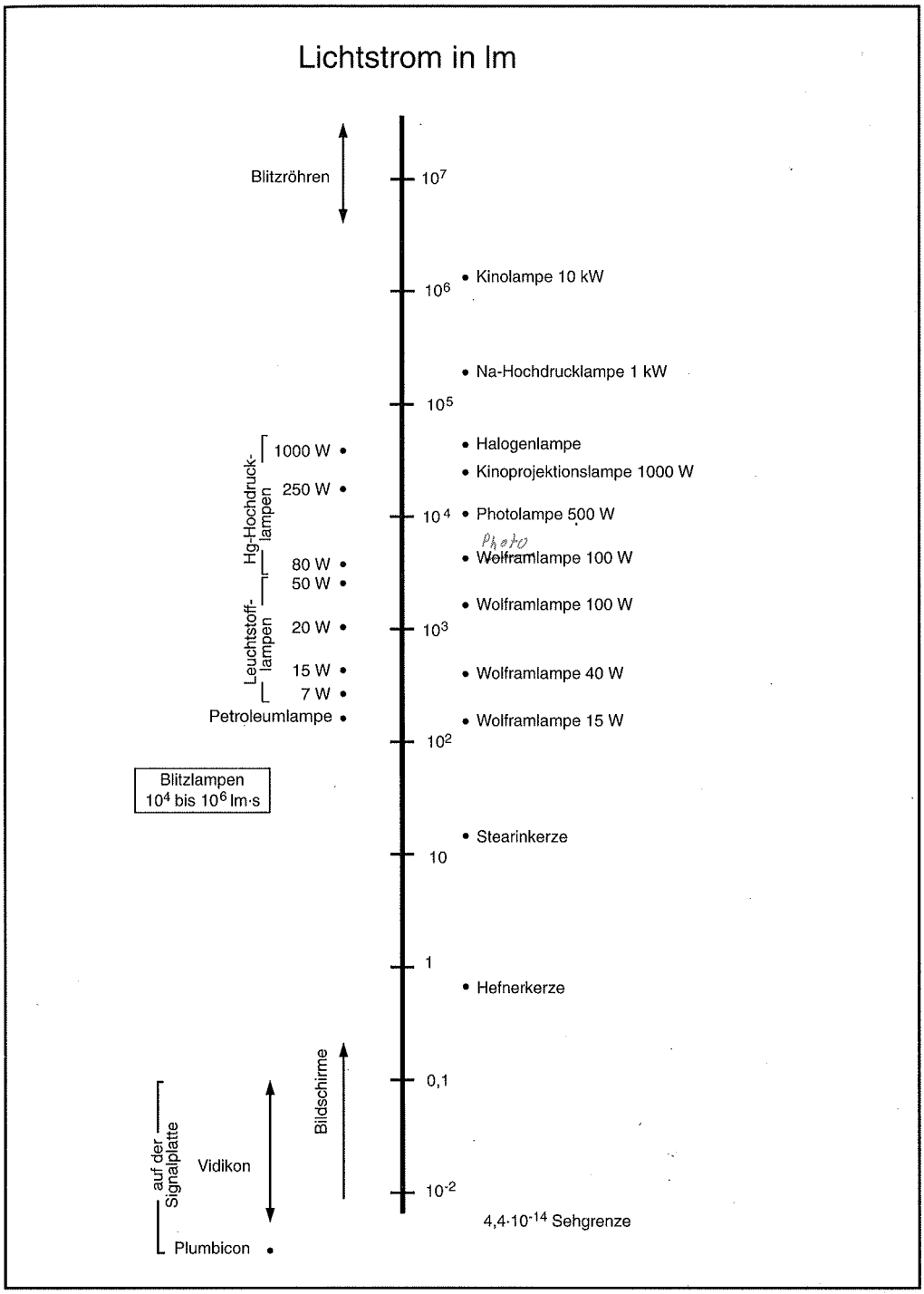
Auf der Skale sind die wichtigsten technischen Lichtquellen aufgetragen. Insbesondere ihre elektrischen Varianten unterscheiden sich ganz erheblich in der Lichtausbeute, die in Abschnitt 3.8.5 gesondert behandelt wird. Auch bei den anderen Lichtquellen kommt es darauf an, aus der vorhandenen Energie möglichst viel Licht für das Auge zu erzielen. Dies wird u.a. beim Gaslicht durch den Glühstrumpf und bei den Leuchtstoffröhren durch den Leuchtstoff technisch realisiert. Je nach den Materialeigenschaften kann dabei der Lichtquelle auch ein gewisser Farbton verliehen werden, z.B. Warmlicht mit leicht rötlicher Färbung oder bläulich-violettes Licht, welches besonders für Pflanzen vorteilhaft ist.

Grundsätzlich hätte auf der Skale auch der Lichtstrom von extrem starken Lichtquellen, wie z.B. der Sonne, aufgetragen werden können. Diese Werte sind aber nicht von praktischer Bedeutung, da derartige Lichtquellen immer so weit entfernt bleiben, daß ihr Lichtstrom für uns nicht relevant wird. Anders wäre dies bei einer Atomexplosion, doch konnten hierfür keine Werte gefunden werden.

Alte Maße für den Lichtstrom lassen sich indirekt aus den Maßen für die Lichtstärke ableiten, sind jedoch ungebräuchlich.

Für einige praktische Anwendungen, z.B. in der Photographie, ist der Lichtstrom während einer bestimmten Zeit von Interesse. Diese Lichtmenge mißt man in lm · s. Sie ergibt sich aus dem Integral des Lichtstromes über die Zeit und hat besonders bei kurzzeitig wirkenden Lichtquellen, wie Vakuum- oder Elektronenblitz, zur Bestimmung der Blendenzahl ihre Bedeutung.

Da sich infolge der wenigen verfügbaren Daten keine eigene Skale lohnt, sollen typische Werte hier genannt werden. Blitzlampen liefern Lichtmengen von 10^4 bis 10^6 lms. Eine Vakuumblitzröhre mit einer elektrischen Leistung von 100 W gibt rund 4000 lms ab. Übliche Elektronenblitze geben ca. 1000 bis 100000 lms ab. Vakuum-


Lichtstrom in lm
Blitzröhren
10^7
10^6
• Kinolampe 10 kW
• Na-Hochdrucklampe 1 kW
10^5
Hg-Hochdruck-lampen
1000 W •
250 W •
• Halogenlampe
• Kinoprojektionslampe 1000 W
10^4
• Photolampe 500 W
80 W •
50 W •
• Wolframlampe 100 W
Leuchtstoff-lampen
20 W •
• Wolframlampe 100 W
10^3
15 W •
7 W •
• Wolframlampe 40 W
Petroleumlampe •
• Wolframlampe 15 W
10^2
Blitzlampen
10^4 bis 10^6 lm·s
• Stearinkerze
10
1
• Hefnerkerze
Bildschirme
0,1
auf der Signalplatte
Vidikon
10^{-2}
Plumbicon •
$4{,}4 \cdot 10^{-14}$ Sehgrenze

blitzlampen existieren im Bereich von 5000 bis 70000 lms. Dabei ist die Blitzdauer von Vakuumblitzen 1/50 bis 1/100 s, die von Elektronenblitzen kleiner als 1 ms.

Mittels der Lichtmenge L_t, dem Reflexionsfaktor M und der ASA-Filmempfindlichkeit S (vgl. Abschn. 3.8.4) läßt sich für alle Blitze gemäß

$$G = \sqrt{0{,}005 \cdot L_t \cdot M \cdot S}$$

eine Leitzahl bestimmen, mittels derer und der Entfernung x in Metern die Blendenzahl B bestimmt werden kann:

$$B = G/x.$$

3.8.3 Beleuchtungsstärke in Lux ([Beleuchtungsstärke] = lx)

Die Beleuchtungsstärke ist ein Maß dafür, mit wieviel Licht eine Fläche beleuchtet wird. Sie ergibt sich aus dem Lichtstrom pro Fläche. Die Helligkeit der Fläche hängt dann aber noch davon ab, wieviel von dem Licht sie reflektiert bzw. absorbiert. Entsprechend der Definition der Größe Beleuchtungsstärke ist auch ihre SI-Einheit definiert.

Ein Lux (1 lx) ist die Beleuchtungsstärke einer Fläche, auf die senkrecht je Quadratmeter gleichmäßig der Lichtstrom 1 lm fällt (1 lx = 1 lm/m^2).

Die Beleuchtungsstärke überstreicht einen beachtlichen Bereich von etwa 8 Zehnerpotenzen, der zwischen dem hellsten Sonnenlicht im Sommer und der Dunkelheit einer mondlosen Nacht liegt.

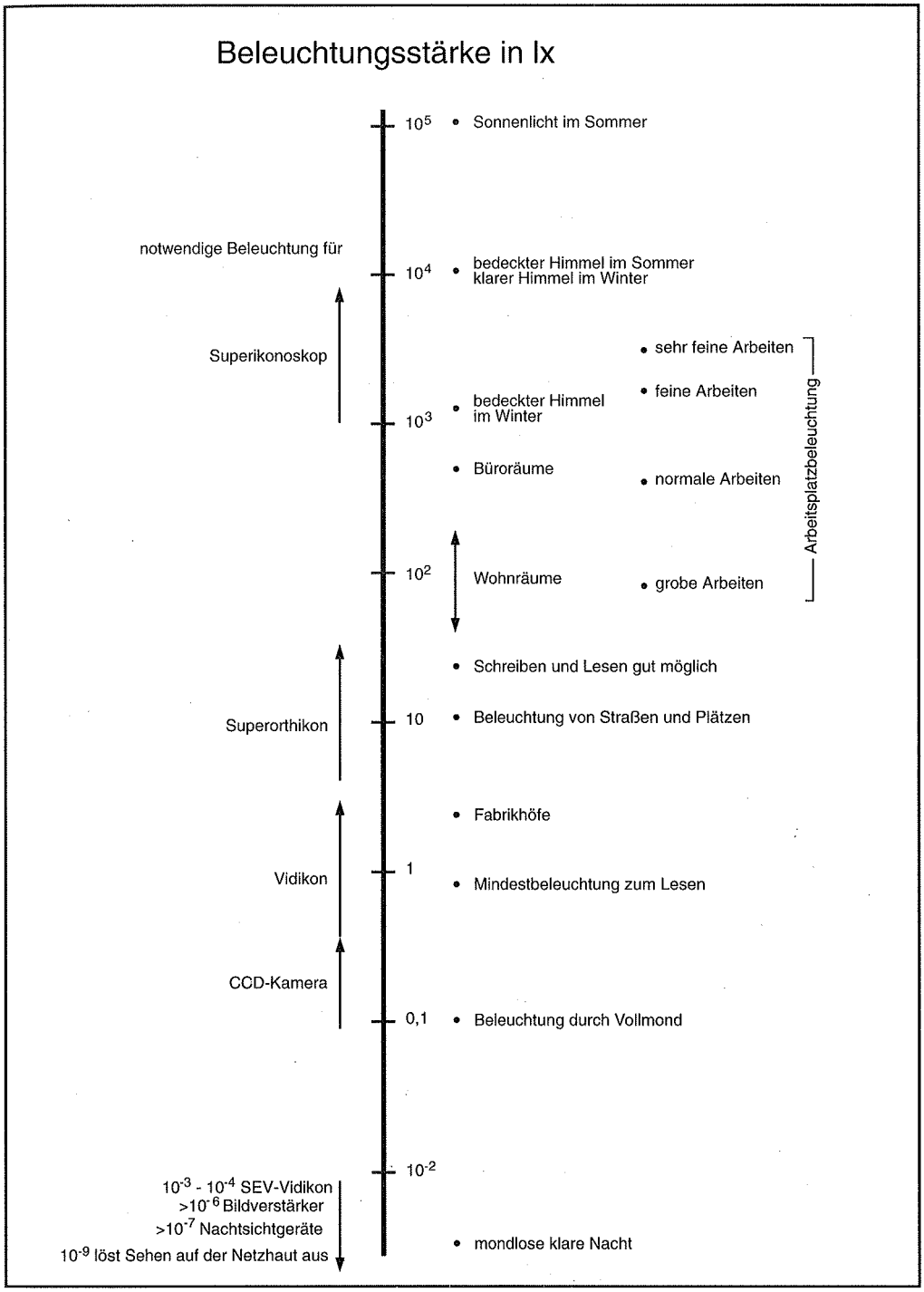
Unser Auge nimmt jedoch bereits Licht bei einer Helligkeit wahr, die noch etwa 7 Zehnerpotenzen unter der einer mondlosen Nacht liegt. Selbst technische Geräte können noch Bilder erzeugen, wenn weniger Licht als in einer klaren mondlosen Nacht vorhanden ist.

Die Beleuchtungsstärke ist in mehrfacher Hinsicht wichtig. Einmal verlangen technische Apparaturen, wie Video- und Filmkameras in Fernseh- und Filmstudios, eine bestimmte Beleuchtung, um optimale Bilder zu erhalten. Zum anderen verlangen auch unsere Augen je nach der geforderten Arbeit eine bestimmte Beleuchtung. So gibt es z.B. Minimalforderungen, um überhaupt lesen zu können. Die jeweils notwendige Beleuchtung hängt auch stark von der Feinheit und der geforderten Präzision der auszuführenden Arbeit ab.

Sicherheitstechnische Forderungen führen z.B. zu entsprechenden Anforderungen an die Beleuchtung von öffentlichen Straßen und Plätzen.

Alte Beleuchtungsmaße sind:

1 Phot = 1 ph = 10^4 lx
1 Nox = 1nx = 10^{-3} lx (Dunkelbeleuchtungsstärke beim Sehen mittels Stäbchen im Bereich von Leuchtdichten < 318,31 cd/m^2).


Beleuchtungsstärke in lx
10^5
Sonnenlicht im Sommer
notwendige Beleuchtung für
10^4
bedeckter Himmel im Sommer
klarer Himmel im Winter
Superikonoskop
sehr feine Arbeiten
feine Arbeiten
10^3
bedeckter Himmel
im Winter
Büroräume
normale Arbeiten
Arbeitsplatzbeleuchtung
10^2
Wohnräume
grobe Arbeiten
Schreiben und Lesen gut möglich
Superorthikon
10
Beleuchtung von Straßen und Plätzen
Fabrikhöfe
Vidikon
1
Mindestbeleuchtung zum Lesen
CCD-Kamera
0,1
Beleuchtung durch Vollmond
10^{-2}
10^{-3} - 10^{-4} SEV-Vidikon
$>10^{-6}$ Bildverstärker
$>10^{-7}$ Nachtsichtgeräte
10^{-9} löst Sehen auf der Netzhaut aus
mondlose klare Nacht

3.8.4 Belichtung in Lux mal Sekunde ([Belichtung] = lx · s)

Die Belichtung besitzt bei Prozessen, die das Licht summarisch (integral) erfassen, große Bedeutung. Ein photographischer Film, eine Kopiergerätetrommel, eine Laserdruckertrommel usw. benötigen für ein optimales Bild eine typische Belichtung. Wir bestimmen z.B. mit einem Belichtungsmesser die Helligkeit eines Objektes (die dortige Beleuchtungsstärke mit dem Luxmeter) und ermitteln daraus über die Filmempfindlichkeit die notwendige Belichtungszeit (bzw. Blende). Die Belichtung ist dann das Produkt aus Beleuchtungsstärke und einwirkender Zeit. Entsprechend ist auch die Einheit definiert.

Eine Luxsekunde (1 lxs) ist die Belichtung, die eine Beleuchtungsstärke von 1 lx innerhalb einer Sekunde erzeugt.

Auf der Skale sind Werte für einige typische Filme und Photopapiere aufgetragen. Sie sind durch einige biologische Werte ergänzt, denn auch Pflanzen integrieren weitgehend die täglichen Lichtmengen und verändern danach ihr Verhalten. Dies trifft sowohl auf die Ausrichtung von Trieben und Blättern nach dem Licht zu, wie auch für das Geschehen im Frühling mit der Bildung neuer Keime, Blüten und Blätter sowie im Herbst mit der Färbung und dem Abwurf des Laubs und dem Reifen der Früchte.

Die photographische Empfindlichkeit ist eine Kennzahl S. In der Einheit DIN ergibt sie sich aus der erforderlichen Belichtung H_M und der Konstanten $H_0 = 1{,}0$ lxs. Wenn mit H_M eine optische Dichte von 0,10 erzeugt wird, gilt

$$S = 10 \cdot \log(H_0/H_M).$$

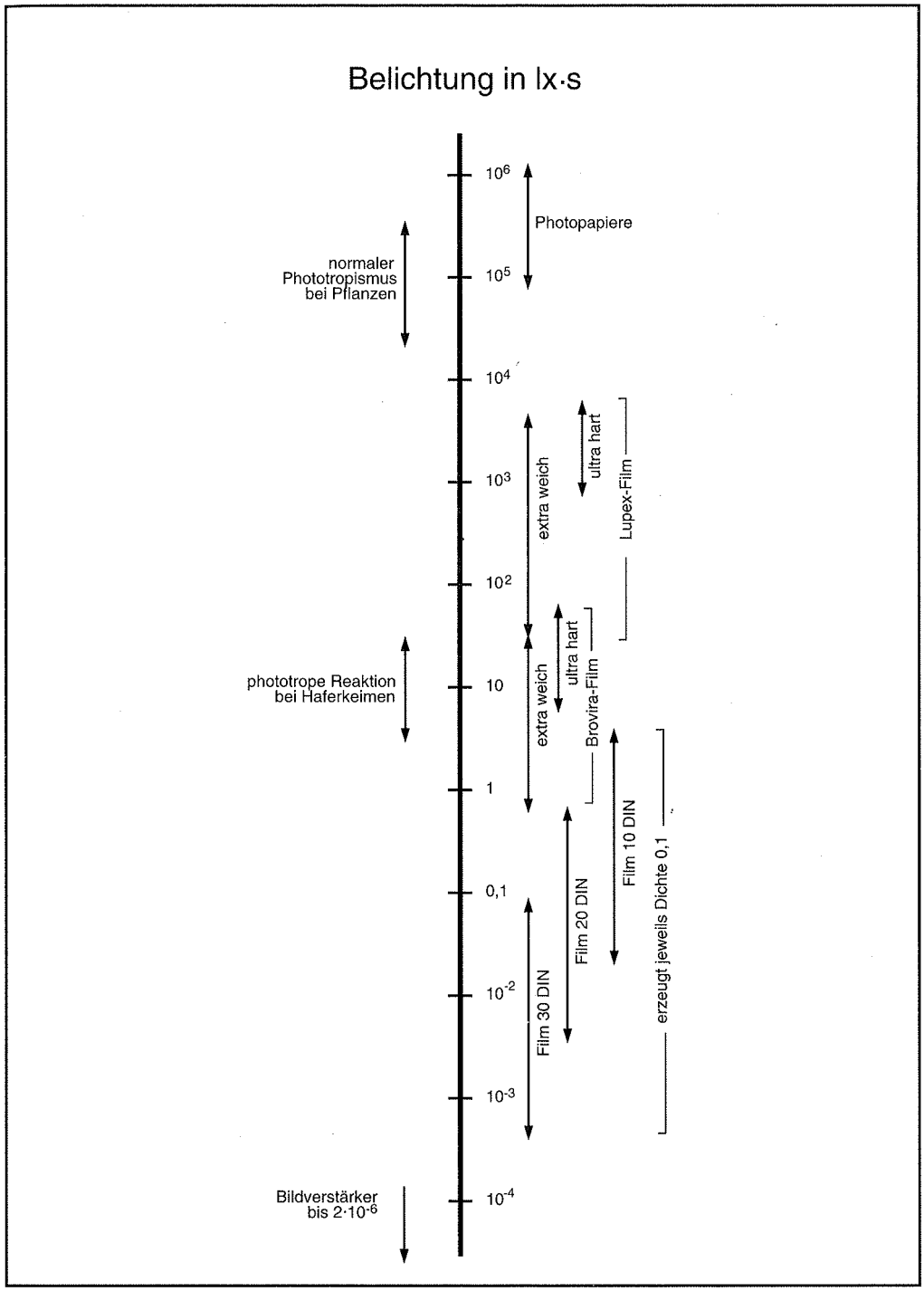
Eine andere Einheit ist das ASA. Der ASA-Wert ist durch jene Belichtungsenergie E mit einer Belichtungszeit von 1/20 bis 1/80 s in lxs gegeben, für die die Schwärzungskurve jenen Punkt erreicht, wo 1/3 der mittleren Steigung auftritt. Bezüglich der Umrechnung ergibt sich

$$\mathrm{ASA} = 2^{(\mathrm{DIN}-1)/3} \quad \text{bzw.} \quad \mathrm{DIN} = 10 \cdot \log(\mathrm{ASA}) + 1),$$

Neben der arithmetischen existiert noch eine logarithmische ASA-Skala mit der oben genannten Energie gemäß

$$\mathrm{ASA}^\circ = 5 - \log(E).$$

Weiterhin existieren noch selten gebräuchliche Systeme, wie Scheiner (unterschieden nach Europa und Amerika), Weston, ISO speed und ASA speed. Vergleiche sind immer nur bezüglich konkreter Anwendungen möglich, da die Kriterien zur Definition der verschiedenen Filmempfindlichkeiten unterschiedlich sind. Auf Verkaufspackungen angegebene Filmempfindlichkeiten gelten streng genommen nur für eine bestimmte Standardentwicklung.

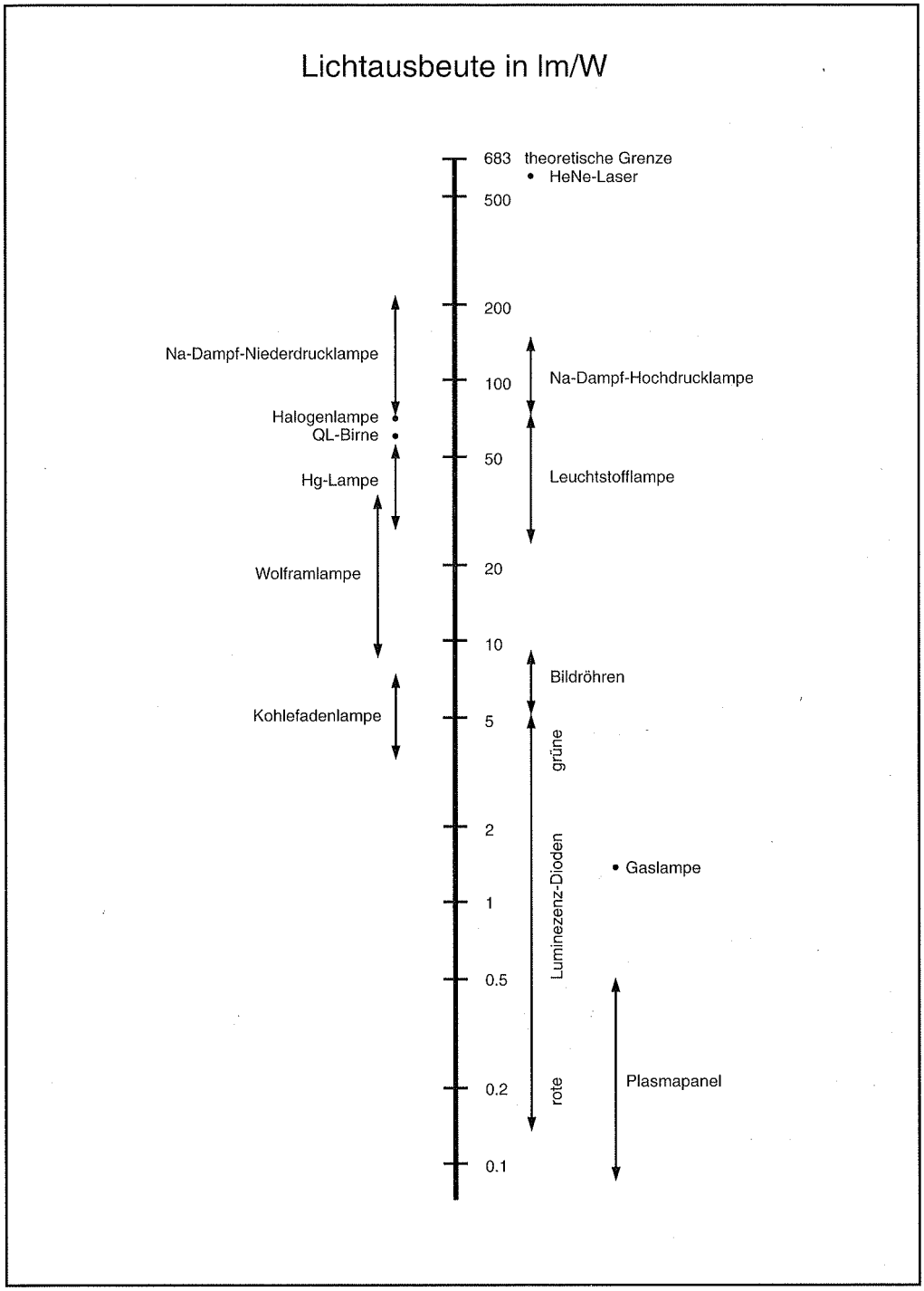

Belichtung in lx·s
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0,1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
Photopapiere
normaler Phototropismus bei Pflanzen
extra weich
ultra hart
Lupex-Film
extra weich
ultra hart
Brovira-Film
phototrope Reaktion bei Haferkeimen
Film 10 DIN
Film 20 DIN
Film 30 DIN
erzeugt jeweils Dichte 0,1
Bildverstärker bis $2 \cdot 10^{-6}$

3.8.5 Lichtausbeute in Lumen pro Watt ([Lichtausbeute] = lm/W)

Besonders bei technischen Lichtquellen ist es von Interesse, den „photometrischen Wirkungsgrad" (zu Wirkungsgraden vgl. Abschn. 3.10.8) zu kennen, d.h. zu wissen, wie groß der Lichtstrom je eingesetzter Energiemenge ist. Dies ist die Lichtausbeute (auch photometrisches Strahlungsäquivalent genannt).

Ein Lumen pro Watt (1 lm/W) ist die Lichtausbeute, bei der die elektrische Leistung von 1 W einen Lichtstrom von 1 lm sichbaren Lichtes erzeugt.

Hauptanwendungsfeld dieser Größe ist der Vergleich der verschiedenen Lichtquellen bezüglich ihrer Effizienz hinsichtlich der Lichtausbeute im Bereich des sichtbaren Lichtes. Der maximal mögliche theoretische Grenzwert ist dabei 683 lm/W. Er wird z.B. bei einer monochromatischen Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 555 nm erreicht. Hier besitzt die Kurve der Augenempfindlichkeit des Menschen ihr Maximum (vgl. Abb. 3.8).


Lichtausbeute in lm/W
683 theoretische Grenze
• HeNe-Laser
500
200
100
50
20
10
5
2
1
0.5
0.2
0.1
Na-Dampf-Niederdrucklampe
Halogenlampe
QL-Birne
Hg-Lampe
Wolframlampe
Kohlefadenlampe
Na-Dampf-Hochdrucklampe
Leuchtstofflampe
Bildröhren
grüne
Luminezenz-Dioden
rote
• Gaslampe
Plasmapanel

3.9 Energiereiche Strahlung

In den vergangenen Abschnitten haben wir Erscheinungen kennengelernt, die von uns Menschen einerseits nicht direkt sinnlich wahrnehmbar bzw. deren Beschreibung und Messung in bezug auf ihre Wirksamkeit gegenüber dem Menschen entscheidend waren. Mit der energiereichen Strahlung, auch ionisierende Strahlung genannt, kommen wir zu einem Phänomen, das beide Probleme in sich vereint.

Die energiereiche Strahlung liegt im elektromagnetischen Spektrum (vgl. Abb. 3.10) im Bereich sehr kleiner Wellenlängen. In der Abbildung ist der Bereich des sichtbaren

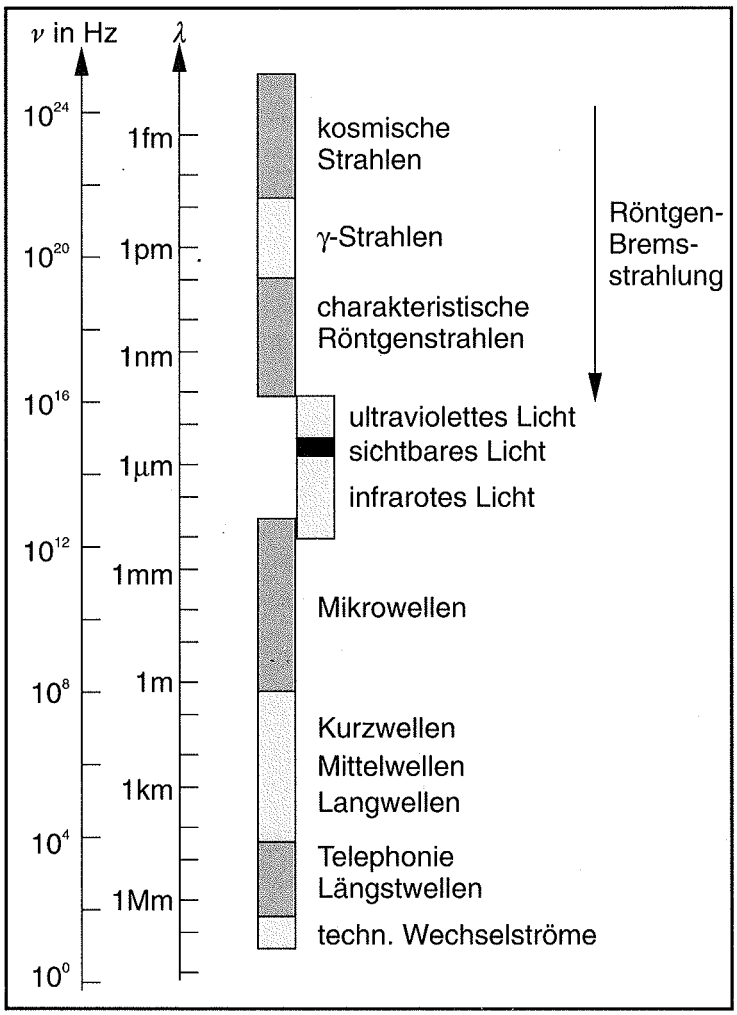


Abb. 3.10
Elektromagnetisches Spektrum

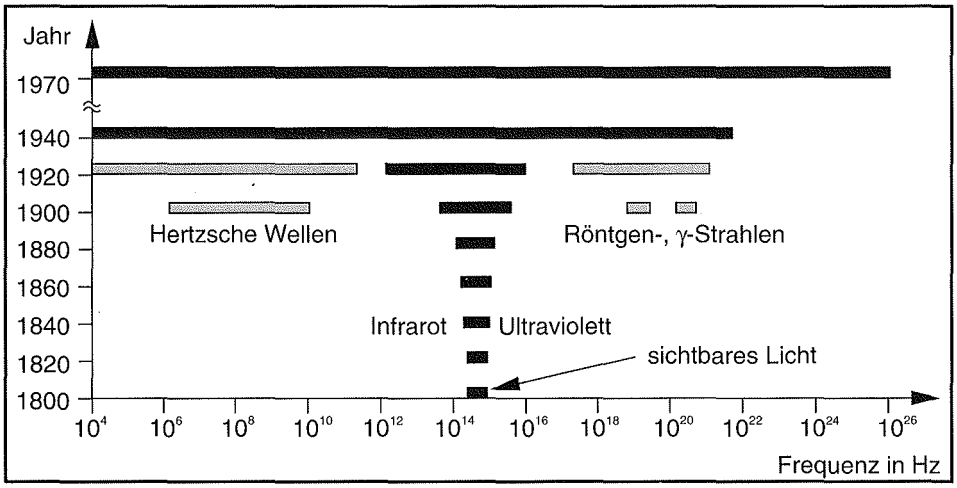


Abb. 3.11
Historische Entwicklung unserer Kenntnis des elektromagnetischen Spektrums

Lichtes, das wir dank unserer Sinnesorgane direkt wahrnehmen können, hervorgehoben. Es wird deutlich, wie begrenzt unsere Sinne auf diesem Gebiet sind. Aber auch unser Wissen über die energiereiche Strahlung ist noch relativ jung. Abbildung 3.11 zeigt überblicksartig die historische Entwicklung unserer Kenntnis über die einzelnen Bereiche des elektromagnetische Spektrums.

Die zweite wichtige Seite der energiereichen Strahlung ist ihre Wirkung auf das Leben in toto und das menschliche Leben im besonderen. Die biologische Entwicklung des Menschen hat stets unter einer natürlichen Strahlenexposition terrestrischen und kosmischen Ursprungs stattgefunden. Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1895 und der Entwicklung der Kerntechnik (etwa 1940) sind wir zusätzlich einer zivilisatorischen Strahlenexposition ausgesetzt. Sie stellt einen ernstzunehmenden Eingriff in die Entwicklungsbedingungen der Menschheit dar. Er kann zu nachteiligen Folgen für den einzelnen Menschen wie für die gesamte Menschheit führen, denn unzulässig hohe Strahlendosen führen zu genetischen und somatischen Schäden, insbesondere bösartigen Geschwülsten bis hin zu einer Verkürzung der Lebenserwartung. Darum ist es sehr wichtig, entsprechende Größen zu finden, die die Wirkung der energiereichen Strahlung auf den menschlichen Organismus meßtechnisch erfaßbar machen.

Zunächst war die gefährliche Wirkung dieser Strahlung nicht bekannt und so wurden auch die Forscher, die sich mit ihrer Aufklärung befaßten, stark betroffen. Die Röntgenstrahlen forderten z.B. das Leben von 359 Forschern, Ärzten, Physikern, Röntgentechnikern, Laboranten und Krankenschwestern, bevor Strahlenschutzmaßnahmen zum gefahrlosen Umgang mit Röntgenstrahlen erarbeitet wurden. Auch Marie Curie (1867–1934) und ihre Tochter Irène Joliot-Curie (1897–1956) starben an den Folgen ihrer Forschungen an radioaktiven Nukliden. Mit dem Abwurf der beiden Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki wurden die Auswirkungen energiereicher

Strahlung auf das menschliche Leben ins weltweite Bewußtsein gerückt. Obwohl damals schon der radioaktive fall out über Europa verzehnfacht wurde, drang erst durch die Katastrophe von Tschernobyl vom April 1986 die Gefahr der durch die Tätigkeit des Menschen erzeugten energiereichen Strahlung in das Bewußtsein aller in Europa lebenden Menschen. Vor dem Hintergrund der heutigen Erkenntnisse ist jede zusätzliche Aktivität, die die Möglichkeit der Freisetzung energiereicher Strahlung beinhaltet, unverantwortlich.

Energiereiche Strahlung existiert vorwiegend in vier Varianten:

α-Strahlung (He-Kerne mit kinetischer Energie);
β-Strahlung (Elektronen mit kinetischer Energie, eigentlich β^-, da auch die aus Positronen bestehende Strahlung β^+ existiert);
γ- und Röntgenstrahlung (extrem kurzwellige elektromagnetische Wellen);
Neutronen mit kinetischer Energie.

Alle Strahlen können sowohl natürlichen Ursprungs sein, als auch bewußt für verschiedene Anwendungen erzeugt und genutzt werden. Für die Anwendungen sind zwei Quellentypen zu unterscheiden.

Strahlende Isotope eines chemischen Elements bestimmter Massenzahl, z.B. Cobalt 60 (^{60}Co). Diese Isotope heißen auch radioaktiv oder instabil. Bei ihnen zerfallen in zufälligen Abständen einzelne Atome und wandeln sich dabei in andere Elemente um. Dabei erzeugen sie eine oder mehrere Strahlungsarten. Für jedes Nuklid gibt es eine Zerfallsreihe. Sie weist aus, welche Nuklide beim Zerfall nacheinander entstehen, bis schließlich nur noch stabile Isotope übrigbleiben. Als Beispiel sei die Zerfallsreihe des bei der Spaltung von ^{235}U auftretenden Caesium 140 (^{140}Cs) angeführt:

	66s		12,8d		40h		Halbwertszeiten
^{140}Cs	→	^{140}Ba	→	^{140}La	→	^{140}Ce	
	β^-		β^-		β^-		abgegebene Strahlung.

Die Zeiten über den die Zerfallsrichtung angebenden Pfeilen ist die für diesen Zerfall typische *Halbwertszeit*. Sie gibt an, in welcher Zeit die Hälfte der vorhandenen radioaktiven Nuklide zerfallen ist. Sie reicht von extrem kleinen Bruchteilen einer Sekunde bis zu vielen Jahren. Die folgende Übersicht soll einen kleinen Eindruck verschaffen.

Halbwertszeit	**Element**	**Halbwertszeit**	**Element**	**Halbwertszeit**	**Element**
2,7 d	^{198}Au	2,94 a	^{55}Fe	87 d	^{35}S
3,15 d	^{199}Au	19 h	^{194}Ir	53 d	^{89}Sr
152 d	^{45}Ca	8,1 d	^{131}J	19,9 a	^{90}Sr
282 d	^{144}Ce	$1{,}9 \cdot 10^9$ a	^{40}K	$1{,}62 \cdot 10^5$ a	^{233}U
5,27 a	^{60}Co	15,6 h	^{24}Na	$7{,}13 \cdot 10^8$ a	^{235}U
5568 a	^{14}C	$2{,}4 \cdot 10^4$ a	^{239}Pu	$4{,}49 \cdot 10^9$ a	^{238}U
33 a	^{137}Cs	1622 a	^{226}Ra	61 d	^{91}Y

Geräte, die Energie in Strahlung wandeln, wie z.B. Röntgenröhren und Teilchenbeschleuniger (u.a. Bandgeneratoren, Zyklotrons, Betatrons). Sie erzeugen gezielt

einzelne Strahlenarten mit wählbarer Energie (Energiespektrum). Die Strahlung der Röntgenröhre wird mit der Beschleunigungsspannung und durch das Anodenmaterial verändert. Bei den anderen Geräten kann die Strahlungsart und Intensität in weiten Bereichen gewählt werden. Die jeweilige *Strahlungsenergie* wird meist in Elektronenvolt gemessen (vgl. Abschn. 3.3.9). Für die Diagnostik werden heute ca. 50 MeV erreicht. In der Kernphysik sind Geräte bis in den TeV-Bereich im Gebrauch.

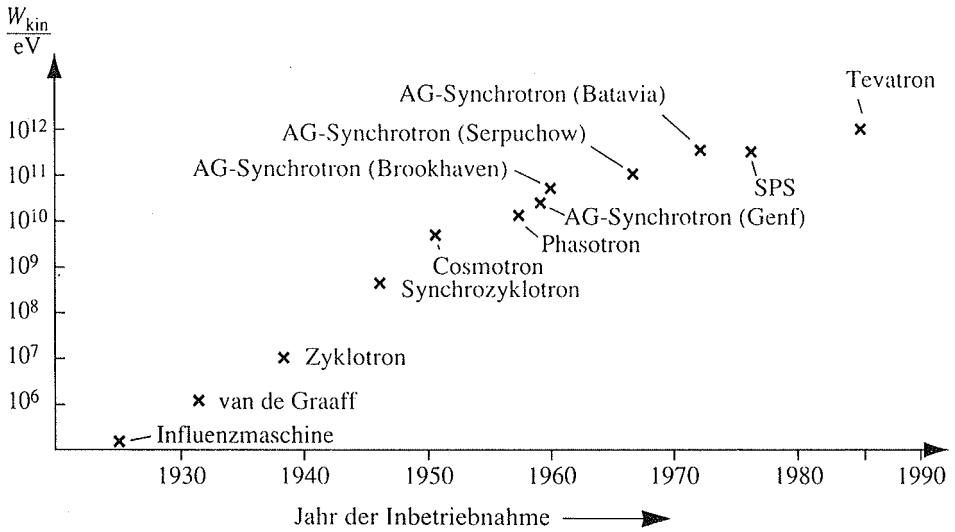


Abb. 3.12
Historische Entwicklung der Teilchenbeschleuniger bezüglich der erreichten Energien

Das Spektrum der Anwendungen energiereicher Strahlung ist sehr vielfältig. Beispiele sind:

- Atom- und Kernforschung sowie astronomische Weltraumerkundung;
- medizinische Diagnostik und Therapie;
- allgemeine Labor- und Industriemeßtechnik (u.a. Füllstand, Dicke, Dichte, zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Verhinderung elektrostatischer Aufladungen);
- Kernkraftwerke, Fusionsreaktoren;
- Kriegstechnik (Atom-, Wasserstoffbomben).

In der von der Strahlung durchdrungenen Materie werden sowohl chemische wie auch (in biologischer Materie) genetische Veränderungen hervorgerufen (besonders gefährlich sind sie in den Gonaden wegen der Vererbung). Aber auch elektrische Ladungen und Wärme werden induziert. Die Wirkungen der einzelnen Strahlungsarten auf den menschlichen Organismus sind recht unterschiedlich:

α-Strahlung dringt nur etwa 4 (1 MeV) bis 100 µm (8 MeV) in biologisches Gewebe ein. Da auch sonst die Reichweite gering ist (einige cm in Luft), wirkt sie nur bei nahezu unmittelbarem Kontakt. Dann ist sie aber wegen starker Absorption hochwirksam.

β-Strahlung existiert in einem sehr weiten Energiebereich. Sie dringt etwa 1 cm bei 2 MeV in biologisches Gewebe ein und wirkt daher bevorzugt bei direktem Kontakt. Infolge geringerer Absorption ist auch die Wirkung geringer als bei α-Strahlung.

γ-Strahlen besitzen als sehr kurze elektromagnetische Wellen ein hohes Durchdringungsvermögen, und so erfolgt ihre Absorption nahezu gleichmäßig im durchdrungenen Gewebe.

Neutronen-Strahlung ist ebenfalls stark durchdringend.

Um die unterschiedliche schädigende Wirkung der Strahlenarten erfassen zu können, wurde der experimentelle Bewertungsfaktor *H* eingeführt.

Bewertungsfaktor *H*	**Strahlungsart**
1	β-, γ- und Röntgenstrahlen
3	langsame (thermische) Neutronen mit etwa 0,025 MeV
5 bis 8	Neutronen mit etwa 0,02 bis 0,1 MeV
10	α-Strahlen, schnelle Protonen und Neutronen
20	Spaltprodukte

Auf die Probleme, die mit der Bestimmung des Bewertungsfaktors zusammenhängen, soll hier nicht eingegangen werden. Interessenten seien auf die Spezialliteratur verwiesen (z.B. Dörschel u.a. 1992).

Für den Nachweis und die Messung energiereicher Strahlung werden vorrangig folgende Methoden genutzt:

- Ionisationskammern messen die von der Strahlung freigesetzten Ladungsträger als Sättigungstrom;
- Geiger-Müller-Zählrohre bestimmen ebenfalls die erzeugten Ladungen. Sie werden vervielfacht und können dann gezählt werden. Dadurch erreichen die Zählrohre eine höhere Empfindlichkeit;
- in der Wilson-Kammer existiert mit Wasserdampf übersättigte Luft, in der hindurchgehende α- und β-Teilchen sichtbare (Kondensations-)Spuren hinterlassen (analog funktionieren auch die Blasenkammern);
- in Szintillationszählern trifft die Strahlung auf spezielle Leuchtstoffe und ruft dort Lichtblitze hervor, die beobachtet und gezählt werden können (auch elektronisch mittels Sekundärelektronenvervielfachern);
- Kernspuremulsionen und Photomaterialien zeigen nach Entwicklung die Spuren der durch sie hindurchgegangenen Strahlung.

Entsprechend den erst an der Wende zum 20. Jahrhundert einsetzenden Forschungen zu den energiereichen Strahlungen wurde auch die Entwicklung entsprechender Maßeinheiten erst im 20. Jahrhundert vorangebracht. Der radiologische Kongreß in Brüssel definierte 1910 als Einheit für die Aktivität das Curie als diejenige „Menge" Radon, die in einem abgeschlossenen Raum mit 1 g Radium im radioaktiven Gleich-

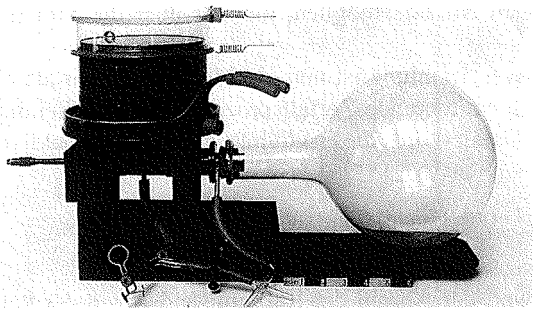


Abb. 3.13
Eine der ersten Wilson-Nebelkammern (aus Ledermann, Schramm 1990)

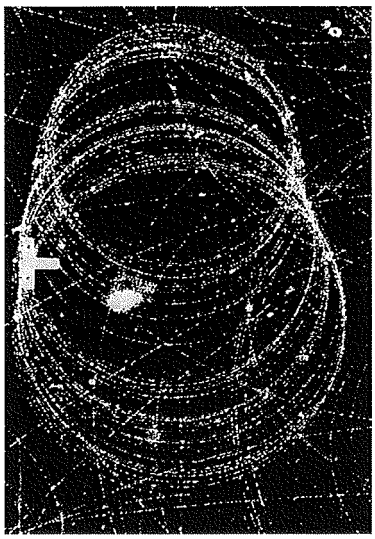


Abb. 3.14
Moderne Nebelkammeraufnahme, u.a. mit einer schraubenförmigen Elektronenspur (aus Lederman, Schramm 1990)

gewicht steht. Die Definition wurde 1930 auf alle Zerfallsprodukte des Radiums ausgedehnt und erhielt 1951 die heute gültige Form:

1 Curie (1 Ci) beträgt die Aktivität eines radioaktiven Präparates, in dem in einer Sekunde $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Kerne spontan zerfallen (1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Kernzerfälle/s).

Die Einheiten Röntgen und Rad wurden 1928 erstmals und 1953 in verbesserter Weise definiert. Die 1962 von der Internationalen Kommission für radiologische Einheiten und Messungen herausgegebenen Empfehlungen bezogen sich auf die rein physikalischen Größen und erlauben somit ein problemloses Einfügen der entsprechenden Einheiten in das SI. Der Übergang zu den physiologisch bewerteten Größenarten erfolgt dann durch die Einführung von Bewertungs- oder Qualitätsfaktoren, z.B. beim Übergang von der Energiedosis zum Dosisäquivalent.

3.9.1 Aktivität in Becquerel ([Aktivität] = Bq)

Ein großer Teil der energiereichen (radioaktiven) Strahlung entsteht durch den radioaktiven Zerfall von Atomkernen. Bei diesen Zerfallsprozessen werden unterschiedliche Strahlungen ausgesandt, je nach Art des Zerfalls. Die Zerfälle erfolgen spontan und statistisch, weswegen ja auch die Zeit, in der die Hälfte der aktiven Nuklide zerfallen ist, die Halbwertszeit, eine charakteristische Größe ist. Es sind dabei immer nur Aussagen über die Anzahl der zerfallenden Nuklide möglich, niemals über die Situation eines bestimmten Nuklids.

Im Sinne der Aussendung radioaktiver Strahlung ist nun ein Material aktiver als ein anderes, wenn bei ihm mehr Strahlung emittierende Zerfallsprozesse in der Zeiteinheit stattfinden als bei einem anderen. Damit wird die Aktivität A eines radioaktiven Materials durch die Beziehung

$$A = \left|\mathrm{d}N/\mathrm{d}t\right|$$

bestimmt, wobei $\mathrm{d}N$ den Erwartungswert der Anzahl der Kernumwandlungen der Substanz im Zeitelement $\mathrm{d}t$ bedeutet. Entsprechend wird auch die nach dem französischen Physiker Antoine Henri Becquerel (1852–1908) benannte Maßeinheit für die Aktivität definiert.

Ein Becquerel (1 Bq) ist die Aktivität einer Substanz, bei der 1 Kernumwandlung pro Sekunde erfolgt ($1\ \mathrm{Bq} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$).

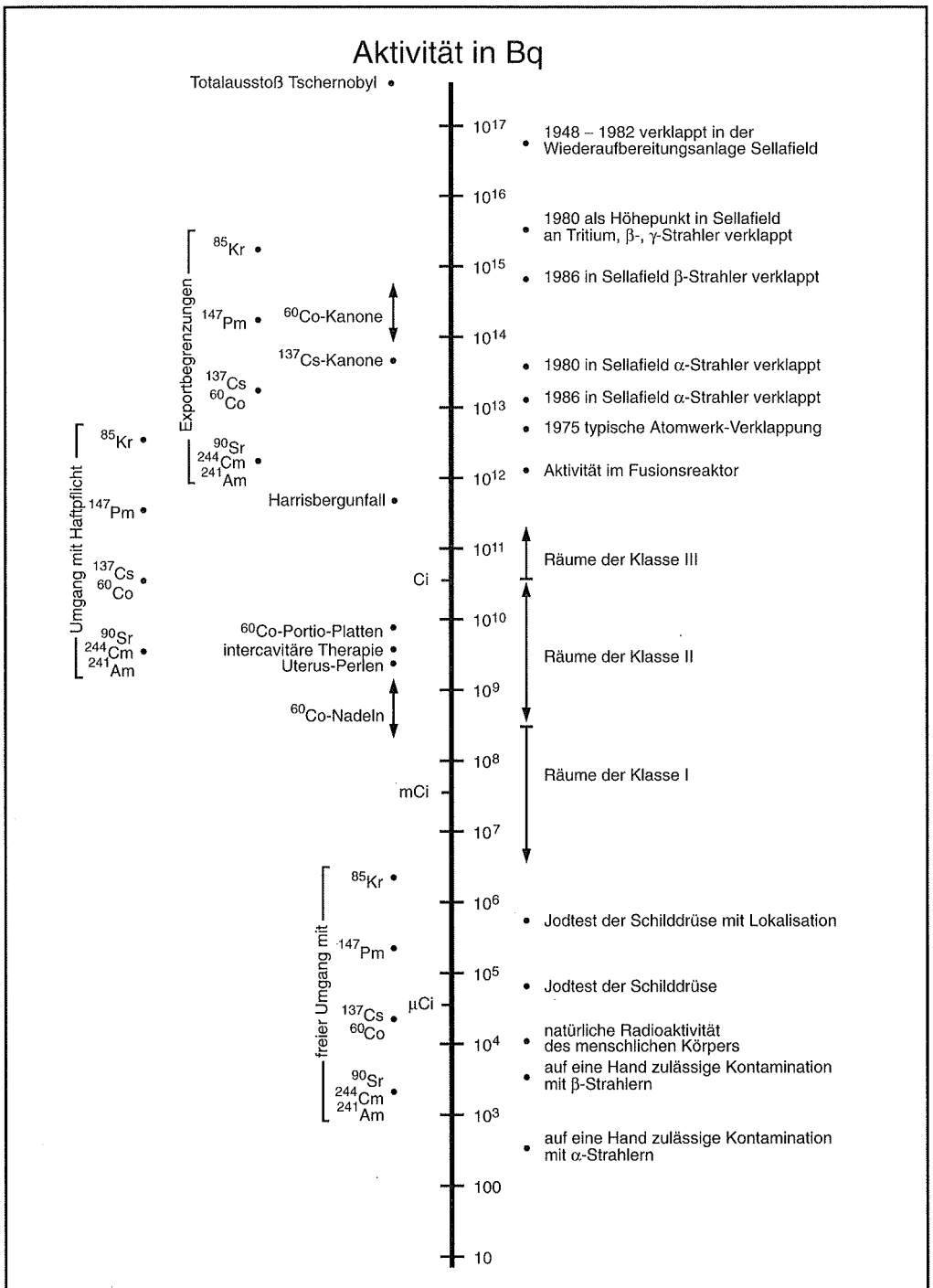
Es ist unbedingt darauf zu achten, für 1/s nicht die Einheit Hertz (vgl. Abschn. 3.2.1) anzugeben, diese ist hier wegen des statischen Geschehens unzulässig.

Die Messung der Aktivität kann über die Bestimmung der Zerfallsprozesse pro Zeiteinheit erfolgen, die sich mittels der Anzahl der emittierten Teilchen ermitteln läßt.

Auf der Skale sind Werte einiger ausgewählter Materialien, verseuchter Gebiete, für Raumbedingungen und für den Umgang mit radioaktivem Material aufgetragen. Zu beachten ist bei den Angaben zu Räumen und Gebieten, die sich nicht auf einen speziellen Zerfallsprozeß beziehen, daß die Angaben sich aus den verschiedensten dort auftretenden Kernumwandlungen zusammensetzen.

Am unteren Ende der Skale befinden sich die Aktivitäten, die bei natürlicher Radioaktivität auftreten und für die i.allg. ein freier Umgang zulässig ist. Beachtenswert ist die Tatsache, daß sich der Bereich der in der Medizin eingesetzten Strahlungsquellen (von Kobaltkanonen bis zu zeitweilig, vor allem zur Krebsbekämpfung, im Körper eingelegten Präparaten) weit über den Bereich, bei dessen Umgang eine Haftpflichtversicherung notwendig ist, hinausgehen und im Fall der Kobaltkanone im Bereich der Exportbegrenzungen für radioaktives Material liegen. Die Werte, für die Exportbeschränkungen gelten, werden i. allg. schon durch die Verklappung von radioaktiven Rückständen aus Kernkraftwerken erreicht.

Als ältere Maßeinheit ist für die Aktivität noch das Curie in Gebrauch: $1\ \mathrm{Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ \mathrm{Bq}$.


Aktivität in Bq
Totalausstoß Tschernobyl
10^{17}
1948 – 1982 verklappt in der Wiederaufbereitungsanlage Sellafield
10^{16}
1980 als Höhepunkt in Sellafield an Tritium, β-, γ-Strahler verklappt
10^{15}
1986 in Sellafield β-Strahler verklappt
10^{14}
1980 in Sellafield α-Strahler verklappt
10^{13}
1986 in Sellafield α-Strahler verklappt
1975 typische Atomwerk-Verklappung
10^{12}
Aktivität im Fusionsreaktor
Harrisbergunfall
10^{11}
Räume der Klasse III
Ci
10^{10}
Räume der Klasse II
10^{9}
10^{8}
Räume der Klasse I
mCi
10^{7}
10^{6}
Jodtest der Schilddrüse mit Lokalisation
10^{5}
Jodtest der Schilddrüse
μCi
10^{4}
natürliche Radioaktivität des menschlichen Körpers
auf eine Hand zulässige Kontamination mit β-Strahlern
10^{3}
auf eine Hand zulässige Kontamination mit α-Strahlern
100
10
Exportbegrenzungen
^{85}Kr
^{147}Pm
^{137}Cs
^{60}Co
^{90}Sr
^{244}Cm
^{241}Am
^{60}Co-Kanone
^{137}Cs-Kanone
Umgang mit Haftpflicht
^{85}Kr
^{147}Pm
^{137}Cs
^{60}Co
^{90}Sr
^{244}Cm
^{241}Am
^{60}Co-Portio-Platten
intercavitäre Therapie
Uterus-Perlen
^{60}Co-Nadeln
freier Umgang mit
^{85}Kr
^{147}Pm
^{137}Cs
^{60}Co
^{90}Sr
^{244}Cm
^{241}Am

3.9.2 Spezifische Aktivität in Becquerel pro Gramm ([spezifische Aktivität] = Bq/g)

In den meisten Anwendungs- und Entscheidungsfällen ist nicht die Aktivität einer vorliegenden Substanzmenge interessant, sondern die spezifische Aktivität, die sich auf eine Mengen- (Bq/kg) oder eine Volumeneinheit (Bq/m^3) bezieht. Dadurch werden Vergleiche der Wirksamkeit unterschiedlicher Substanzen möglich und es sind die Mengen verschiedener Stoffe angebbar, die aufgrund einer gleichen Aktivität eine gleiche Wirkung erwarten lassen.

Über die Dichte des Materials ist eine Umrechnung zwischen beiden Möglichkeiten der Angabe der spezifischen Aktivität leicht möglich. Für die in der Skale aufgetragenen Werte für feste und flüssige Substanzen können wegen des großen Zehnerpotenzbereichs und im Rahmen der Ablesegenauigkeit die Zahlenwerte für die auf die Masse und auf das Volumen bezogene spezifische Aktivität als praktisch gleich angesehen werden. Aus diesem Grund ist nur für die massebezogenen Werte eine Skale angegeben. Aus Gründen der Kompatibilität zu anderen Skalen beziehen wir hier die Werte auch auf das Gramm (entsprechend bedeutet dies auf Kubikdezimeter).

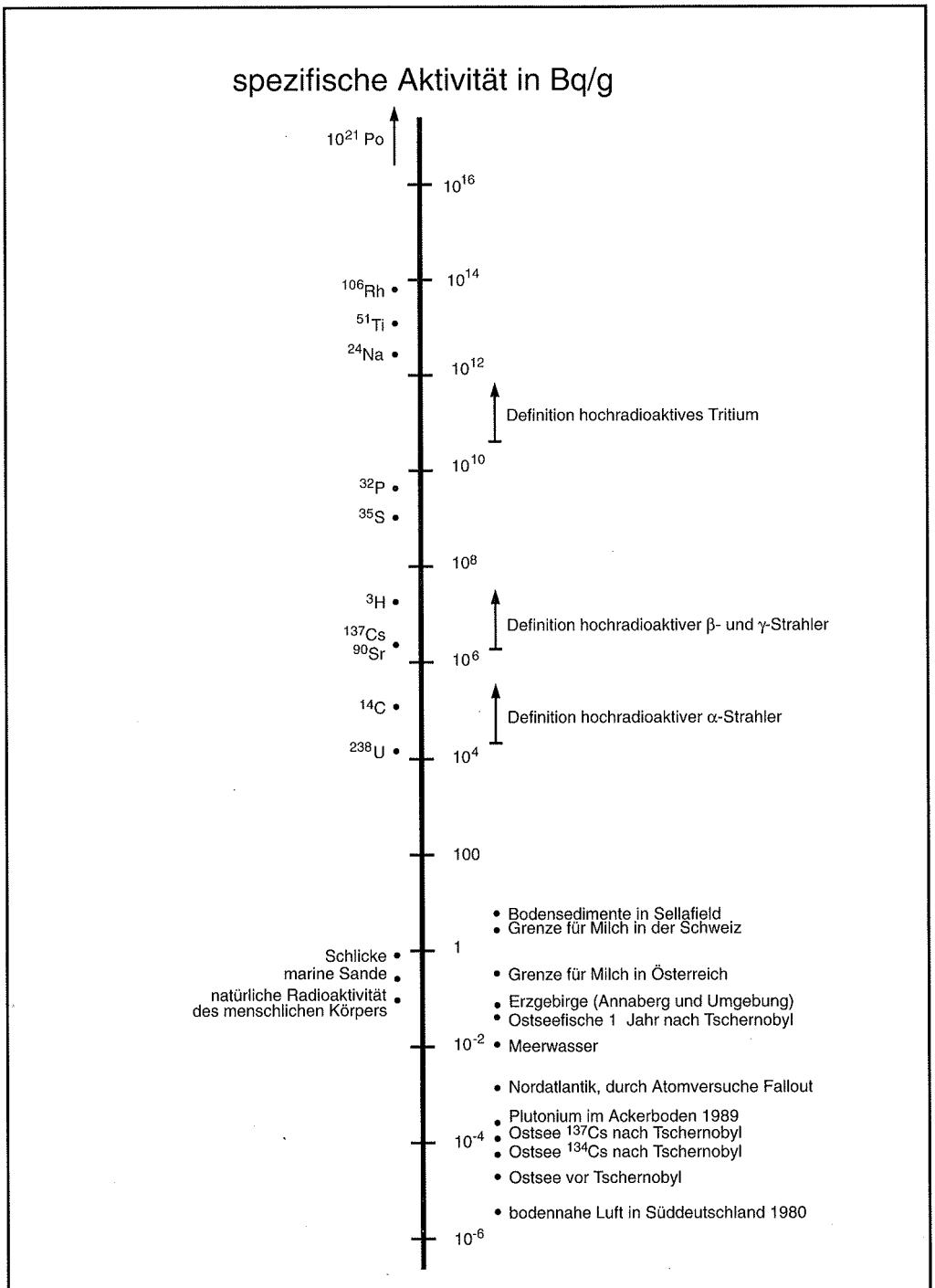
Ein Becquerel pro Gramm (1 Bq/g) ist die spezifische Aktivität, die 1 g einer Substanz der Aktivität 1 Bq besitzt.

Auf der Skale sind zunächst links die spezifischen Aktivitäten einiger Isotope aufgetragen. Deutlich setzen sich davon die Werte für durch Bestrahlung künstlich radioaktiv gewordener Schlicken wie auch die natürlicher hochaktiver mariner Sande ab. Auch die natürliche spezifische Aktivität des menschlichen Körpers ist um mehrere Zehnerpotenzen geringer als die der radioaktiven Nuklide.

Auf der rechten Seite sind die Definitionen für die verschiedenen hochradioaktiven Strahler angegeben, die bei Kenntnis der Zerfallsprozesse die entsprechende Einordnung der radioaktiven Elemente ermöglichen. Auch die deutlich von diesen Werten abgesetzten Werte, die die für unsere Gesundheit bedeutsamen Festlegungen betreffen, sind am Beispiel der Trinkmilch aufgetragen. Grundsätzlich sind alle Lebensmittel, die wir als Nahrung aufnehmen, immer etwas radioaktiv. Deshalb ist die Messung aller Stoffe auf schädigende Aktivität wichtig. Die Unsicherheit der Angaben und vor allem der Festlegung von Grenzwerten zeigt der relativ große Unterschied für die zulässige Aktivität von Trinkmilch in der Schweiz und in Österreich.

Wir leben alle ständig in einer natürlichen radioaktiven Umgebung. Es ist auffällig, daß die derzeitige durch Atombombenversuche und Kernkraftwerke hervorgerufene Aktivität im Verhältnis zur natürlichen Radioaktivität des menschlichen Körpers noch vergleichsweise gering ist. Ein Vergleich der Auswirkungen des Katastrophe von Tschernobyl am Beispiel der Ostsee zeigt aber den dadurch bewirkten Anstieg der spezifischen Aktivität um eine Zehnerpotenz. Berücksichtigt man noch die Masse der Ostsee, ergibt das eine beachtliche Aktivität, die hier durch menschliches Tun zusätzlich in die Umwelt gesetzt wurde.

Die Nachweisgrenze der meisten Meßverfahren liegt bei etwa 10 Bq/dm^3.


spezifische Aktivität in Bq/g
10^{21} Po
10^{16}
10^{14}
^{106}Rh
^{51}Ti
^{24}Na
10^{12}
Definition hochradioaktives Tritium
10^{10}
^{32}P
^{35}S
10^{8}
^{3}H
^{137}Cs
^{90}Sr
Definition hochradioaktiver β- und γ-Strahler
10^{6}
^{14}C
Definition hochradioaktiver α-Strahler
^{238}U
10^{4}
100
Bodensedimente in Sellafield
Grenze für Milch in der Schweiz
1
Schlicke
marine Sande
natürliche Radioaktivität des menschlichen Körpers
Grenze für Milch in Österreich
Erzgebirge (Annaberg und Umgebung)
Ostseefische 1 Jahr nach Tschernobyl
10^{-2}
Meerwasser
Nordatlantik, durch Atomversuche Fallout
Plutonium im Ackerboden 1989
Ostsee ^{137}Cs nach Tschernobyl
10^{-4}
Ostsee ^{134}Cs nach Tschernobyl
Ostsee vor Tschernobyl
bodennahe Luft in Süddeutschland 1980
10^{-6}

3.9.3 Energiedosis in Rad ([Energiedosis] = rd)

Trifft radioaktive Strahlung auf eine Substanz, so wird die Strahlungsenergie ganz oder teilweise auf die Substanz übertragen und löst dort Wirkungen aus. Wird die Wirkung des ionisierenden Teilchenstrahls auf die Masse der betroffenen Substanz bezogen, so kommt man zur Energiedosis, der die Substanz ausgesetzt ist. Hat man es mit Strahlungsarten zu tun, die nur indirekt über Sekundärteilchen ionisierend wirken (wie z.B. Neutronen) so wird anstelle der Energiedosis die Größe Kerma (**K**inetic **E**nergy **R**eleased in **Ma**tter) verwendet. Entsprechend wird die Energiedosis in J/kg gemessen. In der Dosimetrie, dem Gebiet, das sich mit der Bestimmung der Energiedosis beschäftigt, wurde eine eigene Bezeichnung für die SI-Maßeinheit eingeführt, die nach dem englischen Physiker Stephen Gray (1666–1736) benannt wurde.

Ein Gray (1 Gy) ist die Energiedosis (der Kerma), bei der eine Energie von 1 J in der Masse von 1 kg umgesetzt wird (1 Gy = 1 J/kg).

Weil den praktisch wichtigen Größen besser angepaßt, wird in den meisten Fällen noch die einem Hundertstel Gray entsprechende Einheit Rad verwendet:

1 Rad = 1 rd = 0,01 Gy.

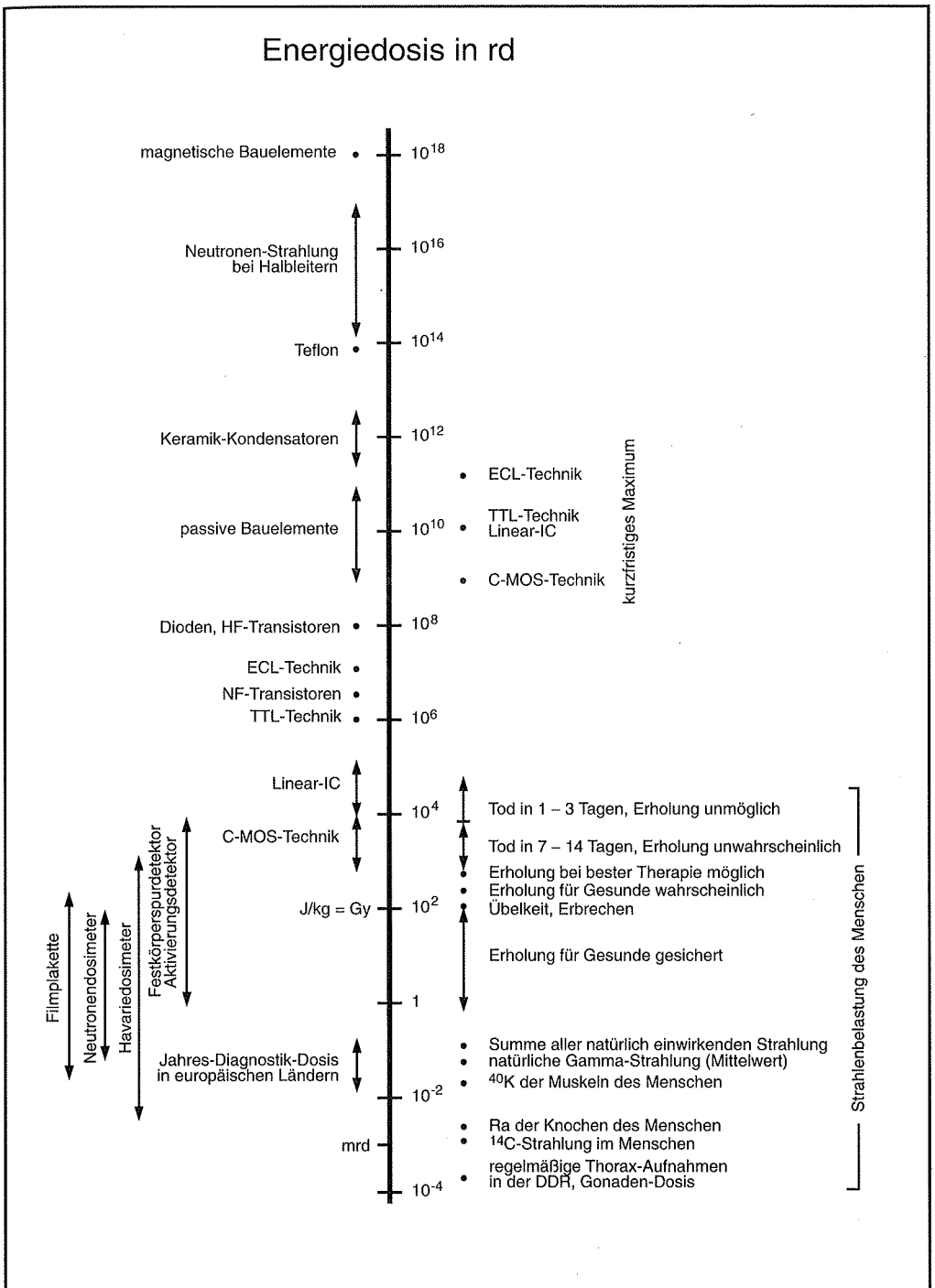
Aus diesen Gründen und der damit verbundenen besseren Vergleichbarkeit der Daten in der Skale mit anderswo gesammelten Werten haben wir uns entschlossen, für die Darstellung die Skale auch in Rad zu unterteilen.

Für die praktische Messung darf die, die untersuchte Substanz repräsentierende Massenprobe nicht zu klein sein, weil sich sonst stochastische Schwankungen bei der Energieumsetzung in ihr bemerkbar machen können. Wenn der bestrahlte Körper nicht homogen ist, dann sind auch die Dosisgrößen ortsabhängig.

Die direkte Messung der Energiedosis ist auf kalorimetrischem Wege möglich, weil die absorbierte Strahlung in den meisten Materialien als Wärmeenergie nachgewiesen werden kann. Nur wenige Prozente der Strahlung haben andere Wirkungen, wie z.B. ausgelöste chemische Prozesse. Diese stellen bei den Energiedosisbestimmungen einen systematischen Fehler dar. Als Kalorimetersubstanzen dienen z.B. Graphit und Wasser. Beim Einsatz von Mikrokalorimetern müssen Temperaturdifferenzen von 10^{-4} K erfaßt werden. Die Skale zeigt die Meßbereiche für andere gängige Meßmethoden.

Wenn die Reichweite der ionisierenden Sekundärteilchen klein gegenüber der Reichweite der Primärteilchen ist, dann ist die Dosisgröße Kerma der Energiedosis der Sekundärteilchen hinreichend genau proportional. Das gilt für Röntgenstrahlen bis zu einer Erzeugungsspannung von 400 kV und für Neutronenenergien bis zu 10 MeV. Bis zu diesen Grenzen sind die Werte für Energiedosis und Kerma gleich.

Die von der Strahlung auf die Substanz übertragene Energie ist natürlich von der Art der Substanz abhängig und damit auch die Energiedosis. Gleiche Massen unterschiedlicher Substanzen ergeben unter gleichen Bestrahlungsbedingungen damit unterschiedliche Werte für die Energiedosis. Das ermöglicht den Vergleich technischer


Energiedosis in rd
magnetische Bauelemente
10^{18}
Neutronen-Strahlung bei Halbleitern
10^{16}
Teflon
10^{14}
Keramik-Kondensatoren
10^{12}
ECL-Technik
passive Bauelemente
TTL-Technik
Linear-IC
10^{10}
C-MOS-Technik
kurzfristiges Maximum
Dioden, HF-Transistoren
10^{8}
ECL-Technik
NF-Transistoren
TTL-Technik
10^{6}
Linear-IC
10^{4}
C-MOS-Technik
Tod in 1 – 3 Tagen, Erholung unmöglich
Tod in 7 – 14 Tagen, Erholung unwahrscheinlich
Erholung bei bester Therapie möglich
Erholung für Gesunde wahrscheinlich
J/kg = Gy
10^{2}
Übelkeit, Erbrechen
Erholung für Gesunde gesichert
1
Filmplakette
Neutronendosimeter
Havariedosimeter
Festkörperspurdetektor
Aktivierungsdetektor
Jahres-Diagnostik-Dosis in europäischen Ländern
Summe aller natürlich einwirkenden Strahlung
natürliche Gamma-Strahlung (Mittelwert)
^{40}K der Muskeln des Menschen
10^{-2}
Ra der Knochen des Menschen
^{14}C-Strahlung im Menschen
mrd
regelmäßige Thorax-Aufnahmen in der DDR, Gonaden-Dosis
10^{-4}
Strahlenbelastung des Menschen

Produkte hinsichtlich ihrer Energieaufnahmefähigkeit bei Bestrahlung mit ionisierender Strahlung und damit Aussagen über ihre Einsatzmöglichkeit unter Strahlungsbedingungen. Andererseits hängt die umgesetzte Energie auch von der Art der Strahlung ab, d.h. eine Probe, die mit verschiedenen Strahlungsarten gleicher Energiestromdichte unter konstanten Bedingungen bestrahlt wird, führt zu unterschiedlichen Werten für die Energiedosis.

Die Skale zeigt Energiedosiswerte und die durch sie erzeugten Wirkungen. Bei den elektronischen Bauelementen sind das die Grenzen, die zu erhöhten Ausfallraten bzw. zum Totalausfall führen. Dabei werden gewöhnlich die Dauerbelastung und eine einmalige, kurzfristige Einwirkung der Strahlendosis unterschieden. Wird von der C-MOS-Technik und den analogen Schaltkreisen (Linear-IC) abgesehen, dann sind im Vergleich zum Menschen meist wesentlich höhere Energiedosen zulässig. Das ist für die technische Überwachung von Prozessen mit ionisierenden Strahlungen von großer Bedeutung.

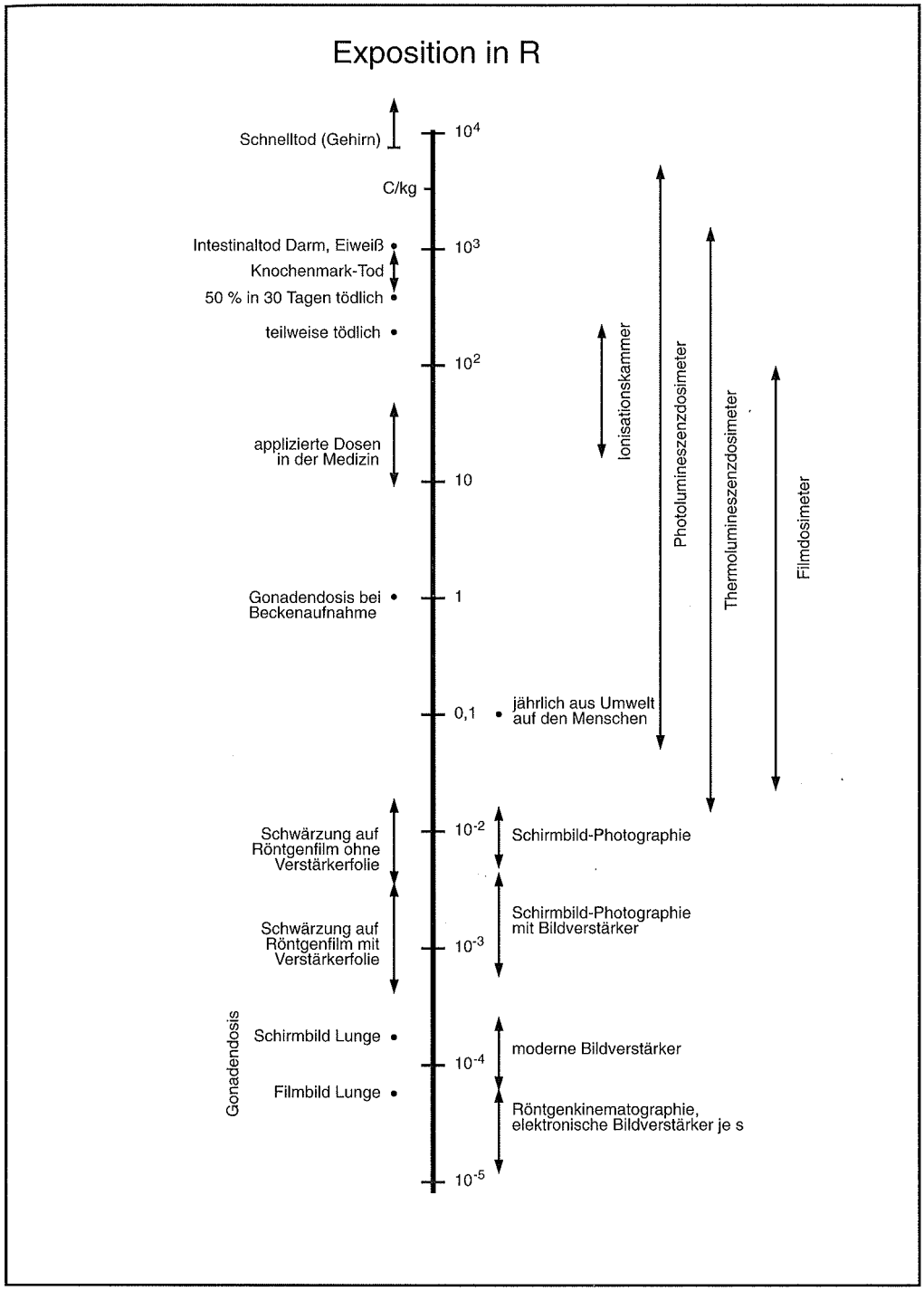
Im rechten unteren Skalenbereich sind die Dosiswerte und ihre Wirkungen auf den menschlichen Organismus aufgetragen. Neben den „Standard"-Belastungen durch übliche Diagnostik, infolge der Eigenstrahlung und der uns umgebenden natürlichen Radioaktivität sind für höhere Dosiswerte die Folgen und die Möglichkeiten zur Gesundung aufgetragen.

Wie wirksam heute eine schnelle Behandlung von Strahlenexponierten sein kann, zeigt das Beispiel eines Unfalls am 18.10.1958 in Vinca, Jugoslawien. Dort wurden 8 Personen von Neutronen- und γ-Strahlen mit Dosen zwischen 207 und 436 rd getroffen. Sechs Betroffene wurden sofort nach Paris transportiert und dort behandelt. Lediglich einer starb nach 4 Wochen. Eine Wissenschaftlerin der 5 Überlebenden gebar 1965 ein völlig gesundes Kind. Dieses Beispiel soll keineswegs eine Ungefährlichkeit radioaktiver (und damit auch kerntechnischer) Anlagen suggerieren. Das wird sofort klar werden, wenn man bedenkt, welche Energiedosen beim Reaktorunglück in Tschernobyl gemessen wurden. Ein ca. 500 m vom explodierenden Block entfernter Arbeiter hatte eine Dosis von 680 rd erhalten. Im in der Nähe gelegenen Ort Narodichi wurde bei Kindern eine Dosis von 30 bis zu 2500 rd festgestellt. Das macht deutlich, welche Gefahren für die menschliche Gesundheit von radioaktiven Strahlen ausgehen.

3.9.4 Exposition in Röntgen ([Exposition] = R)

Wie stark eine ionisierende Strahlung etwas beeinflußt, kann durch ihre ionisierende, also freie Ladungsträger erzeugende Wirkung in Luft charakterisiert werden. Diese Größe heißt Exposition (auch Ionendosis).

Ein Coulomb pro Kilogramm (1 C/kg) ist die Exposition einer Strahlung, die in 1 kg Luft Ionenpaare mit einer Gesamtladungsmenge von 1 C durch Ionisation unmittelbar oder mittelbar erzeugt.


Exposition in R
Schnelltod (Gehirn)
C/kg
Intestinaltod Darm, Eiweiß
Knochenmark-Tod
50 % in 30 Tagen tödlich
teilweise tödlich
applizierte Dosen in der Medizin
Gonadendosis bei Beckenaufnahme
jährlich aus Umwelt auf den Menschen
Schwärzung auf Röntgenfilm ohne Verstärkerfolie
Schwärzung auf Röntgenfilm mit Verstärkerfolie
Schirmbild Lunge
Filmbild Lunge
Gonadendosis
10^4
10^3
10^2
10
1
0,1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
Ionisationskammer
Photolumineszenzdosimeter
Thermolumineszenzdosimeter
Filmdosimeter
Schirmbild-Photographie
Schirmbild-Photographie mit Bildverstärker
moderne Bildverstärker
Röntgenkinematographie, elektronische Bildverstärker je s

Anstelle dieser SI-Einheit wurde früher die nach dem deutschen Physiker Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) benannte Einheit verwendet:

1 Röntgen = 1 R = $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C/kg.

Da diese Einheit den in der Praxis auftretenden Fragen besser angepaßt ist und wegen der besseren Vergleichbarkeit der Daten in der Skale mit anderswo gesammelten Werten haben wir uns entschlossen, für die Darstellung die Skale auch in Röntgen zu unterteilen.

Meßtechnisch kann die Exposition mit ausreichend großen Ionisationskammern absolut gemessen werden. Die großen Abmessungen sind erforderlich, weil die Absorption der Strahlung in der Luft des Kammervolumens erfolgen muß und nicht an den Wänden. Außerdem nutzt man die Tatsache aus, daß diese ionisierende Wirkung bevorzugt zur Schwärzung von photographischen Filmen beiträgt. Erinnert sei an den historischen Beginn der Untersuchung ionisierender Strahlung durch Becquerel 1896, der eine Schwärzung von nicht dem Licht ausgesetzten Photoplatten bemerkte, die einem Uransalz (Uranylkaliumsulfat) ausgesetzt wurden. Mittels eines einfachen Goldblatt-Elektroskops konnte er dann zeigen, daß diese von dem Uransalz ausgehende Strahlung auch Gase ionisieren kann. Heute wird diese Tatsache technisch vielfältig genutzt. Da Standardfilme aber meist nur sehr wenig radioaktive Strahlung absorbieren, werden sie für die Anwendung in der Strahlungsmeßtechnik und für Röntgenaufnahmen mit Verstärkerfolien versehen. Hierdurch erhöht sich zwar die Empfindlichkeit gegenüber dieser Strahlung wesentlich, gleichzeitig sinkt aber das Auflösungsvermögen des Filmes deutlich, was für die Anwendung bei Röntgenaufnahmen nachteilig ist. Im Bereich geringer Expositionen werden auch elektronische Meßverfahren mit den dann leicht möglichen elektronischen Verstärkungen genutzt.

Da sich von durch energiereiche Strahlung geschädigten Keimdrüsen besonders stark schädigende Wirkungen auf den Nachwuchs ergeben, erfolgt in der Medizin eine Bewertung der diagnostischen Verfahren oft auf der Basis der dabei auftretenden Gonaden-Dosis. Sie gibt an, wie groß der Strahlenanteil ist, der die Keimdrüsen trifft. Hierbei ist der für Frauen zulässige Wert fast immer doppelt so hoch wie der für den Mann. Infolge der logarithmischen Skale gehen diese Unterschiede dort praktisch verloren.

Einige der in der Skale aufgeführten Meßverfahren wirken integrierend und erreichen folgende Empfindlichkeiten:

Szintillationszähler	1 µR/h
Proportionalzählrohr	10 µR/h
Ionisationskammer	100 µR/h
Auslösezählrohr	500 R/h.

3.9.5 Äquivalentdosis in Sievert ([Äquivalentdosis] = Sv)

Bei der Bewertung der biologischen Wirksamkeit von Strahlungen muß beachtet werden, daß diese neben der Energie der Strahlung auch von der Strahlungsart abhängt. So verursacht z.B. α-Strahlung beim Durchgang durch eine Zelle im Mittel 10^4 bis $7 \cdot 10^4$ Ionisationsprozesse, β-Strahlung hingegen nur 10 bis 100. Diese Unterschiede in der biologischen Wirksamkeit von Strahlungen werden durch den biologischen Bewertungsfaktor H erfaßt und mittels diesem die Äquivalentdosis zur Charakterisierung der biologischen Wirksamkeit energiereicher Strahlungen eingeführt. Sie wird in der nach dem schwedischen Physiker Rolf Maximilian Sievert (1896–1966) benannten Einheit gemessen.

Ein Sievert (1 Sv) ist die Äquivalentdosis einer Strahlung, deren Energiedosis multipliziert mit dem diese Strahlung charakterisierenden Bewertungsfaktor den Wert 1 ergibt.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß aufgrund der Definition der Äquivalentdosis als Produkt aus Energiedosis und Bewertungsfaktor in den SI-Grundeinheiten sich die Maßeinheit J/kg ergibt, die auch für die Energiedosis gilt. Um schon durch die Maßeinheit deutlich zu machen, um welche physikalische Größe es sich bei der Angabe von bestimmten Werten handelt, wurden die unterschiedlichen speziellen Maßeinheiten eingeführt.

Die schädigende Wirkung energiereicher Strahlung für biologische Substanzen ist annähernd kumulativ. Die Strahlungsmengen über die Zeit addieren sich in ihrer Wirkung. So hat z.B. ein im Jahr dreimal nach Amerika Fliegender mit einer zusätzlichen Strahlenbelastung von 0,2 mSv zu rechnen, die noch unter der natürlichen Belastung von 0,7 mSv liegt. Die Piloten hingegen sind im Jahr nicht selten Strahlenbelastungen von über 5 mSv ausgesetzt und gehören damit schon zum Kreis der sogenannten strahlenexponierten Personen. Aus diesem Grund werden viele Strahlenbelastungen auf die Zeit bezogen. Um sinnfällige Aussagen zu erhalten, ist i. allg. das Jahr die Bezugsbasis.

Abweichungen von dieser Regel treten eigentlich nur bei ohnehin schon hohen Dosen auf. Selbst von diesen radikaleren Schäden kann sich der menschliche Körper oft noch im gewissen Umfang erholen. Hierauf beruhen u.a. viele Erfolge in der Krebsbekämpfung. Dabei werden die relativ hohen Dosen in genau bestimmten Zeitabständen verabreicht.

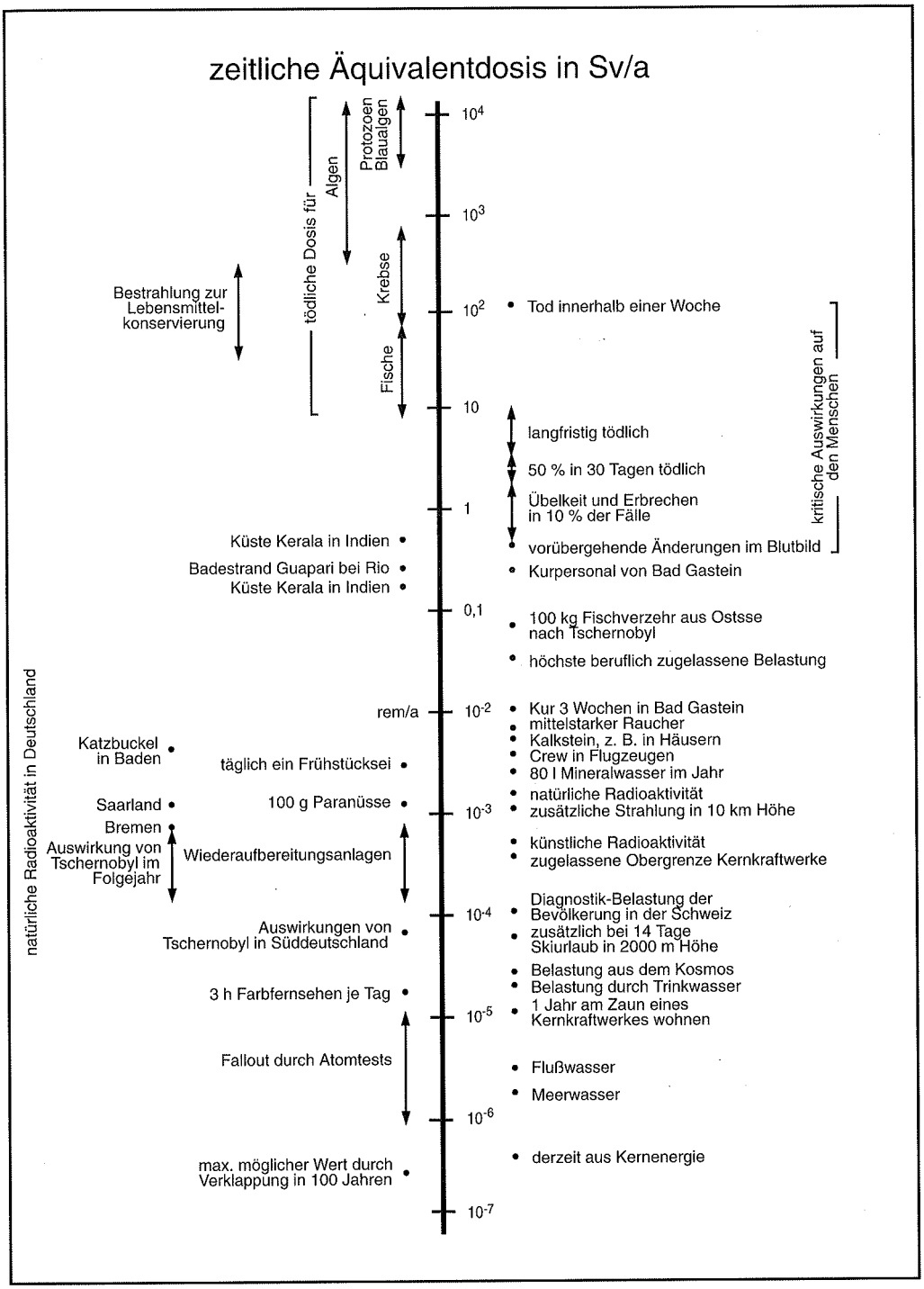
Die Angabe der auf eine Zeiteinheit bezogenen Äquivalentdosis entspricht einer Äquivalentdosisleistung. In der Skale sind diese, bezogen auf ein Jahr angegeben. Ein Bezug auf die SI-Einheit s widerspräche zu stark den praktisch üblichen Angaben und würde eine Vergleichbarkeit mit anderen Datensammlungen erschweren.

Die maximal für den Menschen zulässige Äquivalentdosisleistung wurde mit 50 mSv/a festgelegt. Dieser Wert ist jedoch auch nur dann zulässig, wenn außerdem die folgenden Grenzbedingungen eingehalten werden:

- 30 mSv in jeweils 13 Wochen, und
- eine maximale Gesamtäquivalentdosis von 50 · (Alter/Jahre – 18) mSv.

Für die Äquivalentdosis ist auch noch die Einheit Rem (**R**oentgen **E**quivalent **M**an) üblich. Die Umrechnung erfolgt gemäß

$$1\ \text{Rem} = 1\ \text{rem} = 0{,}01\ \text{Sv}.$$


zeitliche Äquivalentdosis in Sv/a
tödliche Dosis für
Protozoen Blaualgen
Algen
Krebse
Fische
Bestrahlung zur Lebensmittel-konservierung
10^4
10^3
10^2
10
1
$0,1$
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
Tod innerhalb einer Woche
langfristig tödlich
50 % in 30 Tagen tödlich
Übelkeit und Erbrechen in 10 % der Fälle
vorübergehende Änderungen im Blutbild
kritische Auswirkungen auf den Menschen
Küste Kerala in Indien
Badestrand Guapari bei Rio
Küste Kerala in Indien
Kurpersonal von Bad Gastein
100 kg Fischverzehr aus Ostsee nach Tschernobyl
höchste beruflich zugelassene Belastung
rem/a
Kur 3 Wochen in Bad Gastein
mittelstarker Raucher
Kalkstein, z. B. in Häusern
Crew in Flugzeugen
80 l Mineralwasser im Jahr
natürliche Radioaktivität
zusätzliche Strahlung in 10 km Höhe
künstliche Radioaktivität
zugelassene Obergrenze Kernkraftwerke
Diagnostik-Belastung der Bevölkerung in der Schweiz
zusätzlich bei 14 Tage Skiurlaub in 2000 m Höhe
Belastung aus dem Kosmos
Belastung durch Trinkwasser
1 Jahr am Zaun eines Kernkraftwerkes wohnen
Flußwasser
Meerwasser
derzeit aus Kernenergie
Katzbuckel in Baden
täglich ein Frühstücksei
Saarland
100 g Paranüsse
Bremen
Auswirkung von Tschernobyl im Folgejahr
Wiederaufbereitungsanlagen
Auswirkungen von Tschernobyl in Süddeutschland
3 h Farbfernsehen je Tag
Fallout durch Atomtests
max. möglicher Wert durch Verklappung in 100 Jahren
natürliche Radioaktivität in Deutschland

3.10 Sonstige Größen

Dieser Abschnitt vereint verschiedene Skalen, die keinen inneren Zusammenhang besitzen. Die entsprechenden Maßeinheiten sind trotz ihrer großen praktischen Bedeutung nicht im SI erfaßt (Informationsmaße) oder sie sind nicht in die bisherigen Hauptabschnitte einzuordnen, obwohl sie von praktischem Interesse sind. Für einige Größen wurden keine Skalen angegeben, weil die verfügbare Datenmenge keine sinnfällige Darstellung zuläßt. Dies betrifft einmal die Grundgröße Stoffmenge (sie wurde in Abschn. 3.6 behandelt) und den Raumwinkel (hier werden in Abschn. 3.10.6 einige Ausführungen gemacht).

Häufig werden bei praktischen Anwendungen Größen mit den Zusätzen -anteil, -beiwert, -faktor, -maß, -pegel, -quote, -verhältnis oder -zahl verwendet. Hierbei handelt es sich meist um Werte mit der „Einheit" 1, oft durch Verhältnisbetrachtungen gewonnen. Beispiele sind Dämpfungsmaß, Fehlerquote, Frequenzverhältnis, Kopplungsgrad, Leistungsfaktor, Leistungspegel, Massenanteil, Massenverhältnis, Nußelt-Zahl, Prandtl-Zahl, Rauschmaß, Reibungszahl, Sicherheitsbeiwert, Volumenanteil, Windungszahl oder Wirkungsgrad. Im allgemeinen werden diese Werte experimentell bestimmt und in entsprechenden Tabellensammlungen zusammengefaßt. Wegen der großen allgemeinen Bedeutung, auch im täglichen Leben, wurde für den Wirkungsgrad eine Skale aufgenommen.

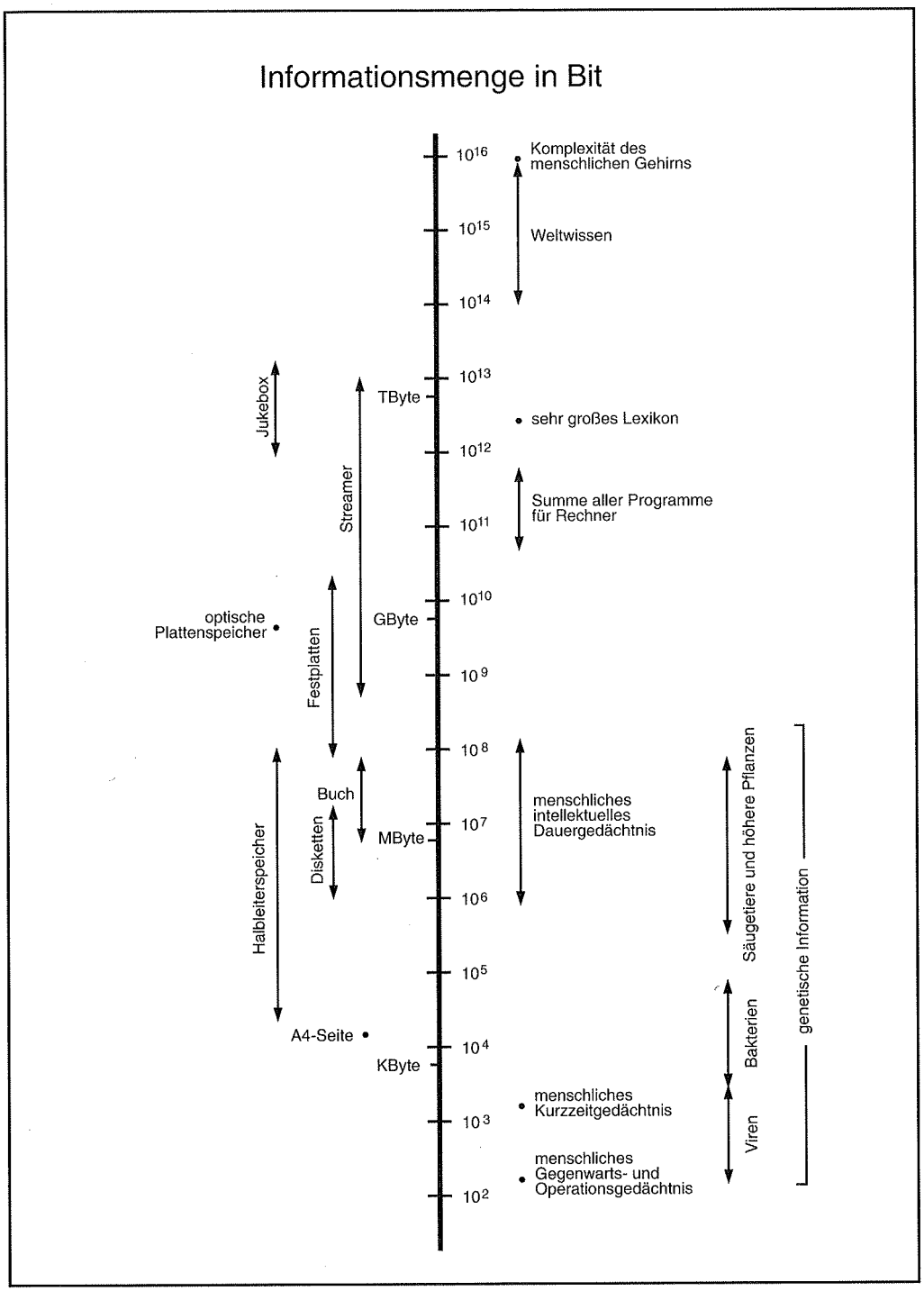
3.10.1 Informationsmenge in Bit ([Informationsmenge] = Bit)

Informationen begegnen uns ständig in den verschiedensten Formen. Vielfach wird heute vom Zeitalter der Information gesprochen. Der Philosoph Walther Zimmerli spricht davon, daß die Beherrschung der Informationstechnologie eine neue Kulturtechnik wird (ist). Der gesteuerte Informationsfluß soll bei vielen Prozessen den Stoff- und Energiefluß ersetzen, eine unter dem Blickwinkel der Ökologie dringende Notwendigkeit. Dies und die zunehmende Menge der Informationen macht ein eigenständiges Informationsmanagement notwendig. Mit der Möglichkeit, diese Informationen elektronisch zu speichern und zu verarbeiten, wurde die Frage nach einem Maß zum Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Informationstechnologien akut. Ausgehend von der technischen Realisierung der elektronischen Informationsspeicherung und -verarbeitung, die auf der binären Logik der Zustände „Signal" (Ja) und „kein Signal" (Nein) beruht, wurde der Zweierschritt bei der Festlegung des Maßes zugrundegelegt.

Ein Bit (1 bit) ist das Kennwort für den Zweierlogarithmus des Verhältnisses zweier Feldgrößen F_1 und F_2:

$$1\ \text{bit} = \text{ld}\ \frac{F_1}{F_2}\ .$$

Zuweilen wird 1 bit auch für den Zweierschritt selbst gebraucht.


Informationsmenge in Bit
10^{16}
10^{15}
10^{14}
10^{13}
10^{12}
10^{11}
10^{10}
10^{9}
10^{8}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
10^{3}
10^{2}
Komplexität des menschlichen Gehirns
Weltwissen
sehr großes Lexikon
Summe aller Programme für Rechner
menschliches intellektuelles Dauergedächtnis
menschliches Kurzzeitgedächtnis
menschliches Gegenwarts- und Operationsgedächtnis
TByte
GByte
MByte
KByte
Jukebox
Streamer
Festplatten
optische Plattenspeicher
Halbleiterspeicher
Disketten
Buch
A4-Seite
Säugetiere und höhere Pflanzen
Bakterien
Viren
genetische Information

Die Bezeichnung ist von der englischen Bezeichnung binary digit abgeleitet. Es soll hier auf die Besonderheit hingewiesen werden, daß nicht von Maßeinheit, sondern von Kennwort gesprochen wird. Solche Kennwörter werden für unbenannte Zahlen vergeben, die als Logarithmus eines Quotienten zweier Größen gleicher Art entstehen. Sie werden dann wie Einheiten mit selbständigem Namen behandelt.[1]

Die Informationstheorie ist ein noch junges Gebiet, dessen Beginn als ein Zweig der Wahrscheinlichkeitstheorie mit den von C.E. Shannon in den Jahren 1947/48 erschienenen Arbeiten (die er schon 1940 zur Publikation eingereicht hatte!) zu datieren ist. Anfänglich als „mathematische Kommunikationstheorie" ein Teil der angewandten Wahrscheinlichkeitstheorie, ist der Begriff der Information in den fünfziger Jahren zu einem Zentralbegriff der Kybernetik geworden, und heute reicht die Informationstheorie weit über ihre mathematischen Anfänge hinaus und ist zu einer eigenständigen Wissenschaftsdisziplin, insbesondere der Nachrichtentechnik, geworden. Für weitere Details sei z.B. auf die Bücher von Völz verwiesen.

Ausgehend von einfachen Fragestellungen sollen hier einige wichtige Gedankengänge verdeutlicht werden.

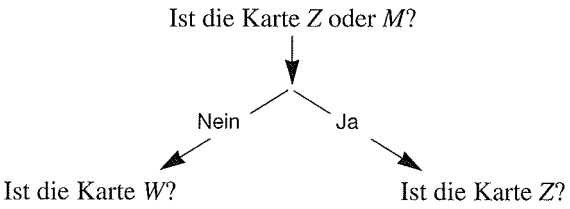
Shannon geht von einem Übertragungsmodell aus, bei dem die Information im *Sender* vorhanden ist und über einen, eventuell gestörten, *Kanal* zum *Empfänger* gelangt. Diese Übertragung soll im technischen Sinn möglichst effektiv gestaltet werden. Um dies zu untersuchen, betrachtete Shannon die Statistik der zu übertragenden Signale und Zeichen, wie z.B. die Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit von Buchstaben bei Texten.

Betrachten wir ein Ratespiel mit einem Skatblatt, welches dazu in vier Klassen geteilt wird:

Klasse	Charakteristik	Zahl der Karten	Wahrscheinlichkeit, eine Karte dieser Klasse zu erraten
Z	Karten mit Zahlen	16	0,50
M	männliche Karten: Buben, Könige	8	0,25
W	weibliche Karten: Damen	4	0,125
A	Asse	4	0,125

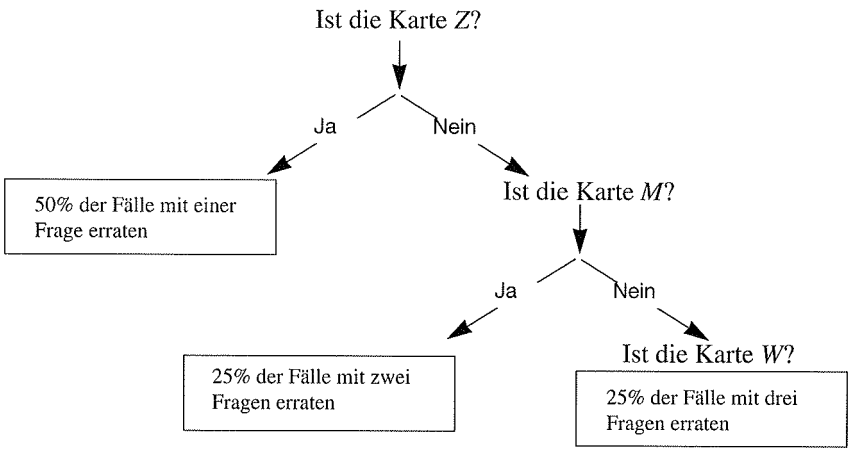
Ein Spieler – der Sender – zieht aus dem gemischten Kartenstapel eine Karte, zeigt sie aber nicht. Der zweite Spieler – der Empfänger – hat nun zu raten, zu welcher Klasse die gezogene Karte gehört (die Klassenzugehörigkeit ist die Information, die die Karte trägt). Er kennt nur die Wahrscheinlichkeiten und darf beliebige, mit Ja oder Nein beantwortbare, Fragen an den Sender stellen. Wenn die Karte erraten ist, wird sie wieder zum Stapel gelegt, dieser neu gemischt und das Spiel wiederholt. Das Ziel des Empfängers ist es, mit möglichst wenig Fragen möglichst viele Kartenklassen zu erraten (nachrichtentechnische Optimierung). Zu diesem Zweck entwickelt der Empfänger eine Fragestrategie (technisch: Codierung). Sie kann z.B. so aussehen (Codebaum):

[1] Andere solche Kennwörter sind z.B. das Neper ($\mathrm{Np} = \ln(U_1/U_2)$) und das Bel ($\mathrm{B} = \lg(P_1/P_2)$), wobei bei letzterem der zehnte Teil, das Dezibel (dB) bevorzugt wird.



So wird mit 2 Fragen immer eine Kartenklasse erraten.

Jede Ja/Nein-Frage entspricht genau einem Bit. Die Fragestrategie leistet also 2 Bit je Kartenklasse. Mit der Informationstheorie läßt sich nun aber berechnen, daß theoretisch nur 1,75 Fragen pro Klasse notwendig sind. Folglich liegt nicht die bestmögliche Fragestrategie (Code) vor. Die optimale Strategie sieht folgendermaßen aus:



Die Summe über alle Karten ergibt im statistischen Mittel genau die 1,75 Fragen ($0{,}5 \cdot 1 + 0{,}25 \cdot 2 + 0{,}25 \cdot 3 = 1{,}75$). Auffällig ist, daß die seltenen Fälle mit drei und die häufigen Fälle nur mit einer Frage erraten werden.

Verallgemeinert betrachten wir nun n unterscheidbare Zeichen, die Wahrscheinlichkeit für das i-te Zeichen betrage p_i ($i = 1, 2, ..., n$). Für den theoretischen Grenzwert der mittleren Information in Bit/Zeichen gilt die Beziehung

$$H = -\sum_i p_i \cdot \mathrm{ld}(p_i),$$

wobei ld den Logarithmus zur Basis 2 bezeichnet. H wird wegen der Analogie zur auf Ludwig Boltzmann (1844–1906) zurückgehenden Formel für die thermodynamische Entropie

$$S = k \cdot \log(W)$$

entsprechend einem Vorschlag von Norbert Wiener (1894–1964) ebenfalls Entropie bzw. Negentropie genannt. In Boltzmanns Formel ist W die Wahrscheinlichkeit des Systemzustandes und k die Boltzmann-Konstante. Bezüglich des Zusammenhanges beider Formeln gab es umfangreiche theoretische Diskussionen. Heute läßt sich zeigen, daß sie für Grenzfälle ineinander übergehen.

Die Shannonsche Formel stellt die zentrale Formel der Informationstheorie dar. Ihre theoretische Herleitung ist mit vielen Grundlagenproblemen der Informationstheorie verbunden. Mit dieser Formel wurde auch der theoretische Wert von 1,75 Bit/Kartenklasse in unserem Beispiel berechnet.

Die Shannon-Entropie ist auch auf kontinuierliche Signale der Analogtechnik übertragbar. Dann müssen aber statt der Zeichen Nutz- und Störsignale betrachtet werden.

Die Definition der *Speicherkapazität* in Bit weicht von der Shannonschen Betrachtung ab. Hier werden einfach nur die, der Boolschen Algebra unterliegenden, existierenden Speicherzellen gezählt. Jede Zelle, die zwei Zustände (Zweierschritt) annehmen kann (0 / 1; Ja / Nein; Strom / kein Strom; Loch / kein Loch usw.) besitzt die Speicherkapazität 1 Bit. Zur Zusammenfassung von mehreren Zellen stehen Vorsätze und weitere Begriffe bereit:

1 nibble	= 4 Bit
1 Byte	= 8 Bit
1 digit	= (Zahl-)Zeichen aus einem Zeichenvorrat
1 Wort	hängt vom Rechnertyp ab; hauptsächlich existieren Längen von 8, 16, 32, 64 Bit
1 Block	bei Datenübertragung und Speicherung häufig 256, 512, 1024 oder 2048 Bit.

Man beachte, daß die entsprechenden Vielfachen der einzelnen Einheiten wegen des zugrundeliegenden dualen Zahlsystems immer Potenzen von 2 darstellen. Für Bit und Byte werden oft noch besondere Vorsätze verwendet:

1 Kbit	= 1024 Bit	$= 2^{10}$ Bit (Achtung, großes „K“)
1 Mbit	= 1 048 576 Bit	$= 2^{20}$ Bit (neuerdings Rückkehr zu 10^6)
1 GBit	= 1 073 741 824 Bit	$= 2^{30}$ Bit (häufig auch 10^9)
1 TBit	$= 1{,}099\,512 \cdot 10^{12}$ Bit	$= 2^{40}$ Bit (häufig auch 10^{12}).

In den letzten Jahren wurden im anglo-amerikanischen Sprachraum KB, MB, GB und TB eingeführt. Hierbei entsprechen die Vorsätze meist den dekadischen des SI und B steht für Byte.

Vielfach werden die Ergebnisse der Speicherung und Datenübertragung auch auf das menschliche Gedächtnis, tierische Gehirne und auf die Genetik übertragen. Dabei werden nur die formalen Aspekte und keine Inhalte erfaßt. Das ist letztlich auch das Ziel dieser Betrachtung, wenn Leistungsfähigkeiten hinsichtlich der Informationsverarbeitung auf der Basis Boolscher Algebren verglichen werden sollen. Die Spezifik der Informationsverarbeitung z.B. im menschlichen Gehirn ist aber mit diesem Modell nicht adäquat zu erfassen, so daß bei dieser Betrachtungsweise wichtige Qualitäten der

unterschiedlichen Informationsverarbeitungstechnologien verlorengehen. Das ist bei der Betrachtung der in der Skale verglichenen Informationsmengen zu berücksichtigen. In Abbildung 3.15 haben wir die Leistungen unseres Gedächtnisses für Zufallsinformationen dargestellt. Das Modell ist durch eine Vielzahl von Untersuchungen gesichert und gibt mögliche Zusammenhänge und Einflüsse wider.

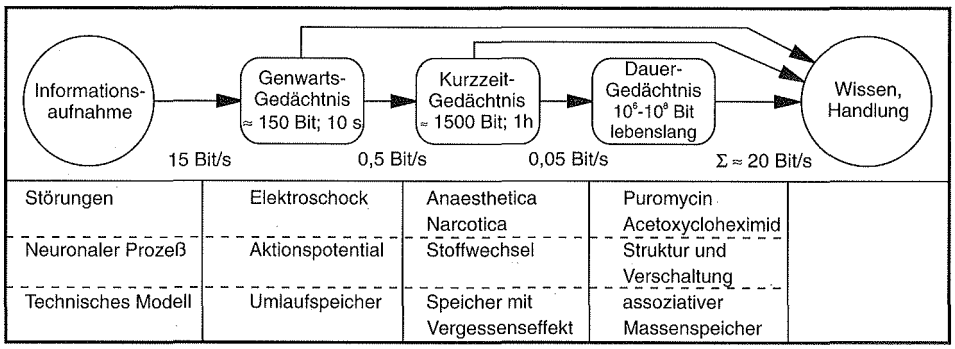


Abb. 3.15
Informationsflüsse für unser Gedächtnis bei rein zufälliger Information

3.10.2 Datenfluß in Bit pro Sekunde ([Datenfluß] = bit/s)

Entscheidend für die Geschwindigkeit bei Prozeßsteuerungen und bei der Verarbeitung von Informationen ist der Datenfluß, der angibt, wieviel Bit pro Sekunde über eine Leitung/Verbindung wirklich übertragen werden können.

Ein Bit pro Sekunde (1 bit/s) ist der Datenfluß, der die Informationsmenge von 1 bit innerhalb von 1 s überträgt.

Die theoretische Obergrenze einer Datenübertragung läßt sich ebenfalls aus der Shannonschen Informationstheorie bestimmen. Dabei geht die Bandbreite B des Übertragungskanals zusätzlich in die Betrachtung ein. Diese Größe gibt an, welche Informationsmenge über die Verbindung übertragen werden kann. Je größer die Bandbreite ist, um so größer ist der Datenfluß über die Verbindung. Damit ergibt sich die Kanalkapazität C eines Übertragungskanals zu

$$C = 2 \cdot B \cdot H.$$

Die Skale weist die Daten für die wichtigsten technischen Informationsübertragungskanäle aus. Hier mußte aufgrund der Datenfülle eine strenge Auswahl getroffen werden.

Die Leistungen von Rechnern werden in der Praxis auf unterschiedliche Weise, z.B. mit Benchmarks oder in Operationen je Sekunde gemessen. Diese so erhaltenen Werte erlauben eine brauchbare Übertragung auf Bit/Sekunde und führten damit zu groben Richtwerten in der Skale.

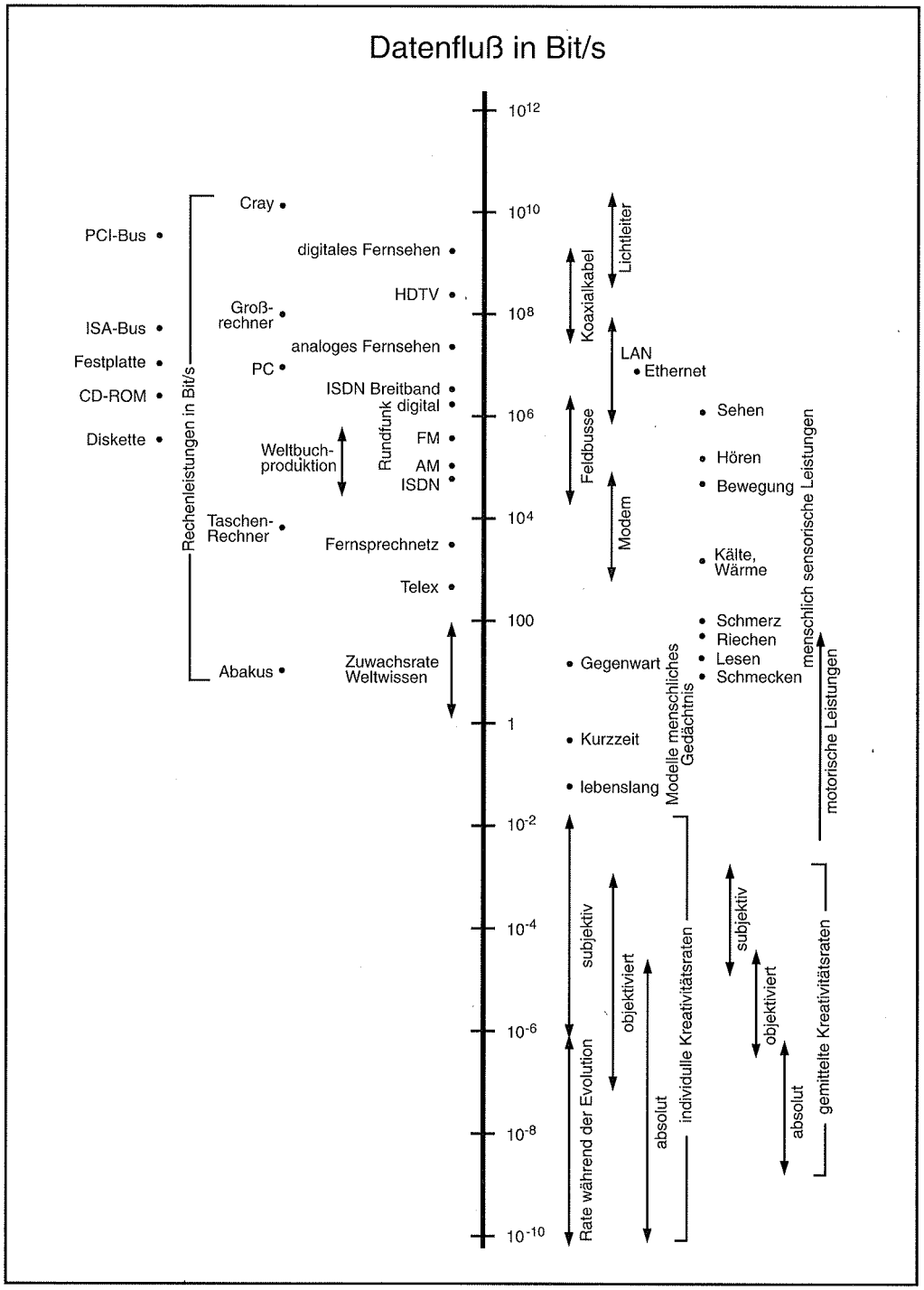
Für die biologischen Daten gilt hier auch das bei der Informationsmenge Gesagte, sie können nur als grobe Richtwerte für die entsprechenden Leistungen angesehen werden und sind nicht an den Kontext gebunden. So beziehen sich die Gedächtnisleistungen des Menschen auf sinnleere Silben bzw. Zufallszahlen. Die Werte für die Kreativität sind noch erheblich unsicher und das, obwohl sie aus einer Vielzahl von typischen Leistungen, wie Nobelpreis, Lernfähigkeit usw., ermittelt wurden. Bei den menschlich sensorischen Leistungen ist auffällig, daß der Datenfluß vom Sehen zum Hören und dann zum Riechen und Schmecken deutlich abnimmt. Darin dürfte eine Erklärung für die unterschiedliche Bedeutung der einzelnen Sinne im menschlichen Überleben liegen. Interessant ist auch der Vergleich der bei diesen Sinnesleistungen vorliegenden Datenflüsse zu den bei den in der Computertechnik realisierten Datenflüssen. Das zeigt die enorme Leistungsfähigkeit des menschlichen Organismus, da er ja die verschiedenen Datenflüsse simultan über ein ganzes Leben realisiert.

Weitere Maßeinheiten sind:

1 Baud = 1 Bd ≠ 1 bit/s (Schritte je Sekunde, kann 0,5 bis 5 bit/s je nach Codierung entsprechen)

1 Byte/s = 8 bit/s

1 mips = 1 million instructions per second
(Rechenoperationen pro Sekunde bei 70% Additionen und 30% Multiplikationen).


Datenfluß in Bit/s
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
100
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
Rechenleistungen in Bit/s
PCI-Bus
ISA-Bus
Festplatte
CD-ROM
Diskette
Cray
Groß-rechner
PC
Taschen-Rechner
Abakus
digitales Fernsehen
HDTV
analoges Fernsehen
ISDN Breitband
Rundfunk digital
FM
AM
ISDN
Fernsprechnetz
Telex
Weltbuch-produktion
Zuwachsrate Weltwissen
Koaxialkabel
Lichtleiter
LAN
Ethernet
Feldbusse
Modem
Gegenwart
Kurzzeit
lebenslang
Modelle menschliches Gedächtnis
Sehen
Hören
Bewegung
Kälte, Wärme
Schmerz
Riechen
Lesen
Schmecken
menschlich sensorische Leistungen
motorische Leistungen
Rate während der Evolution
subjektiv
objektiviert
absolut
individulle Kreativitätsraten
subjektiv
objektiviert
absolut
gemittelte Kreativitätsraten

3.10.3 Lineare Speicherdichte in Bit pro Meter ([lineare Speicherdichte] = bit/m)

Für die Speicherung von Informationen ist es wichtig zu wissen, welche Informationsmenge pro einer entsprechenden Einheit gespeichert werden kann. Da die Speicherung entsprechend den technischen Lösungsmöglichkeiten auf Oberflächen oder in Volumina erfolgt, ist der globale Bezug auf diese Einheiten von Interesse. Bei genauerer Betrachtung der technischen Lösungen der Datenspeicherung zeigt sich aber, daß die meisten Speichermedien linear entlang einer Spur beschrieben und gelesen werden. Darum ist es oft auch von Interesse, die lineare Speicherdichte zu kennen.

1 Bit pro Meter (1 bit/m) ist die Speicherdichte, die die Informationsmenge von 1 Bit längs der Weglänge von 1 m aufnehmen kann.

Für eine genauere Betrachtung ist es notwendig, zwischen spur-, punkt- und zeichenorientierten Speichersystemen zu unterscheiden.

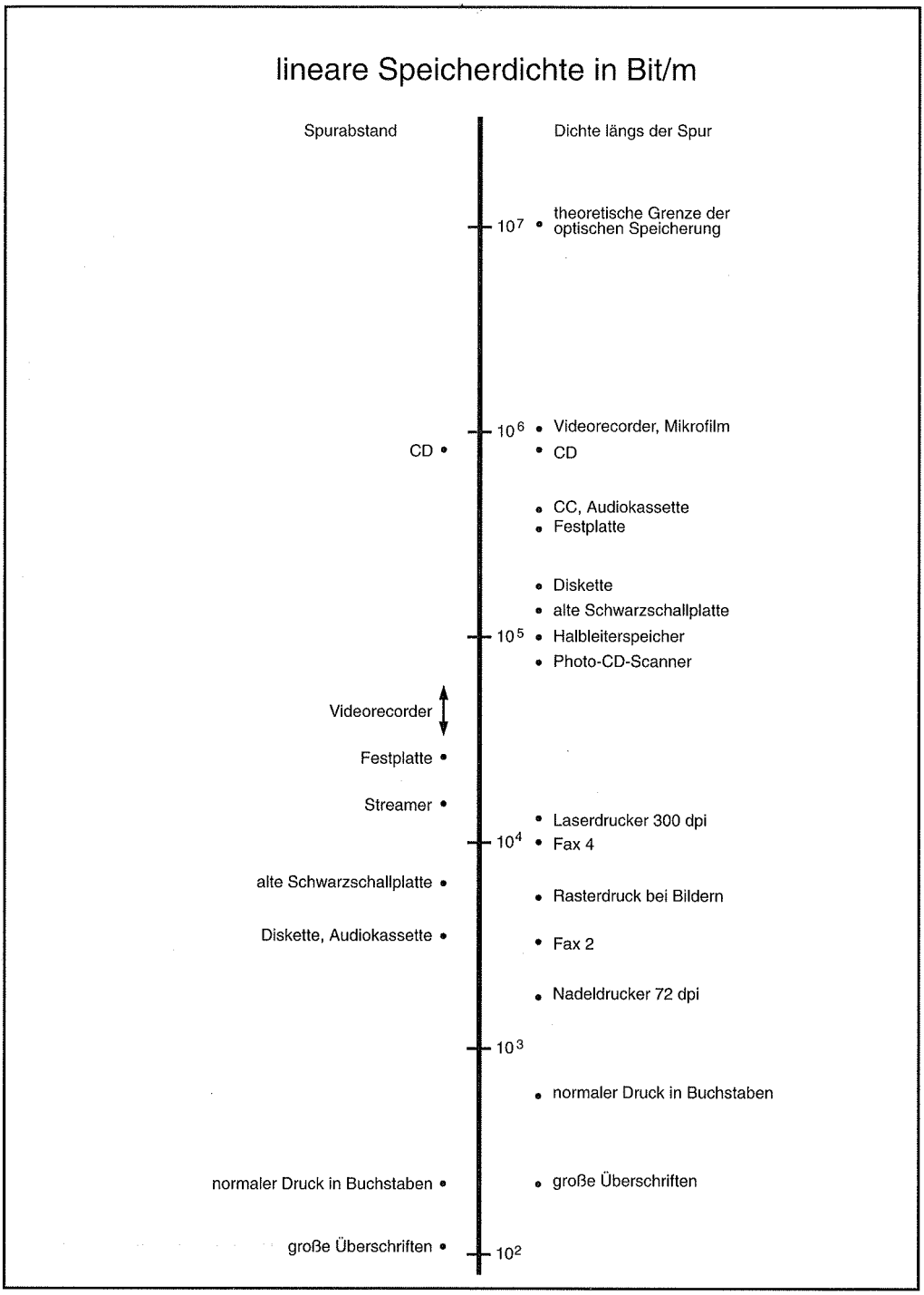
Bei den *spurorientierten* Speicherverfahren, wie Magnetbändern, Disketten und Festplatten, ist die lineare Speicherdichte für die Richtung innerhalb der Spur interessant. Neben bit/m sind hier auch bit/mm und die angelsächsische Einheit bpi gebräuchlich. Für dieses Vorgehen spricht, daß auch der sequentielle Zugriff auf die Information längs der Spur erfolgt. Das Maß hängt aber technisch stark von der Codiertechnik ab und wird von ihr verändert. In magnetischen Medien selbst ist deswegen die Anzahl der Flußwechsel je mm (englisch cpi – flux changes per inch) eine typische technisch orientierte Verfahrensgrenze. Mittels der Codierung können dann je Flußwechsel etwa 0,5 bis 3 bit gespeichert werden. Die Steigerung der Speicherkapazität von Disketten und Festplatten beruhte zum erheblichen Teil auf derartigen Fortschritten.

Bei analogen Verfahren, wie der Schallplatte und dem Tonband, müssen die unterscheidbaren Amplitudenstufen des Störabstands entsprechend der Shannonschen Theorie noch zusätzlich multiplikativ berücksichtigt werden.

Da es recht große Unterschiede der Speicherdichte in Spurrichtung und senkrecht dazu gibt (was dann bei der Betrachtung der Fläche interessant wird), gibt man zuweilen auch den Spurabstand in tpi (tracks per inch) an. Damit ist auch in diese Richtung die Umrechnung in bit/m möglich, und man kann zur Flächenspeicherdichte kommen (vgl. Abschn. 3.10.4).

Bei *punktorientierten* Speicherverfahren, wie dem Rasterdruck in Zeitungen oder bei Druckern für Rechner sind meist beide Richtungen gleich gut aufgelöst. Nur in Sonderfällen ist hier die Dichte in der Zeile oder Spalte zu unterscheiden. Die Informations- oder Punktdichte (der Punkt trägt ja die Information) wird hier vorwiegend in bit/mm oder dpi (dot per inch – getrennte Punkte pro inch) angegeben.

Bei Filmen und bei zeilenorientierten Verfahren ist die Angabe lpi (lines per inch) gebräuchlich. Bei Filmen ist sie der Grenzwert, bei dem gerade noch getrennte Linien erreicht werden. Bei Bildschirmen oder Druckern weist die Angabe auf die wirklich verwendete Zahl von Linien bzw. Zeilen je inch hin.


lineare Speicherdichte in Bit/m
Spurabstand
Dichte längs der Spur
10^7
theoretische Grenze der optischen Speicherung
10^6
Videorecorder, Mikrofilm
CD
CD
CC, Audiokassette
Festplatte
Diskette
alte Schwarzschallplatte
10^5
Halbleiterspeicher
Photo-CD-Scanner
Videorecorder
Festplatte
Streamer
Laserdrucker 300 dpi
10^4
Fax 4
alte Schwarzschallplatte
Rasterdruck bei Bildern
Diskette, Audiokassette
Fax 2
Nadeldrucker 72 dpi
10^3
normaler Druck in Buchstaben
normaler Druck in Buchstaben
große Überschriften
große Überschriften
10^2

Für die *zeichenorientierten* Speicherverfahren, die mit definierten Zeichen für bestimmte Informationen umgehen (wie z.B. Buchstaben), wird vielfach die Einheit pitch bzw. cpi (character per inch) verwendet. Sie gibt an, wieviele Zeichen hintereinander auf der Länge von einem Zoll unterzubringen sind.

Da die Maßeinheiten auf diesem Gebiet noch sehr uneinheitlich sind (wohl auch wegen fehlender Normungsarbeit – das Gebiet ist im Vergleich zu den durch die anderen Einheiten beschriebenen noch sehr jung) und meist auch die angelsächsischen Einheiten überwiegen, sind für die Skale wichtige Größen auf bit/m umgerechnet worden. Entsprechend den beiden interessierenden linearen Richtungen ist die Dichte sowohl längs der Spur wie auch der Spurabstand (Dichte senkrecht zur Spur) angegeben.

Hier noch einige Umrechnungen der verschiedenen Maße:

1 bit per inch	= 1 bpi	= 39,37 bit/m	
1 character per inch	= 1 cpi	= 1pitch	
1 dot per inch	= 1dpi	= 39,37 bit/m	(evtl. um den Faktor der Farbtiefe erhöhen)
1 Flußwechsel per inch	= 1 fpi	= 20 ... 100 bit/m	(je nach Codierung)
1 lines per inch	= 1 lpi	= 39,37 bit/m	
1 track per inch	= 1 tpi	= 39,37 bit/m	
1 pitch	= 1 Zeichen je Zoll (Zeichendichte einer Schrift).		

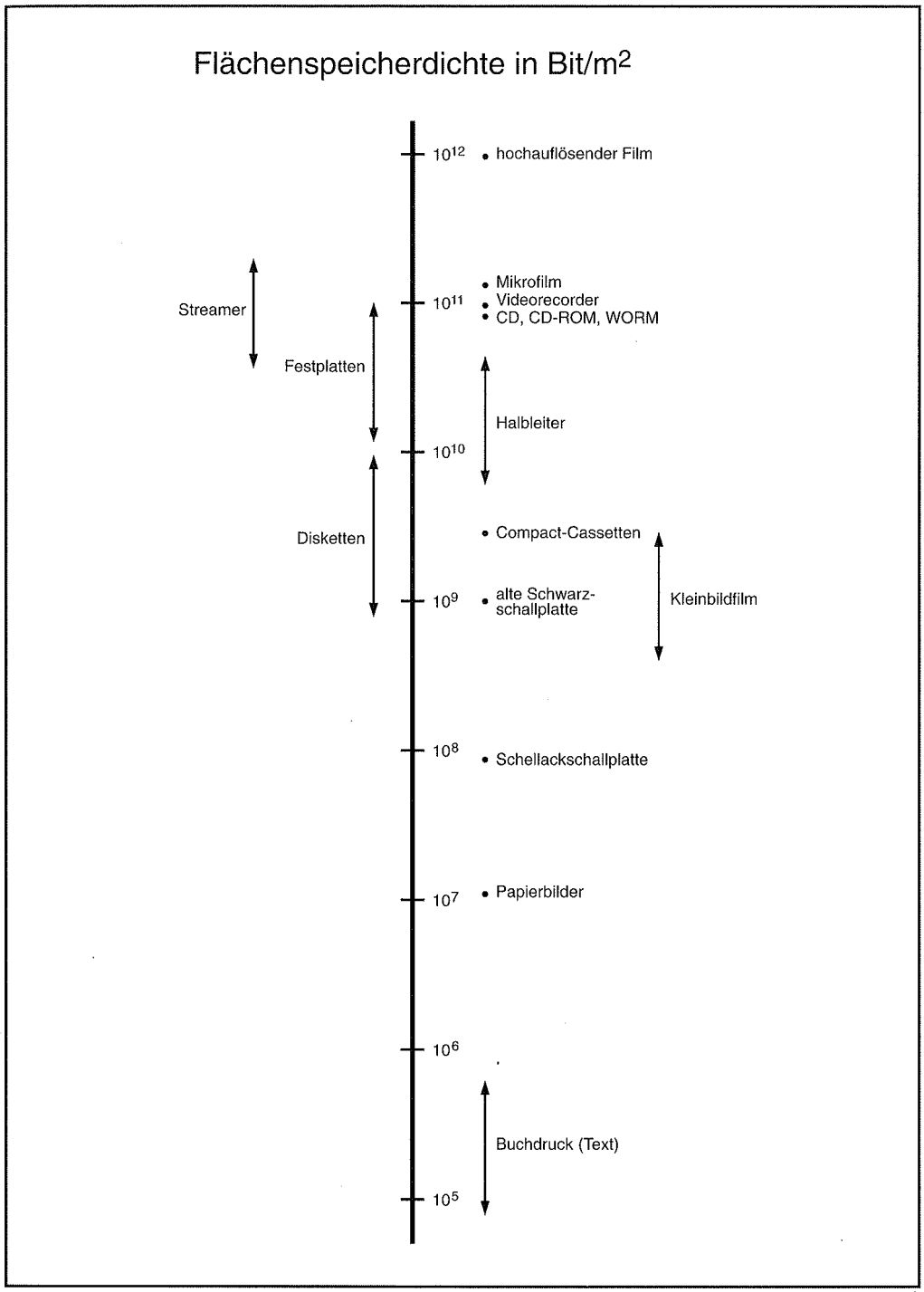
3.10.4 Flächenspeicherdichte in Bit pro Quadratmeter ([Flächenspeicherdichte] = bit/m^2)

Da alle heutigen Speicherverfahren auf der Oberfläche von Speichermedien arbeiten, ist für einen Vergleich ihrer Leistungsfähigkeit die Angabe der Flächenspeicherdichte entscheidend. So kann ein Speichermedium mit einer großen linearen Speicherdichte und einem großen Spurabstand (geringe Speicherdichte senkrecht zur Spur) durchaus in seiner Gesamtleistungsfähigkeit hinsichtlich der Speicherfähigkeit einem anderen Medium mit mittleren Werten für beide Dichten unterlegen sein.

1 Bit pro Quadratmeter (1 bit/m^2) ist die Speicherdichte, die die Speicherung der Informationsmenge von 1 bit auf einer Fläche von 1 m^2 erlaubt.

Leider beginnen die Hersteller von Speichermedien erst sehr langsam auch mit der Angabe der Flächenspeicherdichte in bit/m^2 oder in bit per square inch (für den angelsächsischen Raum).

Die Skale gibt einen groben Überblick über den Stand der Technik. Auffällig ist, daß alle modernen Verfahren um die 10^{11} bit/m^2 zu speichern vermögen. Nur der hochauflösende Mikrofilm liegt seit langem deutlich darüber. Das klassische Buch liegt dagegen mit 6 Zehnerpotenzen darunter weit abgeschlagen am unteren Ende. Es muß aber beachtet werden, daß hier nur der formale Aspekt der Informationsmenge Gegenstand der Betrachtung ist. Solche Fragen wie Ästhetik und Gesamtwahrnehmung einer Buchseite (Text und Bild) können mit diesem Maß nicht erfaßt werden.


Flächenspeicherdichte in Bit/m2
10^12
hochauflösender Film
Mikrofilm
Videorecorder
CD, CD-ROM, WORM
10^11
Streamer
Festplatten
Halbleiter
10^10
Disketten
Compact-Cassetten
10^9
alte Schwarz-schallplatte
Kleinbildfilm
10^8
Schellackschallplatte
10^7
Papierbilder
10^6
Buchdruck (Text)
10^5

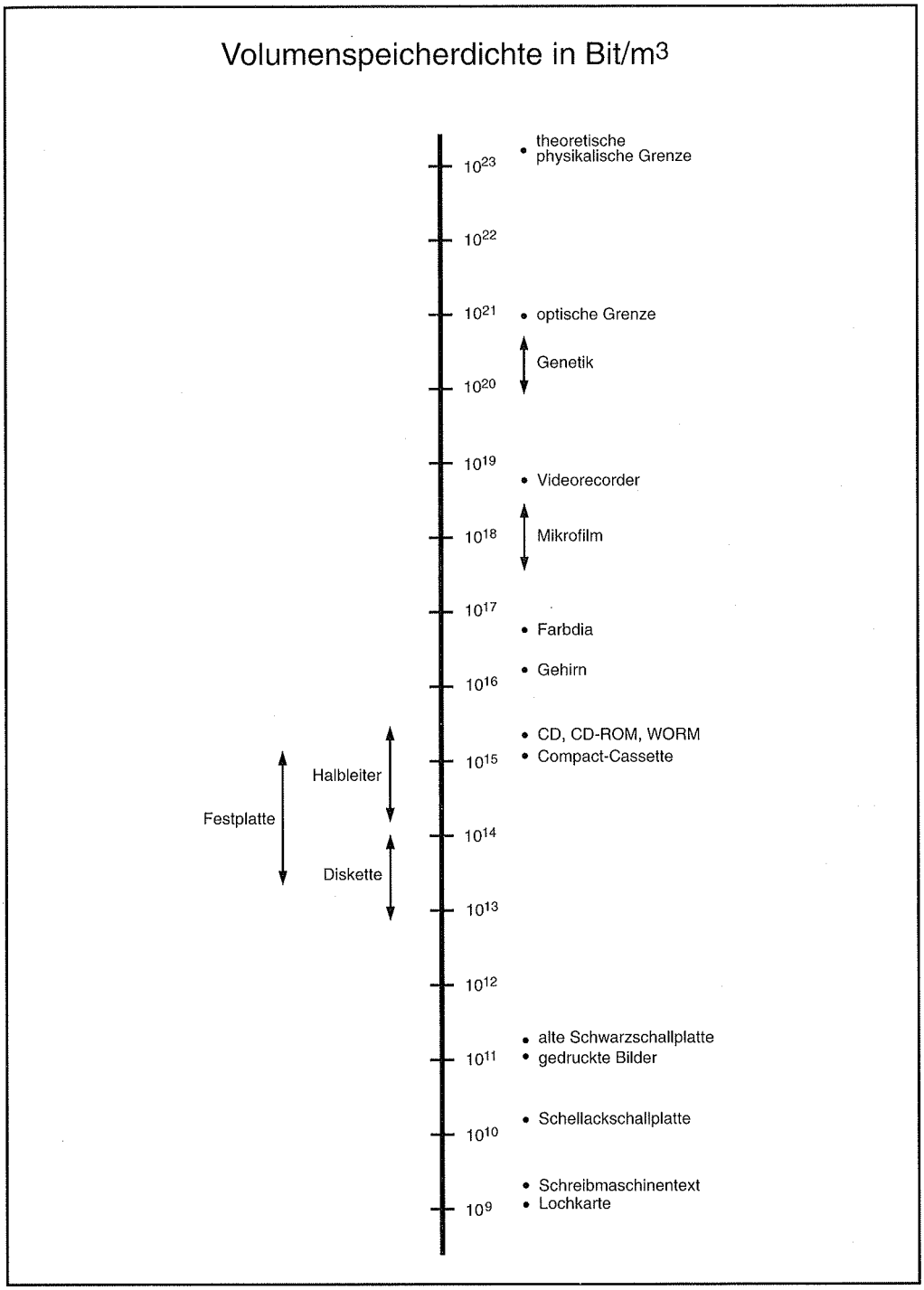
3.10.5 Volumenspeicherdichte in Bit pro Kubikmeter ([Volumenspeicherdichte] = bit/m^3)

Daten werden gespeichert, um sie auch jederzeit wieder verfügbar zu haben. Für größere Datenmengen benötigt man deswegen Archive. So kennen wir Filmarchive, Tonbandarchive, Fotoarchive usw. Diese Archive können aber auch elektronischer Natur sein. Auch Bibliotheken sind in diesem Sinne Archive. Wichtig für den Betreiber solcher Archive ist das Volumen, welches er zur Speicherung der Informationsmenge bereitstellen muß. Bei den elektronischen Archiven sind das dann mindestens die Volumina der Speichereinheit, streng genommen muß man auch das Volumen für die Technik des Zugriffs auf den elektronischen Speicher hinzurechnen. Deshalb ist die eigentliche Speicherdichte weder linear noch flächenbezogen, sondern volumenbezogen anzugeben. Das ist zur Zeit noch sehr ungebräuchlich, denn im eigentlichen Sinne einer Volumenspeicherung (die eine tatsächliche Speicherung in alle drei Raumrichtungen vornimmt, so daß der Platz der Informationseinheit durch drei Koordinaten bestimmt ist) existieren noch keine technischen Verfahren.

1 Bit pro Kubikmeter (1 bit/m^3) ist die Volumenspeicherdichte, die eine Informationsmenge von 1 bit in einem Volumen von 1 m^3 unterbringt.

Schaut man sich die auf eine Fläche orientierten Speicherverfahren genauer an, bedürfen diese Verfahren eines mechanischen Trägers, einer Unterlage zu ihrer Stabilisierung. Damit wird eine Umrechnung in Volumenspeicherdichte möglich. Nur so lassen sich nämlich bei genauerer Betrachtung technische Verfahren und biologische Lösungen sinnfällig vergleichen, was in der Skale getan wird.

Auf der Basis der Volumenspeicherdichte läßt sich weiterhin mittels der möglichen Energiedichte (vgl. Abschn. 3.3.11) und der für 1 Bit notwendigen Grenzenergie (vgl. Abschn. 3.3.9) auch eine theoretische Obergrenze für die Speicherdichte bestimmen. Für ihr Erreichen sind entsprechend den Voraussetzungen der verwendeten Grenzwerte auch physikalische Prinzipien notwendig, die z. Z. kaum in der theoretischen Diskussion sind. Selbst mit künftigen optischen Verfahren, die sogar bereits fernes ultraviolettes Licht voraussetzen, ist prinzipiell nur geringere, in der Skale markierte Speicherdichte erreichbar.


Volumenspeicherdichte in Bit/m3
theoretische physikalische Grenze
10^{23}
10^{22}
10^{21}
optische Grenze
Genetik
10^{20}
10^{19}
Videorecorder
10^{18}
Mikrofilm
10^{17}
Farbdia
Gehirn
10^{16}
CD, CD-ROM, WORM
Compact-Cassette
10^{15}
Halbleiter
Festplatte
10^{14}
Diskette
10^{13}
10^{12}
alte Schwarzschallplatte
10^{11}
gedruckte Bilder
Schellackschallplatte
10^{10}
Schreibmaschinentext
Lochkarte
10^{9}

3.10.6 Winkel in Radiant oder Grad ([Winkel] = rad oder °)

Winkelangaben kennen wir aus vielen praktischen Anwendungen. Ihre praktische Bedeutung wurde schon sehr bald im Bauwesen und auch im Zusammenhang mit der Technik des Schießens erkannt. Winkel haben so in der Geometrie und in der Landvermessung für die menschliche Zivilisation von alters her Bedeutung. Aber auch bei rotierenden Bewegungen sind sie wichtige Kenngrößen und bei den goniometrischen Funktionen sind sie die ursprünglich unabhängigen Veränderlichen.

Seit Jahrhunderten werden Winkel in Grad, Minuten und Sekunden gemessen, die mit der Basiszahl 60 arbeiten. Schon in den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts hat es erfolglose Versuche gegeben, diese Tradition durch Neugrad bzw. Gon auf das dezimale System umzustellen. Im SI wurde nun ein konsequenter Versuch gestartet, eine Basiseinheit für den Winkel einzuführen, der aber offensichtlich ebenso erfolglos zu verlaufen scheint. Es wurde das an sich schon lange zusätzlich verwendete Bogenmaß (was auch in der Mathematik bei der Definition der trigonometrischen Funktionen Verwendung findet) als spezifische SI-Einheit festgelegt.

Ein Radiant (1 rad) ist der ebene Winkel zwischen zwei Radien eines Kreises, die aus dem Kreisumfang einen Bogen von der Länge des Radius ausschneiden.

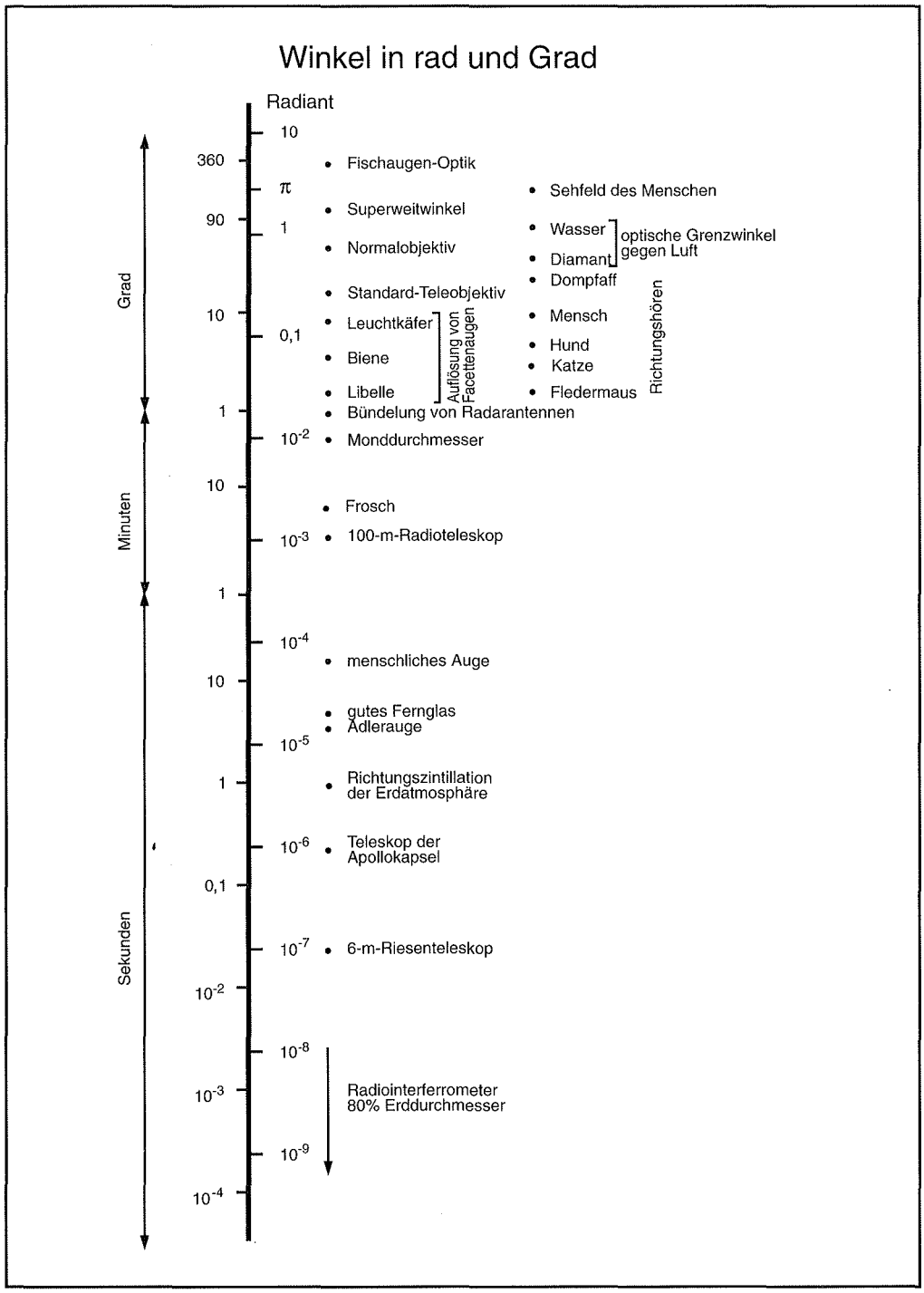
Eine Schwierigkeit dieser Definition des Winkelmaßes wird bei der Bestimmung von Zahlenwerten deutlich. Hier geht nämlich dann aufgrund der Gesetzmäßigkeiten zur Berechnung des Kreisbogens die transzendente Zahl π ein. Am Beispiel des rechten Winkels läßt sich die Problematik recht gut demonstrieren. Er ist ja eine der wichtigsten Winkelgrößen und besitzt im klassischen Sinne 90° oder revidiert 100 Neugrad. Laut SI hat dieser Winkel die Größe von $\pi/2 = 1{,}570\,796\,327 \ldots$ rad. Wer kann dann noch abschätzen, wieviel z.B. 0,5 rad sind?

Das rad ist zwar eine eigenständige Maßeinheit für den Winkel (genauso wie ° oder Neugrad), in Größengleichungen gehen Winkel aber nur mit ihrem Zahlenwert ein. Es muß aber genau beachtet werden, für welche Einheit die Gleichung aufgestellt wurde.

Wegen der Unanschaulichkeit des rad wurde die Skale konsequent durch eine Teilung in Grad, Minuten und Sekunden ergänzt. Dadurch wird auch eine leichte Kompatibilität zu anderen Datensammlungen erreicht.

Einen Hauptteil der Daten bilden optische Kenngrößen, wie die Aufnahmebreiten verschiedener Optiken der Photographie, Auflösungsvermögen optischer Geräte und biologischer Augen und ihr Vergleich mit den Leistungen des Menschen (Gesichtsfeld, Auflösungsvermögen des menschlichen Auges). Das Auflösungsvermögen ist definiert als die kleinste zu erkennende oder aufzulösende Winkeleinheit. Auch die technischen Leistungen in der Astronomie werden durch die Auflösungsvermögen der Teleskope verdeutlicht. Die Auflösung erdgebundener Teleskope wird durch die typische Richtungsszintillation der Erde deutlich begrenzt.

Beachtenswert ist die Spannbreite des in der Natur realisierten akustischen Auflösungsvermögens. Hier ist der Mensch gegenüber anderen tierischen Leistungen mit etwa 10° stark abgeschlagen, die Spitze hält hier die Fledermaus. Das hängt auch mit


Winkel in rad und Grad
Radiant
Grad
Minuten
Sekunden
10
360
π
90
1
10
0,1
1
10-2
10
10-3
1
10-4
10
1
0,1
10-2
10-3
10-4
10-5
10-6
10-7
10-8
10-9
Fischaugen-Optik
Superweitwinkel
Normalobjektiv
Standard-Teleobjektiv
Leuchtkäfer
Biene
Libelle
Auflösung von Facettenaugen
Bündelung von Radarantennen
Monddurchmesser
Frosch
100-m-Radioteleskop
menschliches Auge
gutes Fernglas
Adlerauge
Richtungszintillation der Erdatmosphäre
Teleskop der Apollokapsel
6-m-Riesenteleskop
Radiointerferrometer 80% Erddurchmesser
Sehfeld des Menschen
Wasser
Diamant
optische Grenzwinkel gegen Luft
Dompfaff
Mensch
Hund
Katze
Fledermaus
Richtungshören

den verwendeten Frequenzen zusammen, da die Interferenzfähigkeit der aus unterschiedlichen Winkeln reflektierten Strahlen frequenzabhängig ist.

Für die Umrechnung der verschiedenen Einheiten des ebenen Winkels gilt:

1 Vollwinkel	$= 360^{\circ}$	$= 2 \cdot \pi$ rad $\approx 6{,}28$ rad
1 Grad	$= 1^{\circ}$	$= \pi/180$ rad $\approx 17{,}45$ mrad
1 Minute	$= 1'$	$= 1/60^{\circ} \approx 290{,}9$ µrad
1 Sekunde	$= 1''$	$= 1/60' \approx 4{,}85$ µrad
1 Neugrad	$= 1^{g}$	$= \pi/200$ rad $\approx 15{,}71$ mrad (1 Neugrad = 1 Gon)

Genauso wie für den ebenen Winkel wurde auch für den räumlichen Winkel, der z.B. in der Astronomie und bei den Lichteinheiten (vgl. Abschn. 3.8) Bedeutung hat, eine SI-Einheit eingeführt.

Ein Steradiant (1 sr) ist der räumliche Winkel, dessen Scheitelpunkt im Mittelpunkt einer Kugel liegt und der aus der Kugeloberfläche eine Fläche gleich dem Quadrat mit der Seitenlänge des Kugelradius ausschneidet.

Diese Fläche wird aber nicht durch eine Pyramide mit quadratischem Querschnitt erzeugt, sondern durch einen Kegel mit kreisförmigem Querschnitt, der vom Kugelmittelpunkt ausgeht. Der Raumwinkel ist daher nicht gleich dem ebenen Öffnungswinkel dieses Kegels. Der Raumwinkel der vollen Kugel beträgt $4 \cdot \pi$ sr $\approx 12{,}56$ sr. Alte Einheiten sind das Quadratgrad ($\square^{\circ}$ oder $(^{\circ})^2$):

$1\ \square^{\circ} = (\pi/180)^2$ sr $\approx 3{,}046 \cdot 10^{-4}$ sr;

und das Quadratgon ($\square^{g}$ oder $(^{g})^2$):

$1\ \square^{g} = (\pi/200)^2$ sr.

Für den Raumwinkel ist keine Skale angegeben.

3.10.7 Lautstärke in Phon ([Lautstärke] = phon)

Mit der Akustik haben wir wieder ein Gebiet vor uns, welches relativ spät in die Überlegungen zu den Maßeinheiten einbezogen wurde und das einen ganz wesentlichen Bezug zur physiologischen Wirkung der Erscheinung Schall auf das menschliche Gehör hat. Die Untersuchungen zum Schall begannen erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts und erst seitdem Schall auf elektroakustischem Weg erzeugt und auch aufgenommen werden kann – was auch seine bessere Messung ermöglichte – waren Vereinbarungen über Maßeinheiten erforderlich. Vom rein physikalischen Standpunkt sind Schallwellen wellenförmige Fortpflanzungen von Druck- bzw. Dichteschwankungen in elastischen Medien. Von daher sind sie mit den entsprechenden Größen der Wellentheorie beschreibbar und mittels deren Maßeinheiten meßbar.

Die physiologischen Wirkungen des Schalls auf das menschliche Ohr werden hingegen mittels Verhältnisgrößen bzw. logarithmierter Verhältnisgrößen charakterisiert. Für die subjektive Lautstärkeempfindung wird das Phon verwendet.

Bewirkt eine Schallquelle der Frequenz 1kHz an einem Ort die Intensität I, so wird diesem Ort die Lautstärke $L_N = 10\,\lg(I/I_S)$ Phon zugeordnet. Dabei ist $I_S = 10^{-12}\,\mathrm{Wm^{-2}}$ die Hörschwellenintensität für 1 kHz (gerade noch wahrnehmbarer Schall).

Entsprechend der funktionalen Beziehung zwischen Intensität und Schalldruck kann man auch letzteren zur Definition verwenden: $L_N = 20\,\lg(p_{max}/p_{max,S})$ Phon.

Für die Grenzen des menschlichen Hörens ergeben sich damit folgende Intensitäten (Schallstärken) und Schalldrücke (bei der Normalfrequenz von 1 kHz):

	I	p
Hörschwelle 0 phon	$10^{-16}\,\mathrm{W/cm^2}$	$2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{N/m^2}$
Schmerzgrenze 130 phon	$10^{-4}\,\mathrm{W/cm^2}$	$20\,\mathrm{N/m^2}$

Bei 1000 Hz stimmen die Angaben des Schalldruckpegels in dB (Dezibel) und des Lautstärkepegels überein (vgl. auch die unter der Skale verlaufende Kurvenschar).

Die Arbeiten zur Festlegung der entsprechenden Einheiten wurden wesentlich vom Technischen Komitee „Elektroakustik" der Internationalen Elektrotechnischen Kommission sowie vom Technischen Komitee „Akustik" der Internationalen Organisation für Standardisierung getragen. Das Phon als Kennwort für den Lautstärkepegel wurde 1926 von Heinrich Barkhausen (1881–1956) eingeführt.

Die Hörschwelle wurde schon früh als Ausgangspunkt für die Lautstärkebestimmung gewählt. Sie gibt die Schallintensität des Sinustones an, den wir gerade wahrzunehmen beginnen. Genaugenommen muß man zwischen zwei Hörschwellen unterscheiden, der international festgelegten und der individuellen. Die international festgelegte gilt für eine repräsentative Mädchengruppe eines Alters um 20 Jahre. Die individuelle wird im allgemeinen, aber besonders im Alter deutlich höher liegen.

Auf den Schalldruck bezogen ist jede Hörschwelle stark frequenzabhängig. Lediglich für die wichtigsten Frequenzen unserer Sprache, zwischen 300 und 5000 Hz, ist

ein etwa konstanter Schalldruck erforderlich. Bei 20 Hz ist bereits eine 10^7-fache Schallintensität zum Erreichen der Hörschwelle erforderlich. Nicht ganz so stark muß der Schalldruck zu hohen Frequenzen hin wachsen. Zumindest bei jugendlichen Hörern genügt für 15 000 Hz etwa eine 100fache Intensität.

Entsprechend dem Weber-Fechnerschen Gesetz ist unsere subjektive Lautstärkeskale etwa logarithmisch geteilt. Zwei gleichlaute Schallquellen zusammen erscheinen uns daher nicht auch doppelt so laut, sondern nur um etwa 30% lauter als eine. Die Phon-Skale wurde daher von der Hörschwelle bei 1000 Hz um jeweils 10 phon erhöht, wenn die Schallintensität auf das 10fache ansteigt.

Für andere Frequenzen wurde die Phon-Skale immer durch gleichlautes Erklingen mit einem 1000 Hz-Ton ermittelt. So ergibt sich die unterhalb der Skale aufgetragene Kurvenschar, die neben dem Frequenzgang der einzelnen Lautstärken auch die zugehörigen Schallintensitäten und Schalldrücke angibt.

Die Schmerzschwelle ist auf 130 phon festgelegt. Hier liegt bereits die 10^{13}-fache Schalleistung gegenüber der Hörschwelle bei 1000 Hz vor. Werte darüber hinaus sind eigentlich als Lautstärkemessung sinnlos. Bei solchen Werten werden neben den beachtlichen Schmerzen relativ schnell Schäden des Gehörs herbeigeführt. Hier kann der Mensch nur mit Schallschutzmitteln arbeiten. Aus diesem Grunde ist ein formales Fortsetzen der Skale möglich.

In der Praxis hat man es in der Regel immer mit Schall zu tun, der aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt ist. Hier gilt die auf die Sinustöne bezogene Lautstärkemessung nicht mehr. Die zu bestimmende Größe heißt dann *Lautheit* und wird in Sone gemessen.

Die Lautheit eines Tones ist 1 sone, wenn sein Lautstärkepegel 40 phon beträgt; sie ist n sone, wenn ein Beobachter sie als n-mal so laut abschätzt wie die Lautheit 1 sone.

Der Zusammenhang zwischen Lautheit und Lautstärkepegel ist also von Versuchsperson zu Versuchsperson unterschiedlich und muß jeweils individuell durch das Experiment bestimmt werden.

Da oberhalb von 40 phon jede Lautheitsverdopplung einem Zuwachs des Laustärkepegels von etwa 10 phon entspricht, wurde die folgende Zahlenwertgleichung zwischen der Lautheit N in sone und dem Lautstärkepegel L in phon empfohlen:

$$L = 40 + 10 \cdot \mathrm{ld}(N).$$

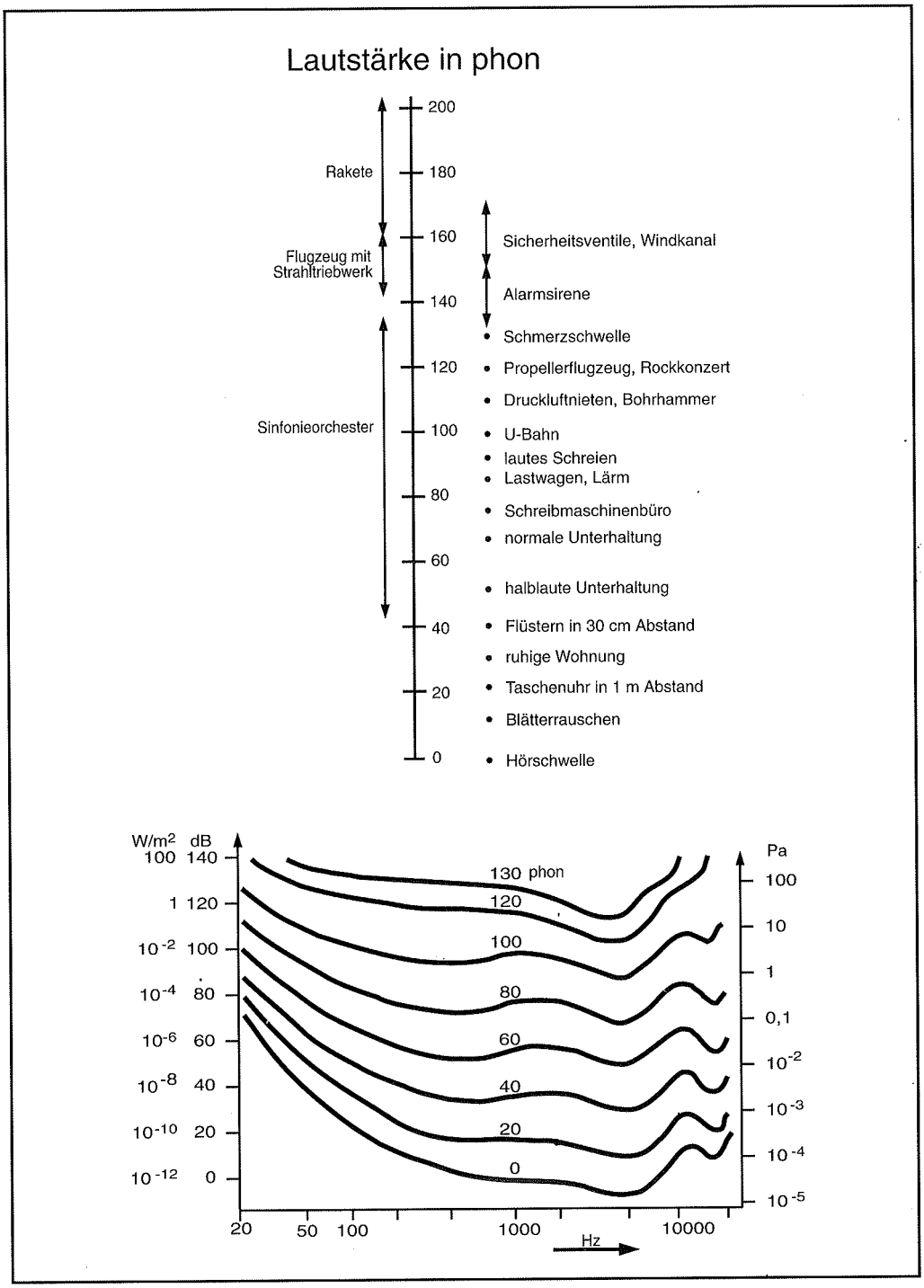
Zu 40 phon gehören also 1 sone und bei 130 phon ergeben sich 512 sone.

Besonders schwierig ist die Lautheit von impulsartigem Schall zu bestimmen, da hier auch noch bestimmte Zeitkonstanten zu erfassen sind.

Zum Schluß seinen an einem Beispiel noch die rein physikalischen Größen zur Kennzeichnung von Schall angegeben:

Einem Schalldruck von 1 Pa bei einer Frequenz von 1000 Hz entsprechen:

eine Schallamplitude von $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ m,
eine Schallschnelle von $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ m/s,
eine Schallintensität von $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ W/m^2.


Lautstärke in phon
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Rakete
Flugzeug mit Strahltriebwerk
Sinfonieorchester
Sicherheitsventile, Windkanal
Alarmsirene
Schmerzschwelle
Propellerflugzeug, Rockkonzert
Druckluftnieten, Bohrhammer
U-Bahn
lautes Schreien
Lastwagen, Lärm
Schreibmaschinenbüro
normale Unterhaltung
halblaute Unterhaltung
Flüstern in 30 cm Abstand
ruhige Wohnung
Taschenuhr in 1 m Abstand
Blätterrauschen
Hörschwelle
W/m² dB
100 140
1 120
10⁻² 100
10⁻⁴ 80
10⁻⁶ 60
10⁻⁸ 40
10⁻¹⁰ 20
10⁻¹² 0
130 phon
120
100
80
60
40
20
0
Pa
100
10
1
0,1
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
20
50
100
1000
10000
Hz

3.10.8 Wirkungsgrad (und Verwandtes)

In vielen technischen und auch in natürlichen Prozessen ist es wichtig, die Effektivität des Prozesses zu kennen. In technischen Prozessen kommt dem immer größere Bedeutung zu, weil der Ressourcenverbrauch eines der größten ökologischen Probleme der Menschheit darstellt. Vor allem bei technischen Prozessen wurde eine charakteristische Größe für die Effektivität gesucht. Diese ist der Wirkungsgrad. Er gibt an, in welchem Grad ein technischer (oder auch natürlicher) Prozeß die in ihm stattfindende Umwandlung realisiert. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Energieumwandlungen, wie z.B. bei der Dampfmaschine oder dem Verbrennungsmotor, die Wärmeenergie in mechanische umwandeln.

Der Wirkungsgrad ist damit eine Verhältniszahl und gibt an, wieviel verfügbare Energie E_v im Verhältnis zur eingesetzten Energie E_e bei dem entsprechenden Prozeß bereitgestellt werden kann:

$$\eta = E_v / E_e.$$

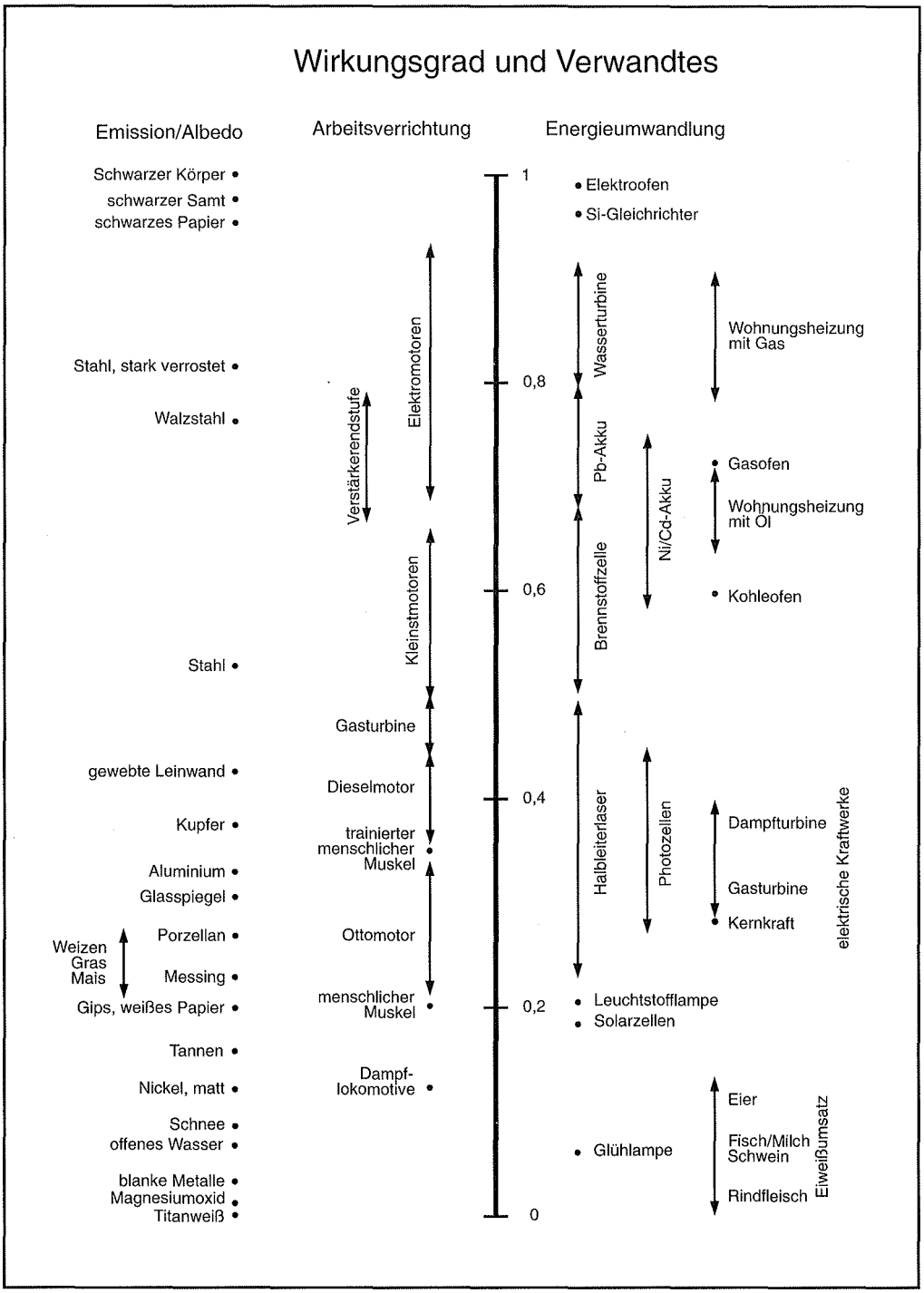
Aufgrund des Energieerhaltungssatzes kann nicht mehr Energie verfügbar sein als eingesetzt wurde, und somit hat der maximale Wirkungsgrad (idealer Prozeß) den Wert 1. Dieser ist nur theoretisch erreichbar, da es keine Prozeßführung ohne „Verluste" gibt.

Die grundlegenden Untersuchungen zu diesem Problemkreis haben ihren Anfang in der Wärmelehre. Als die Techniker begannen, Wärmekraftmaschinen zu bauen, konnten sie bestenfalls experimentell feststellen, welche Maschine mehr Wärme in mechanische Energie umsetzte. Nachdem Sadi Carnot (1796–1832) im Jahre 1824 den thermodynamischen Kreisprozeß definiert hatte, konnte man die theoretisch erreichbare Grenze für den Wirkungsgrad solcher Wärmekraftmaschinen berechnen und das Machbare vom jeweils Erreichten unterscheiden. Entsprechend dem Kreisprozeß kann man bei solchen Maschinen den Wirkungsgrad auf die beiden wichtigsten im Prozeß auftretenden Temperaturen beziehen, die Verbrennungstemperatur T_v und die Umgebungstemperatur T_u. Danach ist der Teil Wärmeenergie, der in nützliche mechanische Energie umgewandelt werden kann, durch den Wirkungsgrad

$$\eta = T_v / (T_v - T_u)$$

bestimmt. Unter Berücksichtigung der wirklichen, meßbaren Leistung einer Maschine waren nun die Techniker in der Lage zu entscheiden, ob sich die Verbesserung einer Maschine lohnt.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall ist die Nachrichtentechnik. In den zwanziger und dreißiger Jahren besaß die Menschheit Telegraf, Telefon, Rundfunk und das Fernsehen begann. Es entstanden immer mehr teure Sende- und Empfangseinrichtungen. Doch ihren Wirkungsgrad (bezüglich einer idealen Informationsübertragung) konnte kein Techniker – nicht einmal näherungsweise – angeben. Erst als Shannon 1940 seine Informationstheorie formulierte (vgl. Abschn. 3.10.1) war auch hier das


Wirkungsgrad und Verwandtes
Emission/Albedo
Arbeitsverrichtung
Energieumwandlung
Schwarzer Körper
schwarzer Samt
schwarzes Papier
Stahl, stark verrostet
Walzstahl
Stahl
gewebte Leinwand
Kupfer
Aluminium
Glasspiegel
Porzellan
Messing
Weizen
Gras
Mais
Gips, weißes Papier
Tannen
Nickel, matt
Schnee
offenes Wasser
blanke Metalle
Magnesiumoxid
Titanweiß
Verstärkerendstufe
Elektromotoren
Kleinstmotoren
Gasturbine
Dieselmotor
trainierter menschlicher Muskel
Ottomotor
menschlicher Muskel
Dampf-lokomotive
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Elektroofen
Si-Gleichrichter
Wasserturbine
Pb-Akku
Brennstoffzelle
Ni/Cd-Akku
Halbleiterlaser
Photozellen
Leuchtstofflampe
Solarzellen
Glühlampe
Wohnungsheizung mit Gas
Gasofen
Wohnungsheizung mit Öl
Kohleofen
Dampfturbine
Gasturbine
Kernkraft
elektrische Kraftwerke
Eier
Fisch/Milch
Schwein
Rindfleisch
Eiweißumsatz

Wesentliche klar: entscheidend sind statistische Parameter der Signale. Zu den wichtigsten Größen wurden die Informationsentropie und die Kanalkapazität.

Als drittes Beispiel sei die Rechentechnik betrachtet. Hier macht sich zur Zeit der fehlende theoretische Vorlauf nachteilig bemerkbar. Wir können die Frage, wie „gut" eine Informationsverarbeitungsanlage, ein Rechner oder ein Algorithmus ist, nicht beantworten. Dies ist u.a. ein Grund für die vorherrschende Empirie und für die sogenannte Informatik-Krise.

Die Wirkungsgradskale schlägt in gewissem Sinne eine Brücke zwischen diesem und dem nachfolgenden Abschnitt (Zahlenwerte). Einerseits ist der Wirkungsgrad eine Verhältniszahl (wie im Prinzip auch das Phon und das Bit), er hat aber kein eigenes Kennwort im Sinne einer Maßeinheit, sondern wird nur als reiner Zahlenwert angegeben (im Höchstfall als Prozentzahl).

In der Skale sind verschiedene Gebiete, in denen Wirkungsgrade eine Rolle spielen, zusammengestellt. Dabei wurde unterschieden nach

- Energieumwandlung zur Arbeitsverrichtung,
- Energieumwandlung zwischen verschiedenen Formen (i. allg. zur Speicherung).

Eine leichte Sonderstellung nimmt der Vergleich zwischen Emission und Absorption von Licht ein. Es gilt hier auch der theoretische Zusammenhang, daß die Summe aus Reflexionsgrad und Absorptionsgrad den Wert 1 ergibt. Die hier angegebene *Albedo* entspricht dem Reflexionsgrad, gilt jedoch als Mittelwert für sehr große Flächen. Sie findet besonders bei der Fernerkundung der Erde und in der Astronomie ihre Anwendung, weshalb diese Größe in der Skale berücksichtigt wurde.

3.11 Zahlen – Relationen – Wahrscheinlichkeiten

Neben den in Abschnitt 3.10 behandelten Zahlen mit der „Maßeinheit" 1 (i. allg. Verhältniszahlen) gibt es eine Vielzahl reiner Zahlen, die charakteristische Aussagen ermöglichen. Es ist natürlich nicht möglich, alle diese Zahlen in einer Skale aufzutragen – schon ihre Auswahl würde sehr vom subjektiven Standpunkt abhängen. Es gibt aber einige Besonderheiten, die hier in der Darstellung der Skale Berücksichtigung fanden.

Es existieren sowohl extrem große wie extrem kleine Zahlenwerte. Daraus erwächst die Möglichkeit, sie auf besondere Art gemeinsam darzustellen. So stehen auf der rechten Seite der Skale die Zahlen mit positiven Zehnerpotenzen den Zahlen mit der gleichen negativen Zehnerpotenz auf der linken Skalenseite gegenüber (rechts steht also z.B. 10^{12}, links bedeutet dies 10^{-12}). Damit sind die Zahlen, die zum gleichen Punkt der Skale gehören, zueinander reziprok. Bei exponentiell dargestellten Zahlen ist das relativ einfach nachzuvollziehen. Es gibt für diese Darstellung auch eine inhaltliche Berechtigung. Für kombinatorische Anordnungen stellt die Vielzahl der Möglichkeiten eine große Zahl dar (rechte Seite). Wählt man dagegen die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl einer bestimmten Kombination, so ist dies eine reziprok kleine Zahl (linke Seite).

Die zweite Besonderheit der Skale besteht darin, daß sie in fünf Bereiche aufgeteilt ist und jeder Bereich einer speziellen Skalenteilung folgt. Sie entsprechen den verschiedenen Zahlenbereichen, wie sie in Kapitel 5 ausführlicher begründet sind.

Der Skalenteil von 1 bis 2 (bzw. links von 1 bis 1/2) ist linear geteilt. Dies entspricht dem *binären* Zahlenbereich.

Für den *anschaulichen* Zahlenbereich von 2 bis 1000 wird die logarithmische Teilung verwendet, so wie bei allen anderen Skalen.

Für den *naturgegebenen* Bereich von 10^3 bis 10^{100} wird eine nochmals zu großen Werten hin verdichtete Skalenteilung proportional zu $\log(\sqrt{x})$ genutzt.

Zahlenwerte über diesen Teilen kommen nur bei *kombinatorischen* oder wahrscheinlichkeitstheoretischen Untersuchungen vor. Dieser Bereich gelangt zu so extrem großen (bzw. kleinen) Zahlen, daß eine extrem nichtlineare Skalenteilung gemäß $\log(\log(x))$ erforderlich ist. Auffällig ist, daß hier auch viele Zahlenwerte der Rechentechnik, insbesondere im Zusammenhang mit der Komplexitätstheorie, angesiedelt sind.

Noch größer Werte – die im eigentlichen Sinne keine Zahlen mehr sind – kennt die *infinite Mathematik*, z.B. mit dem Unendlichen und entsprechend dem beliebig kleinen Epsilon.

Für die Zahl 10^{100} erfand um 1930 der Neffe des Mathematikers Edward Kasner das Wort Googol. Eine noch viel größere, unvorstellbar große Zahl ist Googolplex, sie besitzt Googol Nullen. Beide Zahlen bilden in etwa die beiden Grenzen für den kombinatorischen Bereich.

Beachtenswert ist die Tatsache, daß bei der unterschiedlichen Teilung der Skalenabschnitte die aufgetragenen Werte, die charakteristische Größen darstellen, etwa gleich dicht liegen.

Die Abbildung 3.16 verdeutlicht die Zusammenhänge der einzelnen Zahlenbereiche zu anderen Bereichen der Wirklichkeit.

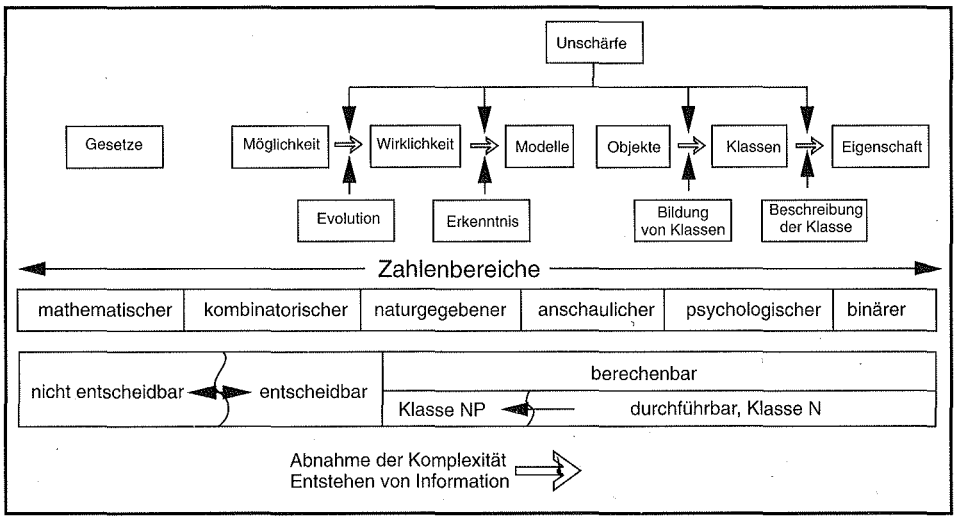
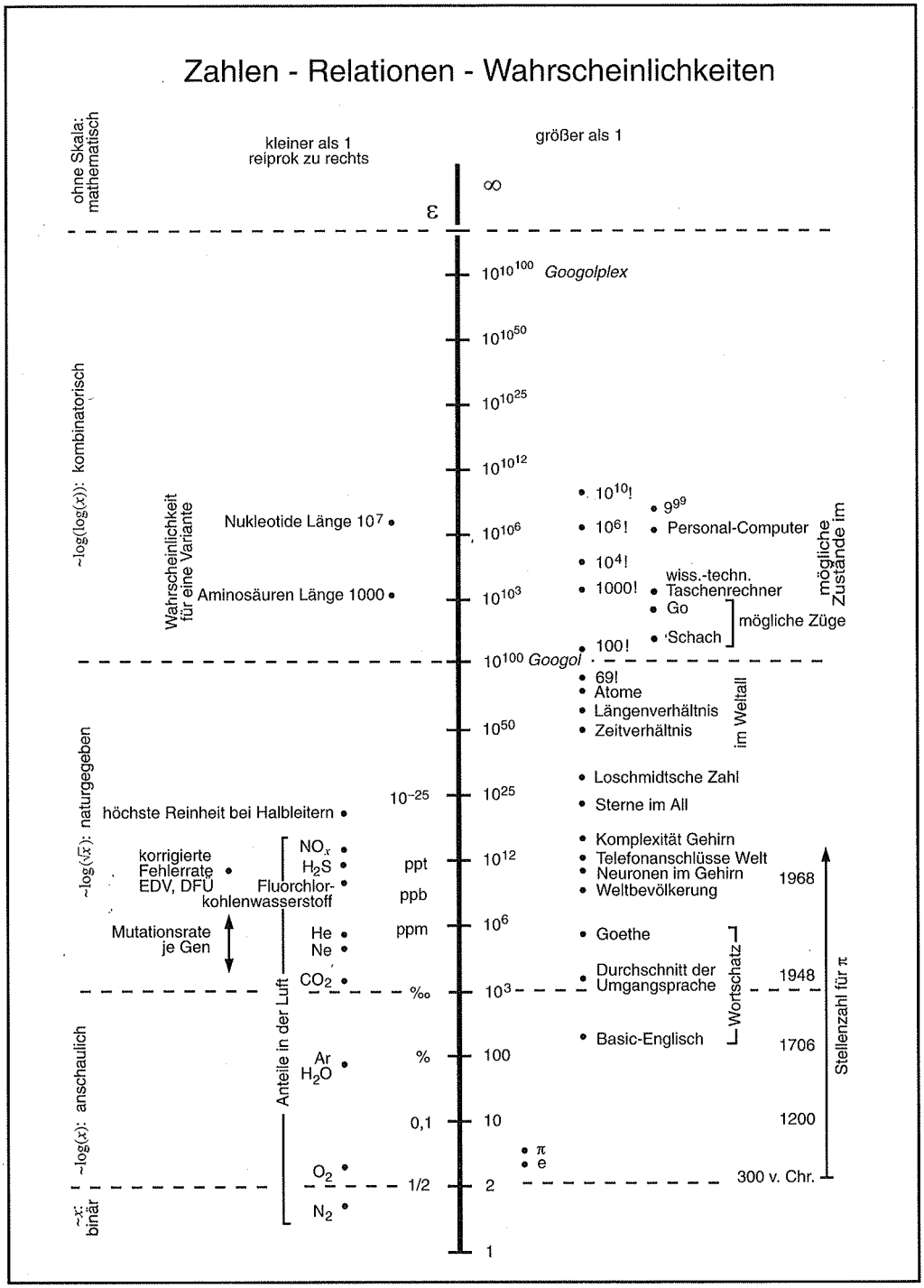


Abb. 3.16
Zahlenbereiche und Zusammenhänge


Zahlen - Relationen - Wahrscheinlichkeiten
ohne Skala: mathematisch
kleiner als 1
reiprok zu rechts
größer als 1
ε
∞
~log(log(x)): kombinatorisch
$10^{10^{100}}$ Googolplex
$10^{10^{50}}$
$10^{10^{25}}$
$10^{10^{12}}$
10^{10^6}
10^{10^3}
10^{100} Googol
10^{50}
10^{25}
10^{12}
10^6
10^3
100
10
2
1
Wahrscheinlichkeit für eine Variante
Nukleotide Länge 10^7
Aminosäuren Länge 1000
10^{10}!
9^9
10^6!
Personal-Computer
10^4!
1000!
wiss.-techn. Taschenrechner
Go
Schach
100!
mögliche Zustände im
mögliche Züge
69!
Atome
Längenverhältnis
Zeitverhältnis
im Weltall
~log(√x): naturgegeben
höchste Reinheit bei Halbleitern
10^{-25}
Loschmidtsche Zahl
Sterne im All
Komplexität Gehirn
Telefonanschlüsse Welt
Neuronen im Gehirn
Weltbevölkerung
1968
korrigierte Fehlerrate EDV, DFÜ
Fluorchlor-kohlenwasserstoff
NO_x
H_2S
ppt
ppb
Mutationsrate je Gen
He
Ne
ppm
Goethe
Durchschnitt der Umgangssprache
1948
Wortschatz
CO_2
‰
Basic-Englisch
1706
Anteile in der Luft
Ar
H_2O
%
0,1
1200
π
e
~log(x): anschaulich
O_2
1/2
300 v. Chr.
Stellenzahl für π
~x: binär
N_2

3.11.1 Relative Meßfehler

Eine besondere Gruppe von Zahlen sind die Meßfehler. Bei den einzelnen Skalen wurde immer wieder darauf hingewiesen, daß die Bestimmung der Zahlenwerte der einzelnen Größen immer mit Fehlern behaftet ist. Besondere Bedeutung haben diese Fehler bei den Basiseinheiten, denn ihre Darstellung muß mit einem möglichst kleinen Fehler erfolgen, da bei der Weitergabe des internationalen Etalons an die verschiedenen nationalen Büros einmal der Darstellungsfehler weitergegeben wird und i. allg. ein weiterer Fehler bei der Übergabe auftritt.

Das Auftreten von Fehlern ist ein grundsätzliches Phänomen experimentellen Arbeitens. Die Abschätzung der Genauigkeit eines Ergebnisses (seiner Fehler) ist sowohl für den Vergleich mit den theoretisch ermittelten Werten für das Experiment wie auch für den Vergleich mit den Ergebnissen eines solchen Experiments von anderen Autoren wichtig. Aus diesem Grund hat sich eine eigenständige Theorie der Meßfehler herausgebildet, die ihre Entstehung und die Methoden des Umgangs mit ihnen behandelt. Interessenten seien dafür auf die Spezialliteratur verwiesen.

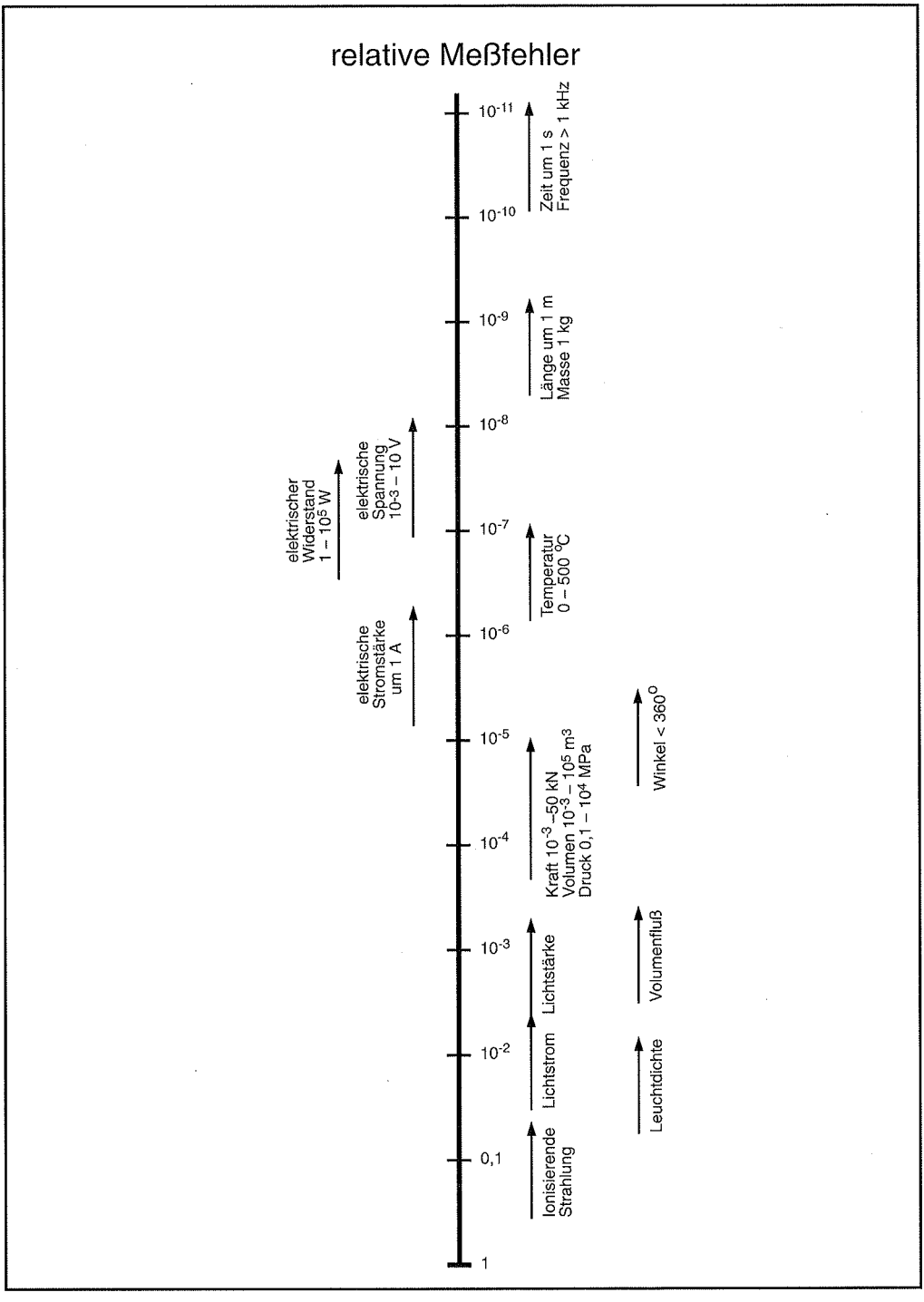
Man unterscheidet zwischen systematischen und zufälligen Fehlern. Erstere kann man nach ihrem Erkennen entweder vermeiden oder durch entsprechende Korrekturrechnungen aus dem Ergebnis eliminieren. Den Einfluß der zufälligen Fehler versucht man dadurch zu minimieren, indem man die entsprechende Messung mehrfach wiederholt und dann den daraus berechneten Mittelwert der Messung mit seinem Fehlerintervall angibt. Da zufällige Fehler unterschiedliche Meßwertabweichungen bewirken, ist die Annäherung des Mittelwertes an einen (theoretisch) fehlerfreien Wert mit zunehmender Versuchszahl immer besser. Zur Ermittlung des Mittelwertes haben sich verschiedene Methoden herausgebildet (arithmetisches Mittel, geometrisches Mittel, Methode der kleinsten Quadrate etc.).

Die bisher beschriebene Betrachtungsweise gibt zu einem Meßwert einen absoluten Fehlerbetrag an. Viele Meßwerte müssen aber über einen großen Wertebereich bestimmt werden, bei der Länge geht dieser Bereich in der Praxis über mindestens 10 Zehnerpotenzen. Da wird es interessant, mit welcher Genauigkeit die Länge über den ganzen Bereich hinweg bestimmt werden kann. Dies kann man mit der Angabe des relativen Meßfehlers erreichen. Er ist eine Verhältniszahl aus absolutem Meßfehler ΔW und dazugehörigem Meßwert W:

$$F_r = \Delta W / W.$$

Bei gleichbleibendem relativen Fehler ist der absolute Fehler bei einer Längenmessung im mm-Bereich natürlich kleiner als bei einer Messung im km-Bereich.

Die Skale gibt für die wichtigsten hier behandelten Größen die Spanne der zur Zeit erreichbaren relativen Meßfehler an. Man beachte den zu den anderen Skalen umgedrehten Verlauf (der kleinste Wert steht oben). Der relative Meßfehler 1 ist die obere Grenze, denn dann ist der Fehler genauso groß wie der Meßwert und man kann eigentlich nicht mehr von der Bestimmung eines Meßwertes sprechen. Bemerkenswert ist der sehr geringe Wert für die Zeit- und die Längenmessung. Hier spiegelt sich ein lange intensive Arbeit an der Darstellung dieser Basiseinheiten wider, die natürlich auch zur Verfeinerung der allgemein verfügbaren Meßtechnik für diese Größen geführt hat.


relative Meßfehler
1
0,1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
10^{-8}
10^{-9}
10^{-10}
10^{-11}
Ionisierende Strahlung
Lichtstrom
Lichtstärke
Kraft 10^{-3} –50 kN
Volumen 10^{-3} – 10^{5} m^3
Druck 0,1 – 10^{4} MPa
elektrische Stromstärke um 1 A
elektrischer Widerstand 1 – 10^{5} W
elektrische Spannung 10^{-3} – 10 V
Temperatur 0 – 500 °C
Länge um 1 m
Masse 1 kg
Zeit um 1 s
Frequenz > 1 kHz
Leuchtdichte
Volumenfluß
Winkel < 360°

4 Verknüpfungen von Einheiten

Die Maßeinheiten beschreiben zusammen mit den ihnen zugeordneten Werten einen wesentlichen Ausschnitt der physikalischen Welt. Das SI ordnet diese Vielfalt der Maßeinheiten einerseits nach den Basiseinheiten. Auf der anderen Seite leiten sich innerhalb des SI Maßeinheiten zur Beschreibung anderer Sachverhalte entsprechend den durch mathematische Formeln zum Ausdruck gebrachten Zusammenhängen zwischen den durch die Basiseinheiten charakterisierten Grundgrößen ab. In diesem Kapitel sollen diese, bei den einzelnen Skalen z.T. schon erwähnten, qualitativen Zusammenhänge dargestellt werden. Dieses vielfältig vernetzte Gefüge läßt sich – bei Strafe seiner Übersichtlichkeit – nicht in einem Bild erfassen, so daß es auf neun Teilbilder aufgegliedert wurde.

Die Gliederung folgt weitgehend den Basiseinheiten Meter (m), Sekunde (s) , Kilogramm (kg), Ampere (A), Kelvin (K), Candela (cd) und Steradiant (sr). Die Basiseinheit Mol (für die Stoffmenge) fehlt hier wie bei den Skalen wiederum. Neben den Erörterungen in Abschnitt 3.6 sei noch einmal auf deren Sonderstellung zwischen Physik und Chemie hingewiesen. Die Problemstellungen dieses Feldes der Naturerforschung machten die Einführung dieser Basiseinheit notwendig, verleihen ihr aber auch den etwas außerhalb des hier dargestellten Netzes liegenden Ort im Gefüge der Maßeinheiten.

Wegen der Vielfalt an Einheiten, ihrer zum Teil spezifischen Aussage und weil sie teilweise noch nicht ins SI integriert sind, werden noch drei weitere Strukturbilder dargestellt. Dies betrifft einmal Energie und Leistung, die in vielfältigen Bereichen eine bedeutende Rolle spielen und viele spezifische Einheitenausprägungen haben. Zum zweiten wurden aufgrund ihrer großen praktischen Bedeutung die vielfältigen Beziehungen der Maßeinheiten für die ionisierende Strahlung in einem eigenen Strukturbild dargestellt. Sie lassen sich zwar prinzipiell aus den Basiseinheiten ableiten – i. allg. aber zu Lasten der Übersichtlichkeit. Zum dritten muß für die Information und die mit ihren Phänomenen verbundenen Einheiten ein eigenes Strukturbild vorgestellt werden. Neben einer – sicherlich bald zu erwartenden – formalen Einordnung in das SI steht inhaltlich natürlich noch immer die nicht gelöste Frage nach dem Charakter und der Stellung der Information im physikalischen Weltbild.

Die beiden Größen Energie und Leistung haben offensichtlich eine Sonderstellung. Diesen beiden kommt in der Natur, der Technik und dem täglichen Leben eine zentrale Bedeutung zu. Diese spiegelt sich auch in den entsprechenden Wissenschaften (Physik, Chemie, Biologie, Technik) wider. Auch die vielen, inhaltlich weitgehend gleiche Bedeutung habenden Namen z.B. für die Energie (Arbeit, Wärmemenge, teilweise auch Enthalpie) weisen auf ihre Allgegenwart hin. Das SI ignoriert diesen Sachverhalt vollständig. Energie (und auch Leistung) sind aus seiner Sicht keine Basisgrößen, sondern sind aus denen der Mechanik – also aus Meter, Kilogramm und Sekunde – ableitbar. Entsprechend dem Energieerhaltungssatz und der grundlegenden

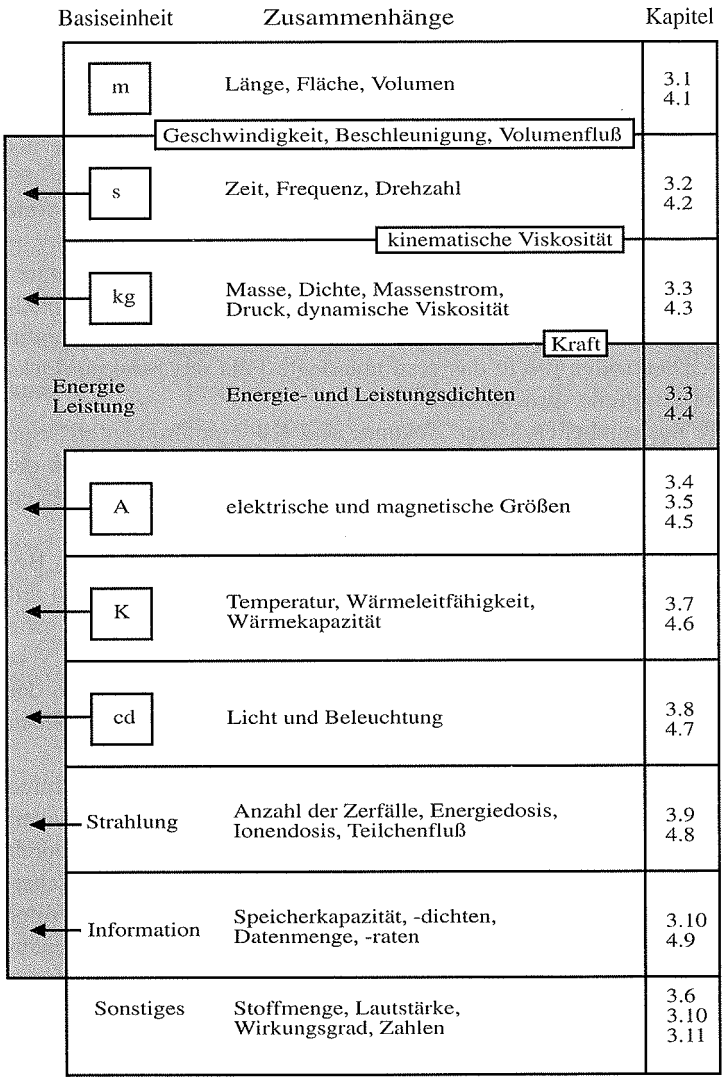


Abb. 4.1
Zusammenhänge der Strukturgruppen. Die Abschnittszahlen in der rechten Spalte geben die entsprechenden Abschnitte an. Die nicht in Strukturtafeln erfaßten Einheiten sind im untersten Feld zusammengefaßt.

Erfahrung, daß die unterschiedlichsten Energieformen beliebig untereinander umwandelbar sind (die Thermodynamik definiert bestimmte Ausnahmen), scheint das Problem aus der Sicht der Einheitensystematik gelöst. Da aber die verschiedenen Energieformen physikalisch auch spezifische Qualitäten zum Ausdruck bringen, haben sich für viele auch spezielle Einheiten eingebürgert. Damit macht schon die Angabe der Einheit deutlich, um welche Energieart es sich jeweils handelt. Außerdem sind die spezifischen Betrachtungsweisen (Energieflüsse, -dichten etc.) so vielfältig, daß viele Maßeinheiten direkt auf Watt oder Joule Bezug nehmen.

Eine weitere Besonderheit macht die Übersicht über die Verflechtung der Strukturgruppen in Abbildung 4.1 deutlich. Mit Ausnahme der Länge sind die anderen Einheiten der Strukturblöcke mit denen der Energie bzw. Leistung verbunden, sie kommen in deren Strukturbild vor. Dies sollen die in das grau unterlegte Feld des Strukturblocks Energie/Leistung weisenden Pfeile verdeutlichen.

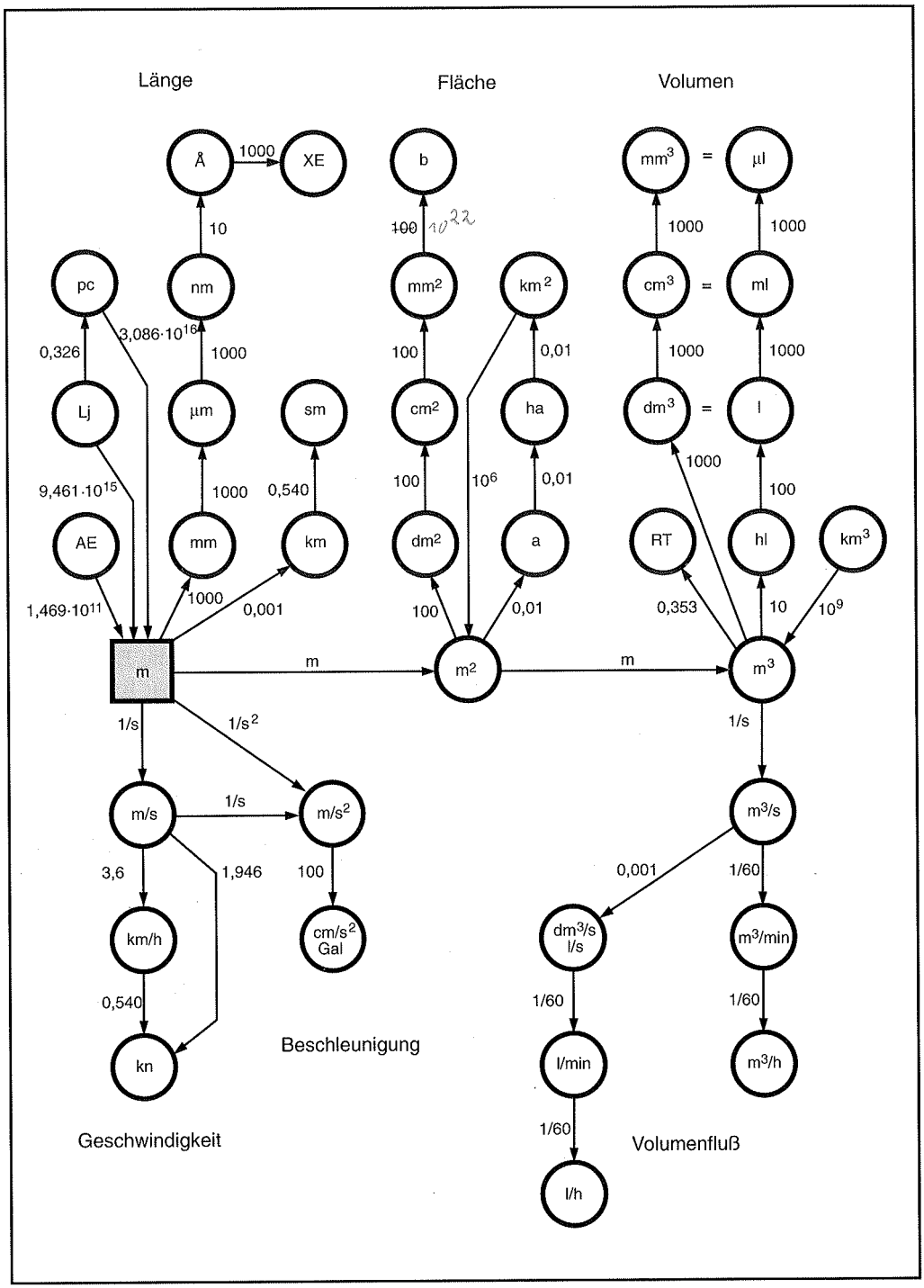
Natürlich spielen die Basiseinheiten Meter, Sekunde und Kilogramm ebenfalls eine zentrale Rolle, die ja durch den Aufbau des SI auch reflektiert wird. Zu der durch die Hierarchie der Maßeinheiten abgebildeten Struktur der (physikalischen) Wirklichkeit ist in der Einführung zu Kapitel 3 einiges gesagt.

Eine Besonderheit wird in Abbildung 4.1 für die Größen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Volumenfluß, kinematische Viskosität und Kraft deutlich. Sie sind auf den Grenzlinien der einzelnen Strukturgruppen angeordnet. Das sagt einmal ganz formal aus, daß ihre Maßeinheiten in den beiden entsprechenden Strukturtafeln vorkommen. Inhaltlich bedeutet es für diese Größen, daß sie aus einer Kombination der Größen definiert sind, die durch die beiden angrenzenden Strukturgruppen beschrieben werden.

Bevor auf die einzelnen Strukturtafeln speziell eingegangen wird, sollen noch einige allgemeine Hinweise zur Darstellung gegeben werden. Die jeweiligen Basiseinheiten sind durch grau unterlegte Quadrate gekennzeichnet, alle anderen Einheiten durch Kreise. Die Verbindung zwischen den Einheiten erfolgt nach graphentheoretischen Gesichtspunkten durch einen gerichteten und bewerteten Pfeil. Die Bewertung erfolgt mittels Zahlen oder Einheiten. Sie geben die Umrechnungsvorschrift an und spiegeln damit auch den inhaltlichen Zusammenhang der durch die entsprechenden Maßeinheiten beschriebenen Größen wider. Die Darstellung $m \xrightarrow{m} m^2$ bedeutet, daß der Übergang von Meter (m) zu Quadratmeter (m^2) formal durch die Multiplikation mit Meter (m) erfolgt. Entsprechend sind Zahlenwerte zu interpretieren, $min \xrightarrow{1/60} h$ bedeutet, daß 1 Minute gleich 1/60 Stunde ist.

4.1 Länge und abgeleitete Einheiten

Durch die Basiseinheit der Länge sind auch die Einheiten für Fläche und Raum bestimmt. Die Tafel erfaßt alle entsprechenden SI-Einheiten mit ihren Vorsätzen. Bei den Volumeneinheiten existiert eine Besonderheit. Drei vom Liter (l) abgeleitete Ein-


Länge
Fläche
Volumen
Å
1000
XE
10
pc
nm
3,086·10^16
0,326
1000
Lj
µm
sm
9,461·10^15
1000
0,540
AE
mm
km
1,469·10^11
1000
0,001
b
100
10^22
mm²
km²
100
0,01
cm²
ha
100
10^6
0,01
dm²
a
100
0,01
mm³
=
µl
1000
1000
cm³
=
ml
1000
1000
dm³
=
l
1000
100
RT
hl
km³
0,353
10
10^9
m
m
m²
m
m³
1/s
1/s²
1/s
m³/s
m/s
m/s²
3,6
1,946
100
0,001
1/60
km/h
cm/s²
Gal
dm³/s
l/s
m³/min
0,540
1/60
1/60
kn
Beschleunigung
l/min
m³/h
1/60
l/h
Geschwindigkeit
Volumenfluß

heiten sind mit metrischen identisch, nur für den Hektoliter (hl) gibt es keine mit Vorsätzen zum m^3 entsprechende Einheit. Für die Vielzahl der nicht zum SI gehörenden Einheiten sei auf die Texte zu den entsprechenden Skalen verwiesen, die auch Sonderaspekte (wie z.B. Dioptrien) berücksichtigen.

Entsprechend der Stellung der Größen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Volumenfluß in der Strukturgruppenzuordnung findet sich im unteren Teil der Tafel ihre Ableitung aus der Grundeinheit Meter entsprechend den physikalischen Zusammenhängen zwischen Länge (bzw. Volumen) und Zeit. Sie werden in der Tafel des Abschnitts 4.2. auch noch einmal – einer gewissen Symmetrie gehorchend – auftauchen. Diese Symmetrie macht deutlich, daß für die Beschreibung von Bewegungsvorgängen Raum und Zeit eine gewisse Gleichberechtigung besitzen.

4.2 Zeit und Frequenz

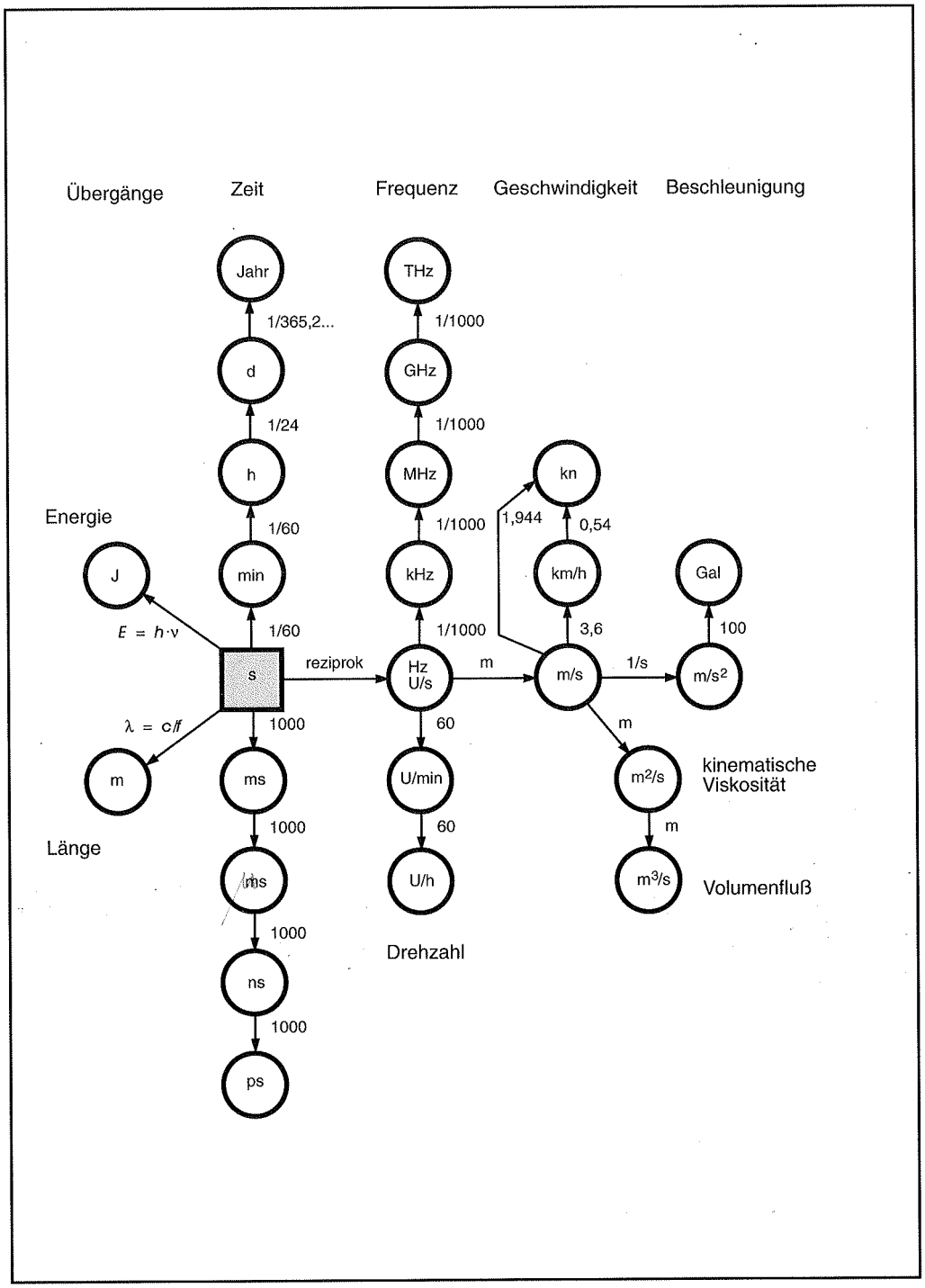
Geschuldet der Tatsache, daß alle Vorgänge der Natur in der Zeit ablaufen, ist die Basiseinheit Sekunde (s) eine der Einheiten, die (vielfach in Kombination) in fast allen Gebieten auftritt. Durch ihr Reziprokes kommt man zur ebenso bedeutenden Einheit der Schwingung, dem Hertz (Hz), welches wiederum gleichbedeutend der Einheit Umdrehung pro Sekunde (U/s) ist.

Analog zur Strukturtafel für die Länge finden sich auch hier wieder die Einheiten für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Volumenfluß. Den Übergang zur folgenden Strukturtafel bahnt die Einheit für kinematische Viskosität an, die von der inhaltlichen Seite eher in die Strukturtafel 4.4 paßt.

Um die inhaltliche Kopplung zu verdeutlichen, wurden in dieser Tafel die Übergänge zur Energie und zur Länge angedeutet und durch die dahinterstehenden physikalischen Beziehungen verdeutlicht.

So ist jeder Wellenerscheinung der Frequenz f über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle c eine Größe der Dimension Länge zugeordnet – die Wellenlänge λ. Für elektromagnetische Wellen ist c die Lichtgeschwindigkeit, für Schallwellen die Schallgeschwindigkeit usw.

Der andere Übergang basiert auf einem grundlegenden Phänomen der Quantentheorie. Hiernach kann jede elektromagnetische Welle der Frequenz ν als aus unteilbaren, individuellen Energie-Quanten der Energie E bestehend betrachtet werden. Die Energie und die zugehörige Frequenz sind über das Plancksche Wirkungsquantum h miteinander verbunden.

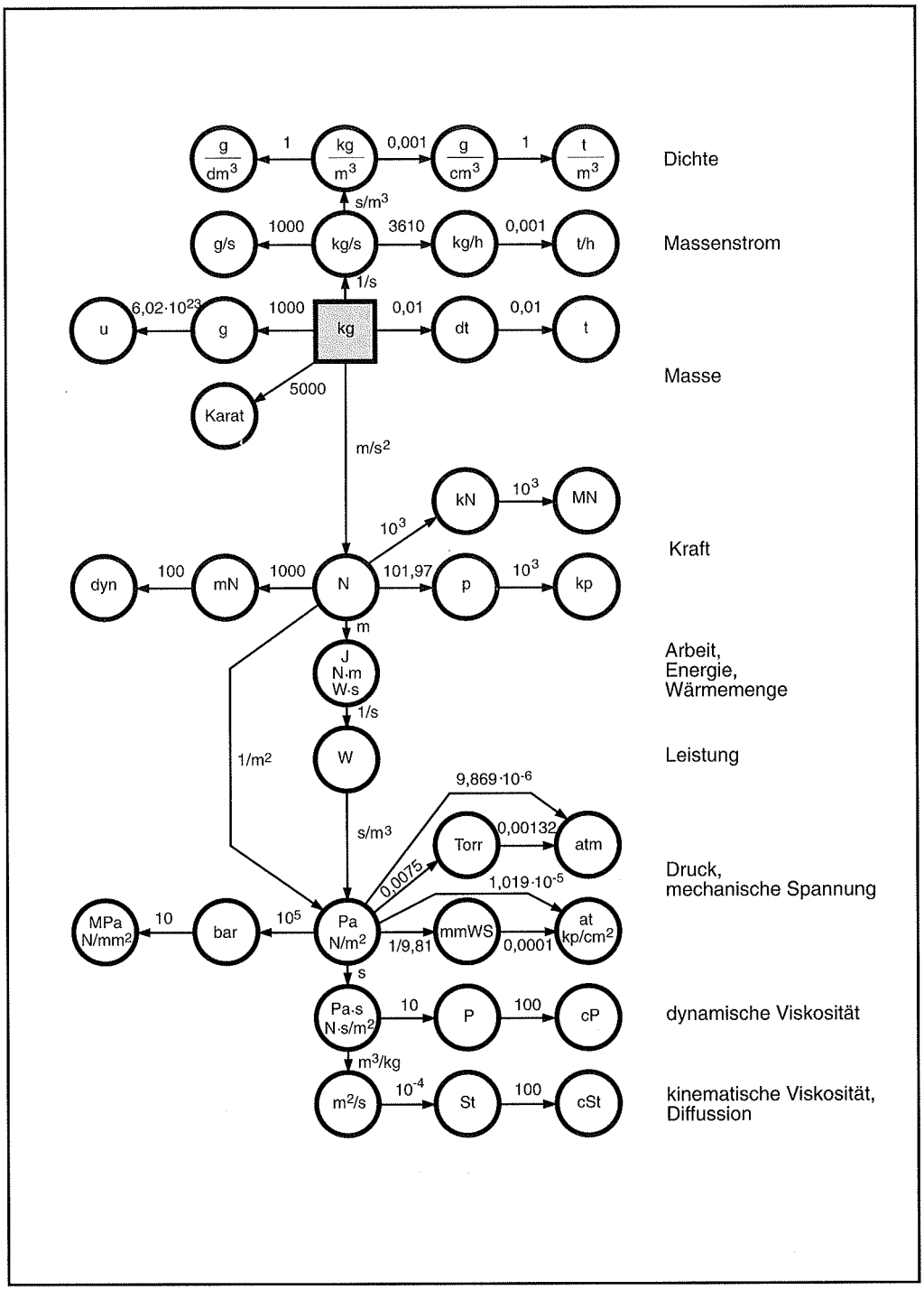

Übergänge
Zeit
Frequenz
Geschwindigkeit
Beschleunigung
Jahr
1/365,2...
d
1/24
h
1/60
min
1/60
s
1000
ms
1000
µs
1000
ns
1000
ps
THz
1/1000
GHz
1/1000
MHz
1/1000
kHz
1/1000
Hz
U/s
60
U/min
60
U/h
Drehzahl
reziprok
m
kn
1,944
0,54
km/h
3,6
m/s
1/s
Gal
100
m/s²
m
m²/s
kinematische
Viskosität
m
m³/s
Volumenfluß
Energie
J
E = h·ν
Länge
m
λ = c/f

4.3 Masse und Ableitungen

Die Strukturtafel zur Basiseinheit der Masse betrifft in der Hauptsache Größen der Mechanik. Entsprechend sind die Einheiten für Masse, Kraft und Druck im Zentrum der Betrachtung. Die Einheiten der Viskositäten zeigen hier den Zusammenhang mit der Einheit der Zeit.

Die Kraft macht den Übergang zur Strukturtafel der Energie und Leistung sehr deutlich. Zu den verschiedenen, sich historisch stark wandelnden Auffassungen zum Charakter der Kraft ist im Abschnitt 3.3.3 einiges gesagt.

Die Angabe der Einheiten zu Energie und Leistung soll nur den Bezug zur Strukturtafel 4.4 herstellen.

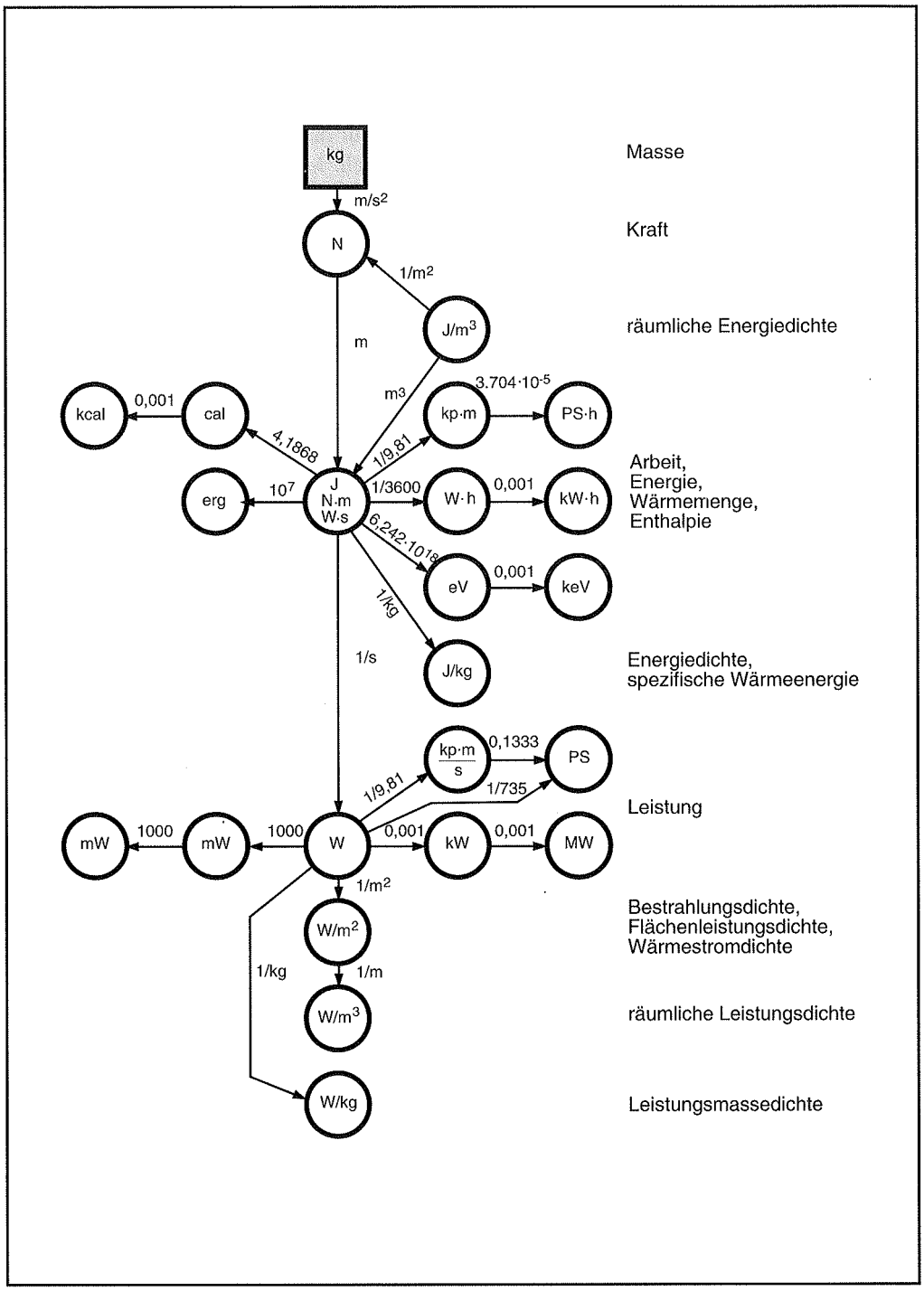

g/dm³
1
kg/m³
0,001
g/cm³
1
t/m³
Dichte
s/m³
g/s
1000
kg/s
3610
kg/h
0,001
t/h
Massenstrom
1/s
u
6,02·10²³
g
1000
kg
0,01
dt
0,01
t
Masse
5000
Karat
m/s²
kN
10³
MN
10³
Kraft
dyn
100
mN
1000
N
101,97
p
10³
kp
m
J
N·m
W·s
Arbeit,
Energie,
Wärmemenge
1/s
1/m²
W
Leistung
9,869·10⁻⁶
s/m³
Torr
0,00132
atm
0,0075
1,019·10⁻⁵
Druck,
mechanische Spannung
MPa
N/mm²
10
bar
10⁵
Pa
N/m²
1/9,81
mmWS
0,0001
at
kp/cm²
s
Pa·s
N·s/m²
10
P
100
cP
dynamische Viskosität
m³/kg
m²/s
10⁻⁴
St
100
cSt
kinematische Viskosität,
Diffussion

4.4 Energie und Leistung

Auf die besondere Stellung der beiden Größen Energie und Leistung wurde zu Beginn dieses Kapitels bereits hingewiesen. Die entsprechende Strukturtafel müßte eigentlich alle Querbezüge zu den anderen Größen und damit zu deren Einheiten ausweisen (vgl. Abb. 4.1). Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist auf diese Vernetzung verzichtet worden. Dafür weisen die jeweiligen anderen Strukturtafeln auf ihren Bezug zu Energie und Leistung hin.

Die Tafel veranschaulicht die Vorgehensweise des SI bei der Ableitung der Einheit für die Energie aus den Basiseinheiten Kilogramm, Meter und Sekunde.

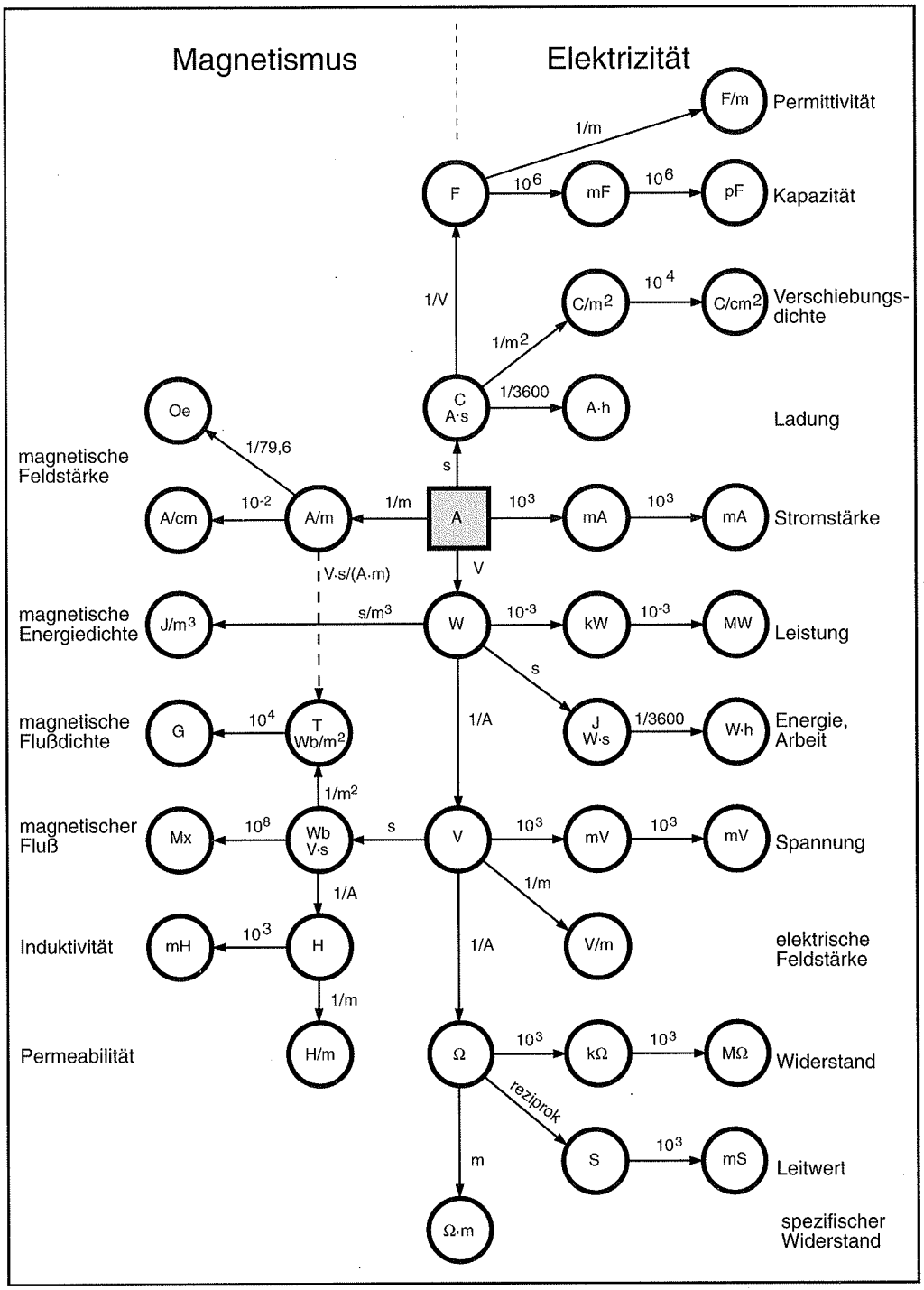
Von der Vielzahl der speziellen Einheiten für die Energie in ihren unterschiedlichsten Ausprägungsformen konnten nur einige der wichtigsten berücksichtigt werden.


kg
m/s²
N
1/m²
J/m³
m
m³
kcal
0,001
cal
4,1868
3.704·10⁻⁵
kp·m
PS·h
1/9,81
erg
10⁷
J
N·m
W·s
1/3600
W·h
0,001
kW·h
6,242·10¹⁸
eV
0,001
keV
1/kg
1/s
J/kg
kp·m/s
0,1333
PS
1/9,81
1/735
mW
1000
mW
1000
W
0,001
kW
0,001
MW
1/m²
W/m²
1/kg
1/m
W/m³
W/kg
Masse
Kraft
räumliche Energiedichte
Arbeit, Energie, Wärmemenge, Enthalpie
Energiedichte, spezifische Wärmeenergie
Leistung
Bestrahlungsdichte, Flächenleistungsdichte, Wärmestromdichte
räumliche Leistungsdichte
Leistungsmassedichte

4.5 Elektrizität und Magnetismus

Die Größen der Elektrizität und des Magnetismus finden vor allem in der Elektrotechnik ihre breite praktische Anwendung. Solange nur die elektrische Seite betrachtet wird, bleiben die Zusammenhänge relativ übersichtlich. Mit den Größen zu den Maßeinheiten Ampere (A), Volt (V), Ohm (Ω) und Watt (W) sowie deren Beziehung zueinander lassen sich die Phänomene recht gut beschreiben und die wesentlichen Gesetzmäßigkeiten formulieren. Für speziellere Anwendungen kommen dann noch das Coulomb (C), das Farad (F) und das Ohmmeter (Ωm) mit ihren entsprechenden Größen hinzu. Das Watt markiert wieder den Übergang zu Leistung und Energie, hier in ihrer elektromagnetischen Ausprägung.

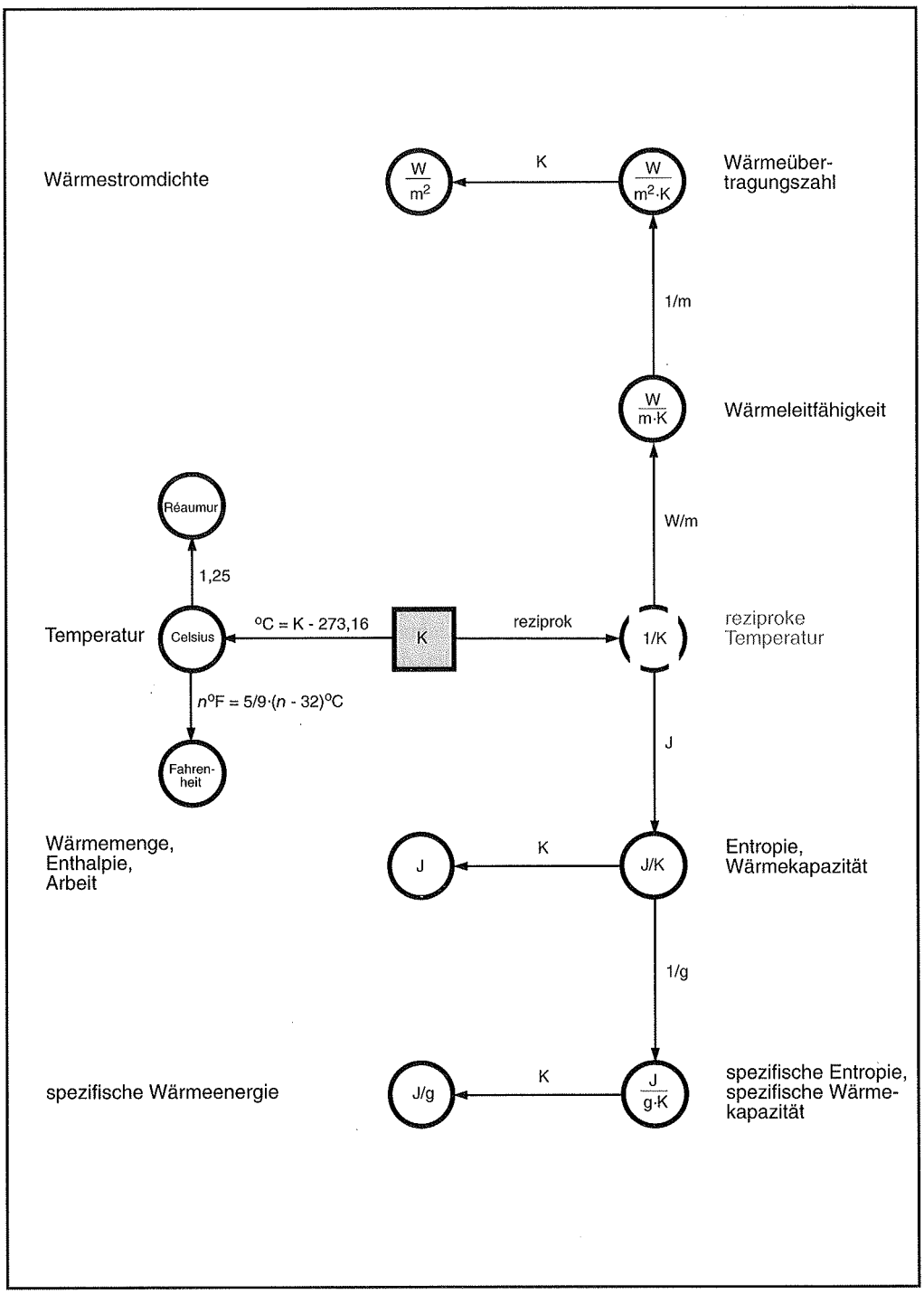
Wesentlich unübersichtlicher ist die Lage bei den magnetischen Einheiten. Dies wird noch dadurch erschwert, daß im SI – eigentlich sogar gegen seine eigene theoretische Grundlage – keine spezielle magnetische Einheit definiert wird. Häufig wird mit der Feldstärke in A/m und der magnetischen Flußdichte in T gearbeitet. Doch gerade hier wird in der Strukturtafel das Problem des Zusammenhangs deutlich. Da in den Abschnitten 3.4 und 3.5 dazu ausführlich Stellung genommen wurde, sollte hier nur noch einmal auf das Problem hingewiesen werden.


Magnetismus
Elektrizität
F/m
Permittivität
1/m
F
10^6
mF
10^6
pF
Kapazität
1/V
C/m2
10^4
C/cm2
Verschiebungs-
dichte
1/m2
Oe
C
A·s
1/3600
A·h
Ladung
1/79,6
magnetische
Feldstärke
s
A/cm
10-2
A/m
1/m
A
10^3
mA
10^3
mA
Stromstärke
V·s/(A·m)
V
magnetische
Energiedichte
J/m3
s/m3
W
10-3
kW
10-3
MW
Leistung
s
magnetische
Flußdichte
G
10^4
T
Wb/m2
1/A
J
W·s
1/3600
W·h
Energie,
Arbeit
1/m2
magnetischer
Fluß
Mx
10^8
Wb
V·s
s
V
10^3
mV
10^3
mV
Spannung
1/m
1/A
Induktivität
mH
10^3
H
1/A
V/m
elektrische
Feldstärke
1/m
Permeabilität
H/m
Ω
10^3
kΩ
10^3
MΩ
Widerstand
reziprok
m
S
10^3
mS
Leitwert
Ω·m
spezifischer
Widerstand

4.6 Temperatur

Die Einheit der Temperatur ist ohne Bezug auf die anderen Einheiten definiert. Das charakterisiert auch die Stellung der Thermodynamik als die entsprechende physikalische Disziplin im Gesamtgefüge der Physik. Sie ist aufgrund ihres, vom System ausgehenden anderen Betrachtungsansatzes der Phänomene über die Energie und deren Einheiten in das Gesamtgefüge einbindbar. Die entsprechenden Bezüge macht die Strukturtafel deutlich.

Bei der Einheit der Temperatur besteht die Besonderheit, daß es eine zu ihr reziproke Einheit nicht gibt. Um die Ableitung der anderen Einheiten der Thermodynamik in das entsprechende Strukturdiagramm zu bringen, wurde eine fiktive Zwischeneinheit 1/K eingeführt.


Wärmestromdichte
W/m²
K
W/m²·K
Wärmeübertragungszahl
1/m
W/m·K
Wärmeleitfähigkeit
W/m
Réaumur
1,25
Temperatur
Celsius
°C = K - 273,16
K
reziprok
1/K
reziproke Temperatur
n°F = 5/9·(n - 32)°C
Fahrenheit
J
Wärmemenge, Enthalpie, Arbeit
J
K
J/K
Entropie, Wärmekapazität
1/g
spezifische Wärmeenergie
J/g
K
J/g·K
spezifische Entropie, spezifische Wärmekapazität

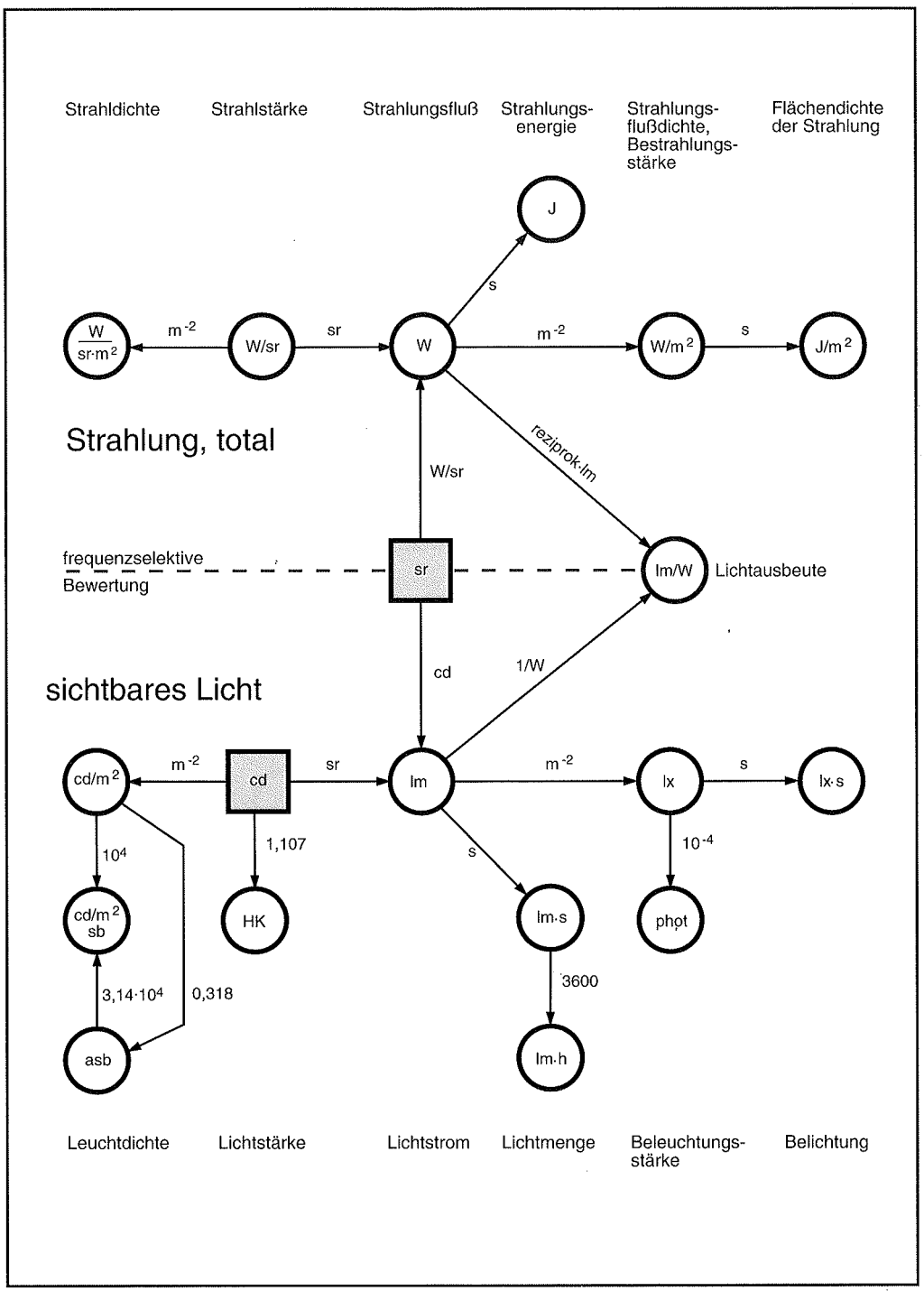
4.7 Lichttechnik

In der Lichttechnik finden sich zwei Betrachtungen des Phänomens elektromagnetische Strahlung, die Radio- und die Photometrie.

Die Radiometrie betrachtet die Strahlung unmittelbar als physikalisches Phänomen. Sie kommt dadurch mit den Einheiten für die Energie bzw. Leistung aus, da diese die wesentlichen Aspekte für die physikalische Wirkung von Strahlung sind. Lediglich für die unterschiedliche Wirkung in den Raum ist zusätzlich noch die Basiseinheit des Raumwinkels, das Steradiant, notwendig. Die entsprechenden Maßeinheiten zeigt die obere Hälfte der Strukturtafel.

Die Photometrie betrachtet nur den sichtbaren Teil der elektromagnetischen Strahlung und diesen in bezug auf das Helligkeitsempfinden unseres Auges. Die Diskussion der entsprechenden Zusammenhänge ist in Abschnitt 3.8 geführt worden. Aus dieser physiologisch orientierten Betrachtungsweise der Strahlung machte sich auch die Einführung einer weiteren Basiseinheit, des Candela, notwendig. Der untere Teil der Strukturtafel enthält die Zusammenhänge der photometrischen Einheiten und auch die Ableitungen weiterer Spezialeinheiten.

Beachtenswert ist die Spiegelsymmetrie dieser Tafel längs einer durch die Einheit für die Lichtausbeute gehenden Geraden. Diese Symmetrie verdeutlicht die Zuordnung der Einheiten der Radiometrie zu denen der Photometrie und umgekehrt, die im Abschnitt 3.8 ausführlich dargestellt sind. Die Lichtausbeute als eine spezielle Form eines Wirkungsgrades (vgl. Abschn. 3.10.8) bildet den Übergang zwischen Radio- und Photometrie und damit zwischen physikalischer und physiologischer Betrachtungsweise der Wirkung elektromagnetischer Strahlung im optischen Frequenzbereich.

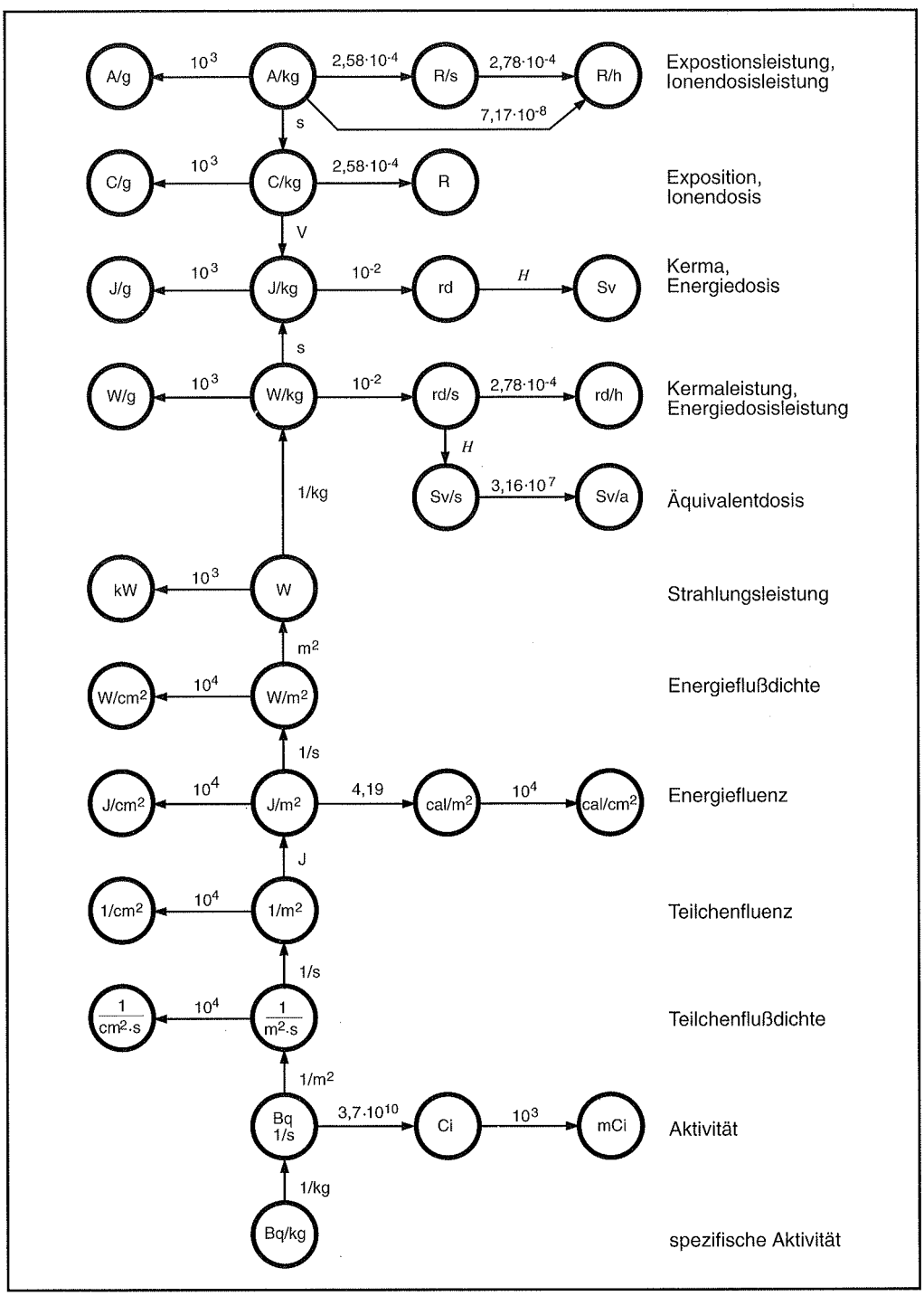

Strahldichte
Strahlstärke
Strahlungsfluß
Strahlungs-energie
Strahlungs-flußdichte, Bestrahlungs-stärke
Flächendichte der Strahlung
J
s
W / sr·m²
m⁻²
W/sr
sr
W
m⁻²
W/m²
s
J/m²
Strahlung, total
W/sr
reziprok·lm
frequenzselektive Bewertung
sr
lm/W
Lichtausbeute
cd
1/W
sichtbares Licht
cd/m²
m⁻²
cd
sr
lm
m⁻²
lx
s
lx·s
10⁴
1,107
s
10⁻⁴
cd/m² sb
HK
lm·s
phot
3600
3,14·10⁴
0,318
asb
lm·h
Leuchtdichte
Lichtstärke
Lichtstrom
Lichtmenge
Beleuchtungs-stärke
Belichtung

4.8 Ionisierende Strahlung

Die verschiedenen SI-Einheiten zur Messung von ionisierender Strahlung setzen sich nur sehr langsam durch. Dadurch sind oftmals auch Zahlenangaben mit großer Unsicherheit behaftet.

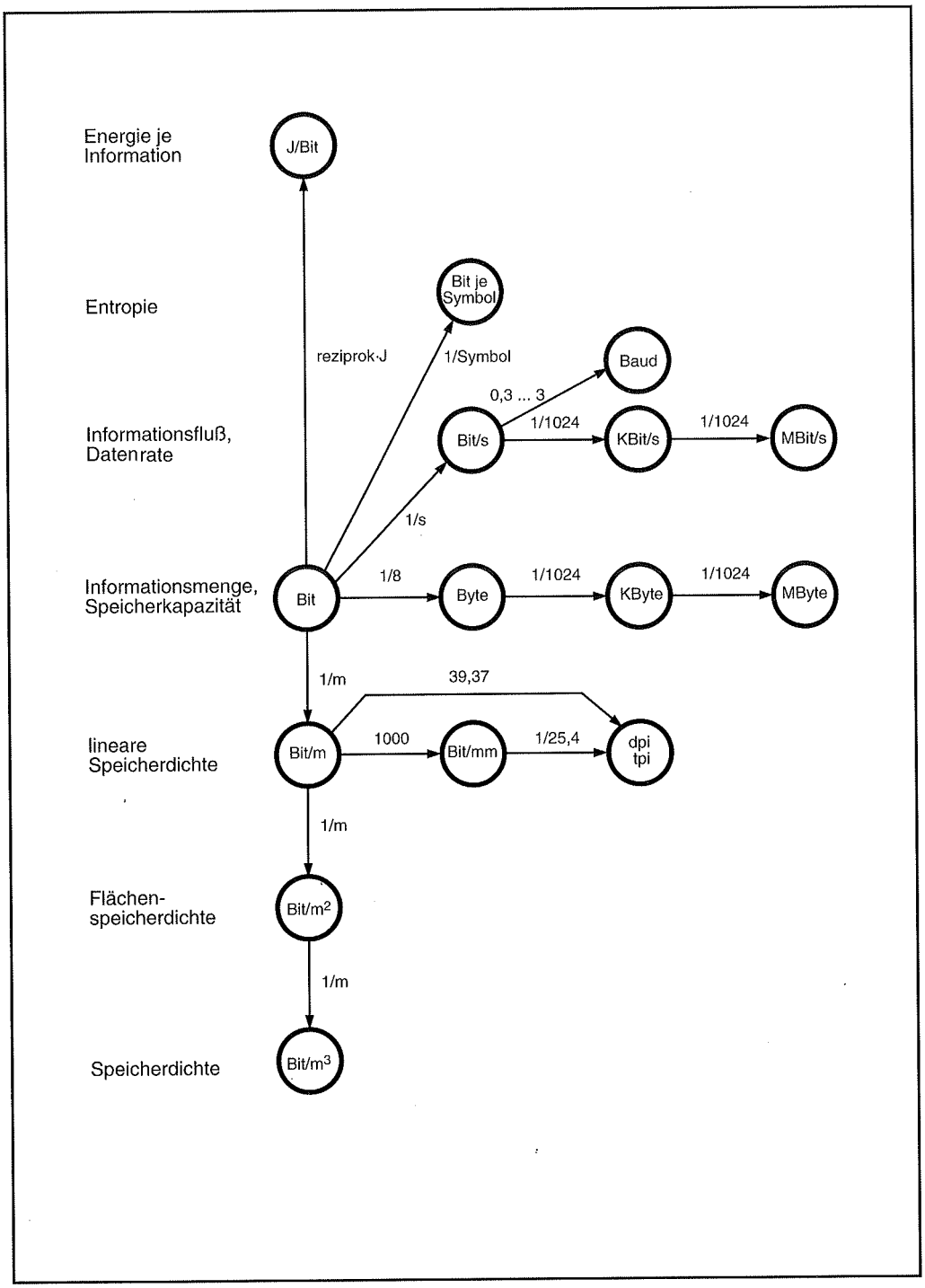
Im Abschnitt 3.9 wurden die wichtigsten Grundlagen und Probleme der Messung energiereicher Strahlung bereits im Überblick behandelt und bei den entsprechenden Skalen noch im Detail vertieft. Die Strukturtafel zeigt aber, daß es noch eine Vielzahl weiterer Meßmöglichkeiten gibt. Da die Messung der ionisierenden Strahlung im Vergleich zu den anderen Gebieten erst relativ kurze Zeit existiert, sind hier noch Vereinheitlichungen zu erwarten.

Im Grunde gehen alle möglichen Maßeinheiten auf die vier, auch sonst verfügbaren Einheiten für die Energie (Joule), die Leistung (Watt), die elektrische Ladung (Coulomb) und die Anzahl der Zerfälle zurück. Die Besonderheiten bei der Wirkung der energiereichen Strahlungen auf die Tier- und Pflanzenwelt und insbesondere auf den menschlichen Organismus machen die Verhältnisse z.T. recht unübersichtlich. Es existiert auch kein einheitlicher „Filter" zur Beschreibung der physiologischen Wirkung (wie bei der Lichttechnik) – lediglich der Bewertungsfaktor H (vgl. Abschn. 3.9) stellt einen ersten Ansatz dar.


A/g
10^3
A/kg
2,58·10⁻⁴
R/s
2,78·10⁻⁴
R/h
7,17·10⁻⁸
Expostionsleistung, Ionendosisleistung
s
C/g
10^3
C/kg
2,58·10⁻⁴
R
Exposition, Ionendosis
V
J/g
10^3
J/kg
10^{-2}
rd
H
Sv
Kerma, Energiedosis
s
W/g
10^3
W/kg
10^{-2}
rd/s
2,78·10⁻⁴
rd/h
Kermaleistung, Energiedosisleistung
H
1/kg
Sv/s
3,16·10⁷
Sv/a
Äquivalentdosis
kW
10^3
W
Strahlungsleistung
m²
W/cm²
10^4
W/m²
Energieflußdichte
1/s
J/cm²
10^4
J/m²
4,19
cal/m²
10^4
cal/cm²
Energiefluenz
J
1/cm²
10^4
1/m²
Teilchenfluenz
1/s
1/cm²·s
10^4
1/m²·s
Teilchenflußdichte
1/m²
Bq 1/s
3,7·10¹⁰
Ci
10^3
mCi
Aktivität
1/kg
Bq/kg
spezifische Aktivität

4.9 Information

Die Maßeinheiten für die Information stehen zur Zeit noch relativ isoliert neben der Struktur der SI-Einheiten. Das liegt wesentlich in der in Abschnitt 3.10.1 diskutierten Stellung der Information im Gefüge der anderen, unsere Welt beschreibenden Größen. Aufgrund ihrer großen praktischen Bedeutung wurde ihre – relativ übersichtliche – Struktur hier auch in einer Tafel dargestellt. Eine mögliche Anbindung ist aus der jetzigen Sicht über die Einheit der Energie möglich (in Form der Einheit Energie/Information). Dabei wird eine Eigenschaft des materiellen Trägers der Information betrachtet, was die Anbindung an das (materielle) physikalisch basierte Einheitensystem des SI wieder ermöglicht. Damit ist aber noch keine inhaltliche Verknüpfung mit der Information selbst erreicht. Diese Situation bei den Maßeinheiten spiegelt des Diskussionstand auf der qualitativen Ebene der die Phänomene beschreibenden Größen wider. Hier sind auf Seiten der Maßeinheiten erst Fortschritte zu erwarten, wenn grundlegende inhaltliche Fragen geklärt wurden.


Energie je Information
J/Bit
Entropie
Bit je Symbol
reziprok·J
1/Symbol
Baud
0,3 ... 3
Informationsfluß, Datenrate
Bit/s
1/1024
KBit/s
1/1024
MBit/s
1/s
Informationsmenge, Speicherkapazität
Bit
1/8
Byte
1/1024
KByte
1/1024
MByte
1/m
39,37
lineare Speicherdichte
Bit/m
1000
Bit/mm
1/25,4
dpi tpi
1/m
Flächen-speicherdichte
Bit/m²
1/m
Speicherdichte
Bit/m³

5 Von der Welt der Zahlen zur Welt in Zahlen

Im Kapitel 3 sind vielfältige Phänomene unserer Welt durch Größen – das sind Zahlen mit einer entsprechenden Maßeinheit – charakterisiert und dann nach einer bestimmten Systematik sortiert worden. Diese Systematik bestand im wesentlichen darin, innerhalb einer Maßeinheit die Zahlen nach ihrer Größe zu ordnen. Wir haben letztlich Aspekte unserer realen Welt auf eine andere Welt, nämlich die der Zahlen, abgebildet. Welche Informationen der realen Welt bei dieser Abbildung verloren gehen, wollen wir hier nicht näher untersuchen. Dieses Kapitel soll die Welt der Zahlen und wichtige Teile ihrer Struktur vorstellen. Der letzte Abschnitt wird ein erstes Fenster zum Kapitel 7 öffnen. Wir werden einen ersten Blick auf das Phänomen der Verselbständigung dieser Abbildwelt werfen.

Über das Gebiet der Zahlen gibt es unter den verschiedensten Gesichtspunkten zahlreiche Veröffentlichungen – zur Entstehung der Zahlen, zu ihrer Symbolik und Mystik wie auch zu philosophischen Fragen. In der Mathematik spielen die Zahlen als Gegenstand ihrer Betrachtung eine wichtige Rolle, hier hat sich ein eigenes Fachgebiet, die Zahlentheorie, herausgebildet.

Mit der Entwicklung des Computers, der als schnelle „Rechenmaschine" die vielfältigsten Aufgaben übernehmen kann (auch das Manuskript für dieses Buch wurde auf solch einem „Rechner" erstellt) und mit seinem Siegeszug durch unser tägliches Leben haben die Zahlen auch eine neue Bedeutung gewonnen. Der Computer verlangt bei jeglicher Art von Daten nach Quantifizierung. Daraus resultiert ein Mangel an Genauigkeit, der sich während der Datenverarbeitung im Computer fortsetzt. Dies stellt die eigentliche Begrenztheit des Computers, seinen Maschinencharakter dar. Die Quantifizierung erfolgt im Computer auf der einfachsten Zahlenbasis, nämlich der dualen. Dadurch ist eine technisch einfache Repräsentation der Daten mittels der Zahlen 1 und 0 möglich. Diese Zahlen und die Operationen mit ihnen werden durch elektrische Schaltungen ausgedrückt. Im gewissen Sinne sind die Zahlen damit im Computer Realität geworden, so wie im antiken Griechenland die Zahlen konkrete, beinahe greifbare Dinge waren.

Wir können hier die Vielfalt der interessanten Themen und Fragen nicht ausschöpfen und verweisen den Interessierten auf die vorhandene Literatur.

5.1 Ziffern und Zahlen – Bedeutung und Deutung

Vor der Entwicklung der Schriftalphabete sind schon Zahlzeichen nachweisbar. In ihrer heutigen Form als Grundbestandteile der nach der Schrift entstandenen Zahlensysteme nennen wir sie Ziffern. Sie sind die kleinsten Einheiten der Zahlen und je nach dem zugrundeliegenden Zahlensystem ist ihre Anzahl unterschiedlich. Im Dezimalsystem sind 0, 1, 2, ..., 9 die Zahlzeichen. Bei den römischen Zahlen haben wir dagegen M, D, C, L, X, V, I. Eine Zahl ist in der Regel aus mehreren Ziffern zusammengesetzt. Nur im Sonderfall, daß die darzustellende Zahl den Wert einer Ziffer hat, ist die Ziffer gleichzeitig eine Zahl. Die Regeln, nach denen die Zahlen durch die Ziffern dargestellt werden, bestimmt das Zahlensystem.

Sowohl die Entwicklung der Ziffern wie auch die der Zahlen hat eine lange und vielfältige Geschichte. Wir haben im Kapitel 2 dazu einiges gesagt und weitere Einzelheiten finden sich in der Geschichtstabelle (vgl. Anhang). Es ist uns aus heutiger Sicht kaum vorstellbar, daß die Römer mit ihrem Zahlensystem effektiv rechnen konnten. Aber auch wir verwenden erst seit dem Mittelalter das über Arabien zu uns kommende dezimale Stellenwertsystem. Darin legt die Stellung einer Ziffer innerhalb der Zahl deren Wert in Zehnerpotenzschritten fest. In der Zahl 32678,45 steht z.B. die Ziffer 2 an vierter Stelle links vom Komma. Dies bedeutet, daß sie an dieser Stelle den Wert $2 \cdot 10^4$ besitzt. In der Computertechnik haben sich das, an sich schon weitaus länger bekannte, Binärsystem und zusätzlich das Hexadezimalsystem durchgesetzt. Beide sind ebenfalls Stellenwertsysteme. Hier ist jedoch die Basis 2 bzw. 16.

Diese enge Verbindung von Schriftzeichen (Buchstabe) und Zahlzeichen (Ziffer) ist sehr wahrscheinlich einer der Anfänge der Zahlenmystik. Sie war und ist bemüht, mit den Zahlen inhaltliche Aussagen zu verbinden, die über ihren eigentlichen Inhalt hinausgehen. Hier wird der Schritt von der Bedeutung der Zahlen zu ihrer Deutung gegangen. Diese Tendenz hatte in der Kabbala ihren Höhepunkt. Später wirkte diese Tradition aufgrund von Querverbindungen bei den Freimaurern, den Rosenkreuzern und z.T. bei den späten Templern weiter. In letzter Konsequenz führen diese Versuche vielfach in die Sophistik. Die Kabbala hat aber auch heute noch beachtlich viele Anhänger. Stark vereinfacht betrachtet geht sie von Triaden, auch Dreiecke genannt, aus: 1, 2, 3 sind dem Geist; 4, 5, 6 dem Stoff und 7, 8, 9 dem göttlichen Ursprung zugeordnet. 10, 11, 12 stehen für den Kosmos. Auch Mann und Frau sind so durch Zahlen ausdrückbar. Die Überlagerung von zwei Dreiecken ergibt jeweils neue Inhalte. Aus Mann und Frau wird so z.B. Sexualität.

Wie verblüffend Zahlenmystik sein kann, soll folgendes Zitat aus dem Buch von Dimiter Korudshiew „Der Garten mit Amseln" (Berlin 1984) zeigen:

> Napoleon wurde 1760 geboren, 129 Jahre später kam Hitler zur Welt. Hitler gelangte genau 129 Jahre nach Napoleon an die Macht, der Abstand zwischen beiden Überfällen auf Rußland ist 129 Jahre, beide verlieren den Krieg (1816 bzw. 1945), und wiederum trennen 129 Jahre die großen Ereignisse. Sie sind im selben Alter – vierundzwanzig Jahre –, als sie an die Macht kommen, zweiundfünfzig, als sie Rußland angreifen, sechsundfünfzig, als sie den Krieg verlieren.

Wir wollen das Zitat hier unkommentiert stehen lassen, der Leser mag sich seinen eigenen Reim darauf machen.

In seinem Buch „Ozean der Wahrheit" versucht Rucker dem Phänomen der Zahlengläubigkeit auf andere Weise nahe zu kommen. Er unterscheidet vier erkenntnistheoretische Archetypen: Zahl, Raum, Unendlichkeit und Information. Sie beschreiben auf unterschiedliche Weise die Welt. Im Gegensatz zur Zahl suggeriert nach Rucker der Raum Freiheit und Möglichkeit der Bewegung: „Ein Adler kennt den Raum, wie ein Buchhalter die Zahlen kennt." Es soll, wie in jedem anderen Gebiet, so auch bei den Zahlen Enthusiasten und Spezialisten geben. Rucker nennt sie Zahlbesessene - Arithnomanen. Seine Analyse führt ihn zu dem Ergebnis, daß man sich kaum vorstellen kann, wie die Welt heute aussähe, wenn sie nicht von Zahlbesessenen regiert würde. Als mögliche Ursache für deren Verhalten nennt er die Beobachtung, daß, wer einmal mit dem Zählen begonnen habe, nicht mehr damit aufhören kann. Diese Verhaltensweise des dauernden Abzählens ist in bestimmten Entwicklungsstadien von Kindern gut zu beobachten. Normalerweise wird dies in späteren Entwicklungsstadien aber wieder normalisiert. Heute ist nun im Computer aber alles in Zahlen kodiert. Dies bedeutet, jemandes Zahlen (Daten) zu kennen, Kontrolle und Macht über ihn zu haben. Andererseits soll die Tatsache, einen Fakt in Zahlen ausdrücken zu können demonstrieren, seine Struktur so verstanden zu haben, daß man Macht über ihn gewinnen kann.

Dieses Verhalten, das die allgegenwärtige Jagd nach Zahlen hervorruft, legt die Vermutung nahe, daß viele Menschen die Vielfalt und das Janusgesicht der Zahlen noch gar nicht erfaßt, geschweige denn begriffen haben. Denn nur mittlere Zahlen (bis etwa 1000) können wir unmittelbar sinnlich erleben. Sie wirken dann auch ganz anders als die i. allg. in unvorstellbaren Bereichen liegenden Zahlen, die uns täglich in den Medien entgegentreten.

5.2 Zahlen in der Mathematik

Für die Mathematik sind die Zahlen konstitutiv. Die Zahlentheorie ist ein junges, äußerst interessantes und seit der Einführung der Computer auch experimentell (soweit man in der Mathematik von „Experimenten" sprechen kann) wichtiges Gebiet. An dieser Stelle können nur ganz einfache Zusammenhänge behandelt werden, und auch nur solche, die für die weiteren Betrachtungen notwendig sind.

Zahlen hängen ursprünglich mit dem Zählen zusammen. Hierbei treten nur die natürlichen Zahlen auf. Zu den frühesten Erkenntnissen gehört, daß es dabei keine größte Zahl gibt. Zu jeder noch so großen Zahl kann nämlich durch Addieren von 1 eine noch größere Zahl erzeugt werden. So entsteht das abzählbar Unendliche. Erweitert man die natürlichen Zahlen in den negativen Bereich, so erhält man die ganzen Zahlen. Hier gibt es auch keine kleinste Zahl, denn man kann durch Subtraktion von 1 immer eine Vorgängerzahl erzeugen.

Eine neue Art von Zahlen, die Brüche, entsteht durch die Division zweier ganzer Zahlen. Die Menge der möglichen Brüche ist ebenfalls abzählbar unendlich, also genauso groß wie die Menge der natürlichen Zahlen. Dieser Sachverhalt ist nicht anschaulich zu begreifen, sondern nur mathematisch zu beweisen. Alle echten Brüche lassen sich in dem uns gewohnten Dezimalsystem durch Ziffern hinter dem Komma darstellen. Diese Folge bricht entweder irgendwann ab (1/8 = 0,125) oder sie ist periodisch (1/3 = 0,33333... = $0,3\overline{3}$). Lediglich bei den irrationalen Zahlen wie $\sqrt{2}$ oder π ist die Folge unendlich, also weder periodisch noch bricht sie irgendwann ab. Daher ist die Menge der irrationalen Zahlen auch umfangreicher als abzählbar unendlich. Durch sie erweitert sich der Bereich der rationalen Zahlen (der Brüche) zum Bereich der reellen Zahlen. Diese liegen beliebig dicht auf der Zahlengeraden. Zwischen zwei beliebigen reellen Zahlen existiert immer eine weitere. Das führt zum Zahlenkontinuum. Für unsere Betrachtungen hier ist nur die damit theoretisch mögliche unendliche Stellenzahl bei Zahlenwerten wichtig. Gerade sie ergibt aber in der Meßtechnik keinen Sinn. Für die Abbildung der realen Welt mittels der Zahlenwelt ist aber die Messung der Vorgang, durch den Phänomenen die sie repräsentierenden Daten (Zahlen und Einheiten) zugeordnet werden (vgl. Kapitel 6).

Große und kleine Zahlen haben oft sehr viele Stellen. Daher ist die übliche Schreibweise für den praktischen Gebrauch ungünstig. So ist die wissenschaftliche Notation, auch Exponentialschreibweise genannt, dieser Zahlen entstanden. Praktischer Hintergrund waren die bei Anzeigen an Rechnern begrenzt zur Verfügung stehenden Anzeigebauelemente. Die Anzeige macht sich das Stellenwertsystem zunutze. So besteht die Anzeige einer Zahl aus zwei Teilen, der Mantisse und dem Exponenten. Die Mantisse besitzt einen Zahlenwert zwischen 1,000... und 9,999... und berücksichtigt nur die Ziffernfolge der Zahl. Der Exponent (hier durch ein vorgestelltes E gekennzeichnet) gibt dagegen den Stellenwert der ersten von Null verschiedenen Ziffer an. So wird 1 357 924 600 als 1,3579246E+9 und 0,001234 als 1,234E–3 geschrieben. Solche Zahlen vermitteln über den Exponenten schnell eine Aussage über ihre Größe. Die Ziffernfolge läßt weitere Aussagen zu. Besonders in der Meßtechnik kann so leicht etwas zur erreichten Meßgenauigkeit abgeleitet werden.

5.3 Zahlenbereiche

Zahlen sind eine spezielle Art von Information. Aufgrund ihrer starken Abstraktion von den realen physischen Dingen sind sie universell einsetzbar, spiegeln aber auch nur einen sehr geringen Teil der physischen Welt wider. Bei genauerem Beobachten fällt es auf, daß der Mensch in verschiedenen Zahlenbereichen unterschiedliche Denkstrategien verwendet. Dabei ist hier mit Zahlenbereich weniger an die Charakteristik der Zahlen in der Mathematik gedacht (obwohl auch hier ein unterschiedlicher Umgang mit z.B. ganzen und irrationalen Zahlen zu verzeichnen ist), sondern eher an die Größe und an die Beziehung zu bestimmten Erfahrungsbereichen unseres Lebens. Schon lange vermuten Psychologen Besonderheiten der Beziehung zu Zahlen in der unmittelbaren

Umgebung von Sieben. Es ist z.B. auffällig, daß die Anzahl von Mengen in diesem Größenbereich sofort wahrgenommen wird (d.h., es muß nicht einzeln abgezählt werden). Verschiedene Untersuchungen legen eine Unterteilung in Zahlenbereiche (nach der Größe) nahe. So schlägt Rucker z.B. folgende Einteilung vor:

- klein: 1 bis 1000;
- mittel: 1000 bis Billion;
- groß: Googol (10^{100}, Namen für Zahlen kaum möglich);
- unvorstellbar, jedoch noch nicht unendlich.

In der von Guiseppe Peano (1858–1932) aufgestellten Axiomatik (1891) zur Ableitung der Eigenschaften der natürlichen Zahlen gibt es keine größte Zahl. Im Gegensatz dazu fanden die Physiker um 1900 herum einen abweichenden Tatbestand in der Natur. Wie man auch die Mikro- und Makrowelt betrachtet, das größtmögliche Verhältnis zwischen beide Extrembereiche der Realität beschreibenden Größen überschreitet nie 10^{90}. Das bedeutet, daß unsere physikalische Welt unter dem Gesichtspunkt der Quantifizierung (ihrer Widerspiegelung in Zahlen) endlich ist – im Gegensatz zur Zahlentheorie. Wir bilden also eine endliche Welt (physische Realität) durch eine unendliche (Zahlenwelt) ab. Da in der Zahlenwelt viele Operationen innerhalb und nach den Regeln dieser unendlichen Welt vorgenommen werden, mit deren Ergebnissen wir dann wieder in die reale Welt gehen, dürfte jedem klar sein, daß hier durchaus Fallstricke verborgen liegen können.

Bezieht man weitere Gesichtspunkte unseres Umgangs mit Zahlen ein, so wird eine Einteilung in sieben Zahlenklassen (-bereiche) sinnvoll, deren Einteilung und die wichtigsten Bezüge folgende Übersicht grob skizzieren soll (vgl. auch Abb. 3.16).

Tabelle 5.1
Zahlenbereiche

Zahlenbereich	**Bezug**
binär	Logik
psychologisch	Gedächtnis, Klassenbildung
anschaulich	zählen, vorstellbar (Stunde)
naturgegeben	Physik, exponentiell
kombinatorisch	Möglichkeit, Evolution
mathematisch	Theorie

In den folgenden Abschnitten wird zu den einzelnen Bereichen eine knappe Erläuterung gegeben. Dabei muß beachtet werden, daß zwar einerseits jeder Bereich seine speziellen Gesetze besitzt, daß es andererseits aber auch Regeln für den Übergang zwischen den einzelnen Zahlenbereichen gibt. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen.

Die drei ersten Zahlenbereiche werden durch den Vorgang der Klassenbildung (Kombinatorik) verbunden. Auf unsere obige Klassen-Einteilung bezogen finden wir folgenden Zusammenhang. Die Anzahl der Objekte liegt dabei üblicherweise im anschaulichen, die Anzahl der Klassen im psychologischen und die Kriterien für die Zuordnung im binären Bereich. Bei den Übergängen von einer zur nächsten Klasse

wird der Informationsgehalt über die Objekte deutlich geringer. Dies bedingt sowohl Unschärfen als auch die Möglichkeit neuer Aussagen. Somit entsteht bei diesen Übergängen auch neue Information, während andere verlorengeht (vgl. Abb. 3.16).

5.3.1 Binärer Zahlenbereich

Der binäre (zweiwertige) Zahlenbereich ist durch Ja/Nein-Entscheidungen, also die Aussagenlogik, die Boolsche Algebra und die binäre Arithmetik gekennzeichnet. Die Herausbildung und Entwicklung dieses Bereiches kann in drei geschichtlichen Etappen beschrieben werden.

Der klassische Zeitraum hat seinen Ursprung bei Aristoteles (384–322 v.Chr.), dessen an der Grammatik der griechischen Sprache orientierte Entwicklung seiner Logik im engen Zusammenhang mit den Überlegungen des sich konstituierenden mathematischen und naturwissenschaftlichen Denkens bis hinein ins 19. Jahrhundert überhaupt die Grundlage der sogenannten klassischen Logik bildete. Diese war eine zweiwertige Logik, generierte also sozusagen einen binären Zahlenbereich. Dieser erste Zeitraum gipfelte dann bei Leibniz (1646–1716) in zwei Prinzipien:

- das Prinzip des verbotenen Widerspruchs;
- das Prinzip von der Identität des Ununterscheidbaren.

In dieser Zeit bestand vor allem der Wunsch, auf formalem Weg fehlerfreie Aussagen zu gewinnen.

Die symbolische Epoche reicht etwa von Boole (1815–1864) bis Hilbert (1862 bis 1943). Ziel war es, die Logik so einfach und exakt wie die Algebra zu machen. Boole hoffte, wenn er der Logik mittels Junktoren und Quantoren das Aussehen der Algebra gab, damit auch deren Strenge und Zwangsläufigkeit zu erreichen. Hilbert baute hingegen mehr auf die Axiomatisierung der Mathematik. Leider gibt es aber in der binären Logik nur wenige Gesetze und dies führt bei komplexen Problemen zu sehr langen Ableitungen.

Die dritte Etappe beginnt mit Gödel (1906–1978). Hier werden allgemeine Aussagen über die Mathematik geschaffen, so daß man auch von einer metamathematischen Etappe sprechen kann. Gödel zeigte u.a., daß es in einem hinreichend komplexen System immer Aussagen gibt, die weder wahr noch falsch sind. Wahrheitswerte (Ja/Nein) müssen dann immer aus einem übergeordneten System abgeleitet werden.

Der binäre Zahlenbereich ist folglich nur für kleine Systeme in sich konsistent. Am Beispiel von drei Fragetypen in Tabelle 5.2 soll dies verdeutlicht werden.

Es wird deutlich, daß nur die Entscheidungsfragen mit dem binären Zahlenbereich beschrieben werden können. Je weiter man in der Tabelle nach rechts kommt, um so schwieriger wird die Abbildung dieser Fragestrukturen und ihrer Antwortstrategie mittels quantifizierbaren Operationen, also letztlich mittels Computern.

Aber auch schon die Entscheidungsfrage „Sind Viren Lebewesen?“ macht weitere Problematiken in diesem Bereich deutlich. Vor wenigen Jahren war dies noch eine wissenschaftliche Problematik und somit als Entscheidungsfrage qualifiziert. Heute ist die Antwort weder Ja noch Nein, sondern sie lautet: „Viren sind keine selbständigen

Tabelle 5.2
Fragetypen

Kriterium	**Entscheidungsfragen**	**Ergänzungsfragen**	**Begründungs-fragen**
Fragewörter	ohne	wer, was, wann, wieviel, welche	warum, weshalb, wieso
Beispiel-fragen	Ist $2 \cdot 2 = 4$ richtig? Ist Schnee weiß? Sind Viren Lebewesen?	Welche Farbe hat die Rose? Wo liegt Dresden?	Warum ist Schnee weiß? Warum lebt der Mensch?
Antworten	Ja/Nein	Auswahl aus Tabelle	nur indirekt, erklärend
Probleme	Entscheidbarkeit	Vollständigkeit der Tabelle	keine allgemeine Methode zur Beant-wortung bekannt

Lebewesen." Ähnlich ist es mit der aus der Physik stammenden Frage „Besteht das Licht aus Teilchen?" Je nach der herrschenden Auffassung wurde die Frage mit Ja (Newton) oder mit Nein (Hooke: Licht ist Welle) beantwortet. Erst die Quantentheorie machte deutlich, daß Licht weder Welle noch Teilchen ist, sondern aus Quanten besteht. Diese stellen eine gänzlich neue Qualität dar, die sich je nach den Versuchsbedingungen (der Fragesituation) entweder wie Teilchen oder wie Wellen verhält.

Damit ist das Problem der zeitlich bedingten Verschiebung von Entscheidungsfragen in andere Fragentypen angeschnitten (heute müßte man fragen: „Was sind Viren?"). Außerdem macht diese Situation darauf aufmerksam, daß offensichtlich die zweiwertige Logik zur adäquaten Beschreibung unserer Realität nicht ausreicht. Sie ist eine in vielen Fällen gut funktionierende Näherung. Hier liegt eine wesentliche Begrenzung der auf der Binärtechnik beruhenden Computertechnik. Mittels Fuzzy-Logik und sogenannten neuronalen Netzen versucht man dieses Manko auszugleichen und realitätsnahere computergerechte Beschreibungsvarianten der physischen Welt zu gewinnen. Auf diese wichtigen Fragen kann hier nicht weiter eingegangen werden.

5.3.2 Psychologischer Zahlenbereich

Die Psychologen kennen schon lange den folgenden Umstand. Wenn wir eine unübersichtliche Menge von Objekten irgendwie ordnen sollen, so werden zunächst immer 7 ± 2 Klassen gebildet. Verschiedene Untersuchungen haben auch gezeigt, daß wir zu den Zahlen bis etwa 7 offenbar noch einen anderen Zugang haben als das bewußte Zählen. Solche Anzahlen können wir direkt wahrnehmen. Einige Autoren sprechen deswegen hier auch von intiutivem Zählen (Keller 1984). Da die Sieben auch in vielen anderen psychologischen Zusammenhängen auftritt, wird sie umgangssprachlich als die magische Zahl 7 charakterisiert.

Weiterhin fällt auf, daß die Sieben generell in der Menschheitsgeschichte einen hervorragenden Platz einnimmt. In fast allen Gebieten taucht sie bevorzugt auf. Von den vielen Beispielen seien nur die folgenden genannt (die Abweichungen von der gebräuchlichen Schreibweise einiger Wendungen ist gewollt – zur Hervorhebung der 7):

> 7 Planeten; 7tägige Woche, 7 Weltwunder; 7 Weise, 7 Hügel von Rom; 7armiger Leuchter der Juden; 7 Bitten des Vaterunser; 7 Sakramente; 7 Todsünden; 7 Werke der Barmherzigkeit; Schneewittchen mit den 7 Zwergen; der Wolf mit den 7 Geißlein; die 7 Schwaben; 7-Meilenstiefel; 7 Freikugeln des Freischütz; 7jähriger Krieg; 7-Schläfer; 7. Himmel; 7 Jahre Pech; die 7 mageren und die 7 fetten Jahre; seine 7 Sachen nehmen.

Heute wissen wir, daß die besondere Zahl offensichtlich mit der Grenze unseres Gegenwartsgedächtnisses zusammenhängt. Die zugehörige Kapazität liegt bei 150 Bit. Das ermöglicht $\mathrm{ld}(150) = 7{,}23...$ Ja/Nein-Entscheidungen zu treffen. Wenn auch größtenteils unbewußt, werden die gebildeten Klassen folglich als binäre Merkmalskombinationen erstellt (vgl. S. 199).

Auch in der Biologie treten bevorzugt die Zahlen 2, 3, 4, 5 bis maximal 15 auf. Andernfalls wird immer eine unbestimmte Anzahl (z.B. Blätter o.ä.) im Sinne von viele gebildet.

Ein weiterer Grund für die Größe dieses Zahlenbereichs ist daher auch die schon frühe Bindung der Zahlen an Objekte der aktuellen sinnlichen Erfahrung, wie die Zuordnung der 10 zu den Fingern oder der 12 zur Mondperiode. Auch die 4 Elemente (Erde, Feuer, Wasser, Luft), die 4 Jahreszeiten, die 5 Sinne und das Pentagramm gehören diesem Bereich an.

5.3.3 Anschaulicher Zahlenbereich

Der anschauliche Zahlenbereich deckt sich in etwa mit dem Bereich kleiner Zahlen der obigen Einteilung. Er betrifft insbesondere unser Alltagsverhalten. Seine obere Grenze ist etwa 1000 und die untere etwa 1/1000. Von einem Meter ist gerade noch 1 Millimeter mit bloßem Auge zu erkennen. Bis Tausend zählt man in etwa einer Stunde. Bei Rucker findet man auch den sogenannten Zehn-Finger-Flip-Flop mit $2^{10} = 1024$. Spätestens im Mittelalter erfolgte die Staffelung großer Zahlen gemäß Million, Milliarde, Billion, Billiarde, Trillion, Trilliarde usw., also in Tausenderschritten. Auch die Vorsätze des SI führen dazu, daß die eigentlichen Maßzahlen immer im anschaulichen Zahlenbereich liegen können. Dieser Bereich ist uns ganz selbstverständlich.

5.3.4 Naturgegebener Zahlenbereich

Der naturgegebene Zahlenbereich wird durch die Zahlen gebildet, die bei der Beschreibung der Natur auftreten. Dieser wird wesentlich durch die physikalische Erfahrung bestimmt. Diese zeigt, daß es hier offenbar obere und untere Schranken gibt, manche Autoren sprechen auch von Grenzen. Die Werte liegen für die untere Grenze in der Größenordnung 10^{-99} und für die obere bei 10^{99}. In diesem Zahlenbereich ist das Verhalten des Exponenten einer Zahl wichtiger als das der Mantisse.[1] Das liegt in der (meist zutreffenden) Erfahrung begründet, daß bei einem Weiterschreiten um einen Exponenten (einer Größenordnung) i. allg. neue Qualitäten der beschriebenen Größe zu verzeichnen sind (vgl. dazu auch die Skalen in Kapitel 3). Diesem Sachverhalt entspricht die Gleitkomma-Arithmetik vieler Rechner.

Für die Exponenten gilt offensichtlich nicht mehr das Peano-Axiom. Eine Erhöhung des Exponenten um 1 bedeutet für die entsprechende Zahl keine Addition, sondern eine Multiplikation.

Rucker nennt in seiner Untersuchung diesen Zahlenbereich den mittleren und führt als Obergrenze die kaum vorstellbare, aber noch nicht unendliche Zahl Googol ein, die den Wert 10^{100} hat.

Auch das letzte, was Archimedes (um 287 v. Chr.–212 v. Chr.) aufschrieb, liegt in diesem Zahlenbereich. Es war die sogenannte „Sandzahl", die angibt, mit wievielen Sandkörnern der Kosmos ausfüllbar wäre. Mit seinen Überlegungen kommt er zu dem Schluß, daß diese Zahl die Größe 10^{63} habe.

Auf diesen Zahlenbereich sind die logarithmischen Darstellungen der Skalen in Kapitel 3 bewußt abgestimmt. Jede Skale besitzt so eine Ober- und Untergrenze, die je nach dem beschriebenen Phänomen natürlich wesentlich kleiner als die Grenzen für diesen Zahlenbereich sein können.

---

[1] Dieser Darstellung liegt die Tatsache zugrunde, daß man in unserem Zehnersystem jede Zahl in der Form $a \cdot 10b$ darstellen kann. Dabei ist a die Mantisse und b der Exponent.

5.3.5 Kombinatorischer Zahlenbereich

In diesem Bereich existieren wesentlich größere Zahlen als in den bisherigen Bereichen. Sie sind unvorstellbar, aber noch nicht unendlich. Für diese Zahlen gibt es keine speziellen Namen mehr. Rucker führt noch den Googolplex ein, eine Zahl bestehend aus einer Eins mit Googol Nullen.

Bei kombinatorischen Problemen in der Mathematik treten solche Zahlen jedoch recht schnell auf und reziproke Werte solcher großen Zahlen können bei Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen schnell Bedeutung erlangen. Würden z.B. die rund 10^{80} Atome des Weltalls zur Speicherung je eines Bit verwendet, so entständen dadurch $2^{10^{80}}$, also rund $10^{3 \cdot 10^{79}}$ unterscheidbare Zustände. Allein der Exponent ist hier schon eine unvorstellbar große Zahl mit $3 \cdot 10^{79}$ Ziffern.

Dieser Zahlenbereich steht in einem engen Zusammenhang mit dem Verhältnis von Möglichkeit und Wirklichkeit. Er besitzt offensichtlich bei der Evolution eine entscheidende Bedeutung und beeinflußt prinzipiell die Unvorhersagbarkeit von Ereignissen. Hier greifen auch erstaunlicherweise die üblichen numerischen Methoden zur Behandlung von Problemen nicht mehr. So gibt dieser Zahlenbereich offensichtlich eine wichtigen Hinweis darauf, warum unsere Welt nicht vollständig berechenbar sein kann.

5.3.6 Mathematischer Zahlenbereich

Der mathematische Zahlenbereich ist durch entsprechende Definitionen strukturiert und letztlich unendlich. Dies wird durch die beliebig dichte Belegung der Zahlengeraden verdeutlicht, deren Länge schon durch das abzählbar Unendliche der ganzen Zahlen keine Grenze hat. Durch die entsprechenden mathematischen Zahlenbereiche wird auch das Verhältnis von Diskretheit (das Abzählbare) und Kontinuität (das beliebig dicht liegende Nichtabzählbare) in gewisser Weise widergespiegelt. Aber eine Erklärung für den auftretenden Qualitätssprung zwischen den beiden Strukturprinzipien ist mit den Zahlen auch nicht zu liefern. Der kontinuierliche Teil macht das Rechnen mit Grenzwerten und damit letztlich die Infinitesimalrechnung möglich.

Seine größte Bedeutung hat dieser Zahlenbereich in der Mathematik. Es bleibt allerdings die Frage offen, inwieweit dieser Zahlenbereich eine adäquate Widerspiegelung realer Verhältnisse ist.

5.4 Die Welt in Zahlen – Widerspiegelung oder Fiktion?

Wir haben gesehen, daß sich im gewissen Sinne zwei Welten gegenüberstehen – die reale (physische) Welt und die (ideelle) Welt der Zahlen.

In der physischen Welt leben wir ständig. Der ständige Austausch mit anderen Objekten, Phänomenen, Prozessen ermöglicht unser Leben. Wir brauchen nur an die Nahrungs- und Energieaufnahme zu denken bzw. auf die vielfältigen Kontakte zu anderen Lebewesen und Menschen. Diese Welt ist hochkomplex und vernetzt. Um unsere Überlebenschancen zu erhöhen, versuchen wir, diese komplexe Welt zu verstehen. Wir schaffen uns Bilder von ihr (Weltbilder). Dabei besteht das Ziel darin, (für unser Überleben) wesentliche Elemente der realen Welt so abzubilden, daß wir Handlungsstrategien danach entwickeln können. Neben den uns während der Evolution mitgegebenen Möglichkeiten (und auch Grenzen) für solche Abbildungen sind diese auch je nach unseren Erfahrungen und unserem Vorwissen unterschiedlich. Wir treffen also auf eine Vielzahl solcher Weltbilder (eigentlich hat jedes menschliche Individuum auch sein individuelles Weltbild). Diese Bilder können allerdings nach bestimmten Merkmalen in große Gruppen gegliedert werden – auf diesem Wege entstehen die, über große Territorien sich ausbreitenden, Weltanschauungen. Diese Weltanschauungen wirken als Vorwissen der Menschheit auf die Entwicklung der individuellen Weltbilder natürlich ein, so daß wir hier einen sich reproduzierenden, iterativen Prozeß vor uns haben – mit C.F. von Weizsäcker können wir auch von einem Kreisgang sprechen.

Es gibt eine weitere Welt, die eigene Gesetzlichkeiten und Strukturen besitzt und aus einer besonderen Art von Objekten gebildet wird – die Welt der Zahlen. In Kapitel 3 haben wir die ungeheure Vielfalt ihrer Ausprägungen kennengelernt. Im vorhergehenden Abschnitt wurden einige Strukturen dieser Welt verdeutlicht. Ungeklärt blieb die Frage, woher diese Strukturen kommen. Das ist die Frage nach dem Status der Zahlenwelt. Ist sie genauso real wie die physische Welt? Das würde bedeuten, die Zahlenwelt existiert, egal ob es uns Menschen gibt bzw. ob wir sie entdecken. Oder ist die Zahlenwelt nur ein Konstrukt des menschlichen Geistes?

Diese Fragen berühren die erkenntnistheoretische Stellung der Mathematik, für die die Zahlen ja wesentliche Objekte sind. Die Beschäftigung mit dieser Problematik hat zu verschiedenen Lösungsansätzen geführt.

Da gibt es einmal den *Empirismus*, für den alle Begriffe aus der Erfahrung gewonnen werden. Für ihn existieren keine notwendigen Wahrheiten. Mathematik wird als Erfindung betrachtet, sie ist das, was Mathematiker machen. Diese Haltung wird vielfach von den „Konsumenten" der Mathematik vertreten. Für diese stellt Mathematik im wesentlichen ein Werkzeug dar.

Der *Realismus* geht davon aus, daß es außerhalb und unabhängig vom Geist eine Welt der Dinge gibt. Auf die Mathematik bezogen heißt das, die Welt *ist* in einem gewissen tieferen Sinn mathematisch. Die mathematischen Begriffe und Gesetze existieren und werden von den Mathematikern entdeckt, z.B. auch die Zahl π. Damit existiert die Mathematik, ob es Mathematiker gibt oder nicht. Die Zahl 7 existiert als

immaterielle Idee und realisiert sich z.B. in den sieben Zwergen, den sieben Bergen usw. Dies wird oft auch als mathematischer Platonismus bezeichnet. Sie kommt der Vorstellung gleich, daß Gott ein Mathematiker sei.

Das Wesen des *Logizismus* besteht darin, unser Wissen in ein System von Axiomen und Schlußregeln so zu fassen, daß sich Wissen als Menge aller möglichen Schlußfolgerungen aus allen möglichen Systemen logisch konsistenter Ausgangsannahmen definieren läßt. In der Mathematik hat er im *Formalismus* seine Ausprägung erfahren. Sein bedeutendster Vertreter war der deutsche Mathematiker David Hilbert. In ewas abgeschwächter Form wird er durch eine Gruppe französischer Mathematiker, die unter dem Namen Nicolas Bourbaki auftreten, weiterhin vertreten.

Eine vierte erkenntnistheoretische Strömung, die für die Auffassung vom Wesen der Mathematik wichtig ist, stellt der *Operationalismus* dar. Bei ihm erhält man die Bedeutung der Dinge, indem man die Folge der Schritte (Operationen), um sie zu messen, bestimmt. In der Mathematik hat er im *Konstruktivismus* seinen Niederschlag gefunden. Sein bedeutendster Vertreter war der deutsche Mathematiker Leopold Kronecker (1823–1891). Von ihm stammt die Feststellung, daß die ganzen Zahlen vom lieben Gott gemacht sind, alles andere sei Menschenwerk. Für den Konstruktivismus besteht die Mathematik nur aus Aussagen, die sich in einer endlichen Zeit mit deduktiven Schritten von den natürlichen Zahlen ausgehend konstruieren lassen. Das hat u.a. eine fatale Konsequenz, daß nämlich zu den üblichen Kategorien wahr und falsch noch eine weitere hinzukommt – unentscheidbar. Das sind nämlich all diese Aussagen, die mit dem Verfahren des Konstruktivismus nicht zu entscheiden sind. Der Konstruktivismus kommt damit in Konflikt mit den Naturwissenschaften, denn diese arbeiten bei der Entwicklung ihrer Theorien mit nichtkonstruktiven Methoden.

Der Konstruktivismus weist uns aber auf einen Aspekt des mathematischen Charakters der Natur hin – die Berechenbarkeit. Es heißen nämlich solche Operationen berechenbar, die eine Turingmaschine in endlicher Zeit berechnen kann. Damit gibt es für eine berechenbare Operation ein materielles Gerät (zumindest im Prinzip), desssen Verhalten dieser Operation entspricht. Daß sich die Natur so gut mathematisch beschreiben läßt, ist damit gleichwertig mit der Tatsache, daß die in den Naturwissenschaften angewandten mathematischen Operationen berechenbar sind (im oben gemeinten Sinn). Wären sie das nicht, so könnten sie nicht Naturprozessen äquivalent sein. Ob die Naturgesetze auch nicht-berechenbare Aspekte haben, ist eine interessante Frage, die bei den Bemühungen um eine Quantentheorie des gesamten Universums auftauchte, bisher aber noch nicht entschieden ist.

Kehren wir zu unserer Ausgangsfrage zurück. Wir hatten im Kapitel 3 gesehen, daß die ungeheure Fülle der physischen Welt mittels Zahlen abgebildet werden kann. Wir haben hier gesehen, daß die Zahlen eine eigene Welt bilden, die der physischen in einem gewissen Sinne gegenübersteht. Bei der Frage, welchen Charakter diese Zahlenwelt hat, sind wir zur Mathematik geführt worden und von da zu Einsteins Frage, warum die Mathematik die physische Welt so gut beschreibt. Da die Mathematik die Gesetzmäßigkeiten und Strukturen der Zahlenwelt erforscht und beschreibt, ist damit

auch das Problem aufgerissen, warum die Zahlen die physische Welt so gut beschreiben.

Wir kommen von der physischen Welt in die mathematische, indem wir von bestimmten Eigenschaften abstrahieren. Zum Beispiel interessieren wir uns nur für die Anzahl von bestimmten Objekten. Der umgekehrte Weg, von der mathematischen Welt in die physische, benötigt die Konkretion. Mathematisch gilt $2 + 2 = 4$, in der physischen Welt addieren wir hingegen konkrete Objekte wie z.B. Äpfel, Birnen o.ä. Die Abbildung 5.1 versinnbildlicht diesen Prozeß. Die interessante Frage, ob es in beiden Welten Bereiche gibt, die in der anderen Welt keine adäquate Entsprechung haben, bleibt noch zu klären. Im Kapitel 7 werden wir sehen, daß hier auch einige Fallstricke für die Abbildung der Welt in Zahlen liegen.

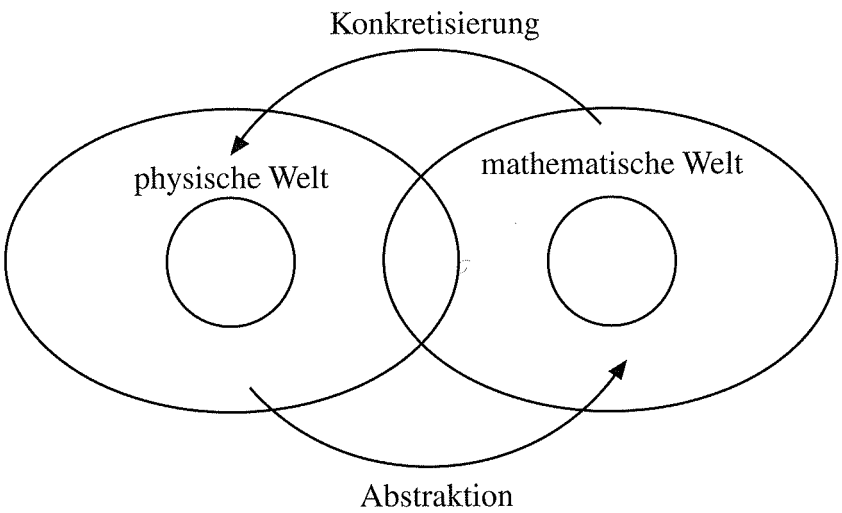


Abb. 5.1
Übergänge zwischen physischer und mathematischer Welt

Die Welt in Zahlen ist also eine mögliche Widerspiegelung der physischen Welt. Sie ist sicherlich auch in dem Sinne adäquat, wie die Mathematik die Natur adäquat widerzuspiegeln vermag. Offen bleibt noch die Frage, welche Form der Widerspiegelungsprozeß hat. Wie wird das Abbild der physischen Welt in der Zahlenwelt erzeugt. Das führt uns zur Gewinnung der Zahlen in der physischen Welt – zum Messen. Dem werden wir im nächsten Kapitel etwas genauer nachgehen. Die Frage der Adäquatheit und des Weges zurück, von der Zahlenwelt in die physische, wird im Schlußkapitel noch einmal aufgenommen.

6 Von der Mathematik zur Physik – Die Messung

Am Ende des letzten Kapitels hatten wir gesehen, daß die Mathematik sich mit bestimmten Strukturen beschäftigt, die einen Bezug zur physischen Welt haben. Diese physische Welt wird unter verschiedensten Gesichtspunkten von bestimmten Wissenschaftsdisziplinen untersucht bzw. abgebildet. Die Physik ist dabei diejenige Wissenschaft, die in der Quantifizierung ihrer Aussagen (meist in Form von mathematischen Gleichungen) über bestimmte Erscheinungen der physischen Welt am weitesten fortgeschritten ist. Um solche Aussagen machen zu können, muß die Physik quantitative Daten erheben. Diese können dann mit Hilfe der gefundenen Gesetze (die vielfach in Form mathematischer Gleichungen vorliegen) in Beziehungen gebracht und strukturiert werden. Das Bindeglied zwischen dem mathematischen Formalismus und der physischen Welt ist das empirisch erhobene Datum. Es konkretisiert die abstrakte mathematische Beziehung (vgl. Abb. 5.1). Da uns die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Struktur innerhalb dieser Daten (durch die Skalen in Kapitel 3 verdeutlicht) und der physischen Welt interessiert, müssen wir uns dem Prozeß der Gewinnung dieser Daten zuwenden. Dieser Prozeß heißt Messung.

6.1 Messen – Prozeß und Darstellung

Unser tägliches Leben ist durch vielfältige „Meßprozesse" gekennzeichnet, wir sind uns dessen nur i. allg. nicht bewußt. Als Beispiel sei nur an den täglichen Einkauf von Lebensmitteln erinnert. Die Ware wird abgewogen und das Geld an der Kasse wird als Äquivalent abgezählt. Seit der Antike bringen viele Zitate die Bedeutung dieses Vorgangs zum Ausdruck, zwei seien hier beispielhaft aufgeführt.

> Durch Messen erbaut man die Welt. Das sagte vor neunhundert Jahren ein weiser Araber. Ein Wort, das nach wenig klingt und das dennoch alles umfaßt. Beinahe nichts ist möglich ohne das Maß und ohne die Geräte des Messens. Ordnung, Sicherheit und Recht ... berechnen, erschließen und wirtschaftlich arbeiten ... mit dem Messen fängt alles an. (Omm 1958)

> Wir sind zahlreichen Sinnestäuschungen ausgesetzt, und das beste Mittel dagegen ist das Messen, Zählen und Wiegen. Der Teil in uns, der sich auf dies Berechnen und Messen verläßt, ist die edelste Kraft unserer Seele. (Sokrates)

Diese Zitate vermitteln einen eindringlichen Grundtenor: Messen ist notwendig, Messen ist eine der wichtigsten Kulturleistungen und auch eines der höchsten Kulturgüter. Offen bleibt dabei die Frage danach, was Messen eigentlich ist.

Die übliche Charakterisierung eines Begriffs mittels einer Definition verlangt nach einem entsprechenden Oberbegriff und einschränkenden charakteristischen Merkmalen. So erfolgt zum Beispiel die Definition einer „Birke" durch die Spezifizierung (Einschränkung) des Oberbegriffs „Baum" mittels der für diesen speziellen Baum typischen Merkmale „er hat Blätter (das führt zur Unterklasse Laubbaum) und eine weiße Rinde". Diese Methode ist zur Charakterisierung des Meßprozesses von verschiedenen (i. allg. philosophischen) Seiten versucht worden, sie kommt aber je nach den dabei gemachten Voraussetzungen zu sehr unterschiedlichen Definitionen des Messens. Sie sind meist nur für spezielle Fälle anwendbar. Wir werden weiter unten noch einmal darauf zurückkommen. Für den Anfang soll Messen durch einige Aussagen umschrieben werden.

Das Messen ist eine Tätigkeit. Sie hängt eng mit den Tätigkeiten des Prüfens, Urteilens, Testens, Schätzens, Zählens und Wägens zusammen. Dabei nimmt in der Reihenfolge dieser Tätigkeiten der Charakter des Messens zu. Das Messen schafft Aussagen über bestimmte Eigenschaften von Objekten. Diese Objekte werden meist mittels dieser Eigenschaften charakterisiert, denn einem Objekt kommen nicht alle möglichen, sondern nur die typischen Eigenschaften zu. So kommt die Eigenschaft, ein Geschlecht zu besitzen, also männlich oder weiblich zu sein, den meisten Lebewesen zu, aber nicht einem Buch oder einem Atom (hier besitzen nur die diese Objekte bezeichnenden Worte im grammatikalischen Sinn ein Geschlecht). Viele Objekte besitzen mehrere meßbare Eigenschaften. Die Objekte selbst sind nicht meßbar, sondern nur zählbar.

Wir wollen die folgenden, ein Buch charakterisierenden Sätze betrachten:

Das Buch liegt auf dem Tisch.
Das Buch ist dick.
Das Buch hat 527 Seiten.
Das Buch hat eine Masse von 337,4 g.

Der erste dieser Sätze hat kaum einen Bezug zum Messen, der letzte aber gewiß. Beim dritten Satz hat eine Zählung stattgefunden, die mit der meßähnlichen Aussage des zweiten Satzes im Einklang steht.

Die Eigenschaften von Objekten können also auf recht unterschiedliche Weise erfaßt werden, z.B. durch

- Aussagen: Ein Haus ist rot. Ein Mensch ist gut.
- Adjektive: Das rote Haus. Der gute Mensch.
- Maßzahlen: Das Haus hat eine Länge von 35,21 m. Der Mensch wiegt 78,5 kg.

Die ersten beiden Aussagen sind zwar betont verbal, stellen aber eine wichtige Vorstufe des Messens dar, indem sie das Objekt unter bestimmten Gesichtspunkten charakterisieren. Unterscheidet man bei diesen charakteristischen Eigenschaften verschiedene Ausprägungen, kommt man zu möglichen Skalen. Der Schritt zu Größen, die Eigenschaften und Verhalten von Objekten beschreiben, ist dann nicht mehr weit.

6.1.1 Physikalische Größen

Unsere heutige, technisierte Welt beruht darauf, daß wir ihren größten Teil adäquat beschreiben können. Dies geschieht nicht nur verbal, sondern in einer Form, die auf der Basis erkannter Zusammenhänge zwischen Eigenschaften von Objekten dieser Welt Voraussagen über deren Verhalten unter bestimmten Bedingungen ermöglicht. Wir beschreiben die Welt mittels Naturgesetzen, die einen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung bei einem Prozeß abbilden. Diese Abbildung hat in den meisten Fällen die Form mathematischer Gleichungen angenommen. Mittels der mathematischen Gesetze sind wir dann in der Lage, diese Gleichungen umzuformen, um so eventuell zu Voraussagen über den Prozeß oder die Objekte zu kommen.

Nun besteht aber ein wichtiger Unterschied zwischen einer mathematischen (algebraischen) Gleichung z.B. der Form $d = c(a + b)$ und einer unsere Welt beschreibende physikalische Gleichung wie z.B. $F = ma$. Für die mathematische Gleichung gilt z.B. das Distributivgesetz, demzufolge $d = c(a + b) = ca + cb$ ist. Dabei ist es gleichgültig, was die Variablen a, b, c und d im einzelnen bedeuten. Bei der physikalischen Gleichung müssen wir schon überlegen, ob die dort vorgenommene Verknüpfung der Variablen m und a für F eine sinnvolle Aussage ergibt. Wie wir wissen, wird diese Gleichung zu einer physikalisch sinnvollen Aussage, wenn wir mit a eine Beschleunigung, mit m eine Masse und mit F eine Kraft identifizieren. Die Ausprägung dieser Charakteristiken wird durch Zahlenwerte repräsentiert, die nach einer bestimmten Vorschrift gewonnen werden. In einer physikalischen Gleichung müssen die Variablen also Eigenschaften von Objekten oder Prozessen entsprechen, und die Gleichungen verbinden solche Eigenschaften, die in einem kausalen Zusammenhang stehen.

Die für diese Charakterisierung von Objekteigenschaften verwendeten Begriffe bezeichnet man als *physikalische Größen.* Die Ausprägung dieser Größen ist meßbar, die Größen haben also quantitativen Charakter. Sie sind eindeutig durch eine Maßeinheit und eine Maßzahl gegeben. Die übliche Darstellung für eine physikalische Größe ist

$$A = \{A\}\,[A],$$

wobei $\{A\}$ die Maßzahl und $[A]$ die Maßeinheit der Größe A bezeichnen.

Setzen wir voraus, daß das Meßobjekt beim Meßvorgang durch die Apparatur beliebig wenig gestört wird, so ist eine physikalische Größe durch folgende Elemente eindeutig festgelegt:

- das Meßobjekt;
- die Meßapparatur;
- die Vorschrift über die Anwendung der Meßapparatur;
- die Maßeinheit der Größe.

Die Maßzahl $\{A\}$ kann ein Skalar, eine Vektorkoordinate oder eine Tensorkomponente sein, entsprechend sprechen wir von skalaren, vektoriellen (bei Beachtung aller Vektorkomponenten) oder tensoriellen (bei Beachtung aller Tensorkomponenten) physikalischen Größen.

Alle die Größen, die sich nur durch die Wahl des Meßobjektes unterscheiden, sind Größen einer gleichen *Größenart*. So sind der „Durchmesser unserer Erde", die „Entfernung Potsdam–Berlin" und die „Wellenlänge einer Radiowelle" alles Größen der Größenart Länge. Alle Größenarten können mittels weniger Grundgrößenarten definiert werden. Diese sind bezüglich ihrer Art und Anzahl im Prinzip beliebig wählbar, soweit sie nur unabhängig voneinander sind. Man kann diese Beliebigkeit durch bestimmte Anforderungen an ein solches System der Grundgrößenarten einschränken, wozu i. allg. die Forderung gehört, mit möglichst wenigen Grundgrößen und einfachen Regeln die abgeleiteten Größen darstellen zu können. So ist z.B. für die Größen Flächeninhalt und Volumen die Länge die Grundgrößenart, denn die Bestimmung von Flächeninhalt und Volumen läßt sich prinzipiell auf Längenbestimmungen zurückführen.

Aufgrund der Meßbarkeit einer Größe benötigt man eine Maßeinheit für jede Größe. Legt man für die Grundgrößenarten Basiseinheiten fest, kommt man zu einem Einheiten- oder Maßsystem, mit dem eine konsistente physikalische Beschreibung der Welt möglich wird. Das bedeutet z.B., daß durch die Festlegung des Meter als Basiseinheit für die Grundgrößenart Länge die Maßeinheit für die Größe Flächeninhalt als Quadratmeter und für die Größe Volumen als Kubikmeter bestimmt sind.

Nachdem wir nun die physikalische Größe als das, die zu beschreibenden Objekte und Prozesse Charakterisierende herausgearbeitet haben, wollen wir noch einmal zu den die Kausalzusammenhänge widerspiegelnden Gleichungen zurückkommen. Die gemessene Größe A spiegelt einen realen Sachverhalt wider, unabhängig von ihrer Maßeinheit $[A]$. Die gewonnene Maßzahl $\{A\}$ ist hingegen von der gewählten Maßeinheit $[A]$ abhängig. Aus diesem Grunde ist es zweckmäßig, physikalische Zusammenhänge als *Größengleichungen* zu formulieren. Sie gelten unabhängig von den gewählten Maßeinheiten, wie im obigen Beispiel $F = ma$. Mißt man die Masse in Kilogramm und die Beschleunigung in Meter pro Sekundenquadrat, so erhält man für die Kraft die Einheit Kilogrammeter pro Sekundenquadrat; diese hat den speziellen Namen Newton erhalten. Man kann Größengleichungen ausführlich schreiben, das ergibt bei unserem Beispiel:

$$\{F\}[F] = \{m\}[m] \cdot \{a\}[a].$$

Man kann die Zusammenhänge natürlich auch durch die Darstellung der Zahlenwerte alleine beschreiben. So ist z.B. die Gleichung für die Gewichtskraft auf der Erde in der Form

$$G/\mathrm{N} = 9{,}80665 \cdot m/\mathrm{kg}$$

eine *Zahlenwertgleichung*, da durch die genaue Angabe des Zahlenwertes für g die Maßeinheiten für die Masse und die Gewichtskraft festgelegt sind. Darum schreibt man auch bei den Variablen den Quotienten aus Größe und deren Maßeinheit, wodurch die einzusetzende (Maß-)Zahl entsteht. Solche Zahlenwertgleichungen sind oftmals bei speziellen technischen Anwendungen üblich. Da hier der Spezialist weiß, wie die einzelnen Werte einzusetzen sind, werden oft die Maßeinheiten völlig wegge-

lassen. Aufgrund ihrer universellen Gültigkeit sind Größengleichungen bei der Beschreibung von Zusammenhängen vorzuziehen.

Nachdem wir nun wissen, wie die Ausprägungen der Eigenschaften von Objekten und Prozessen mittels physikalischer Größen beschrieben werden können, wollen wir uns dem wichtigsten Prozeß zur Gewinnung dieser Größen wieder zuwenden – dem Meßprozeß. Er konstituiert einerseits die physikalischen Größen und gewinnt gleichzeitig nach der Konstituierung die für die Charakterisierung des Ausprägungsgrades der Eigenschaften entscheidenden Zahlenwerte.

6.1.2 Meßprozeß

Der Meßvorgang oder kurz die Messung verläuft so, daß ein physikalisches System (das *Meßobjekt*) mit einem anderen physikalischen System (der *Meßapparatur*) unter bestimmten Bedingungen (der *Meßvorschrift*) in Wechselwirkung gebracht wird. Dabei kann die Meßapparatur sowohl das Sinnesorgan des Experimentators wie auch eine automatische Registriereinrichtung sein. Das Ergebnis der Messung ist die Bestimmung der Ausprägung einer physikalischen Größe. Der hier abstrakt formulierte Meßprozeß soll etwas genauer betrachtet werden.

Wir hatten festgestellt, daß die von uns betrachteten Objekte bestimmte charakteristische Eigenschaften haben, die in unterschiedlichen Ausprägungen auftreten und damit das jeweilige konkrete Objekt bestimmen. Nun kann diese Eigenschaft auf recht unterschiedliche Art und Weise erfaßt werden. Am Beispiel der Temperatur soll dies verdeutlicht werden.

Um die Eigenschaft eines Körpers in bezug auf seine Temperatur anzugeben, haben wir z.B. folgende Möglichkeiten:

1. heiß;
2. kalt, normal, heiß;
3. eisig, frostig, kalt, kühl, angenehm, lau, warm, heiß;
4. qualitative Zusätze wie: unerträglich, extrem, gewaltig, sehr, mehr, weniger, kaum etc.;
5. 13,7 °C.

Die erste Möglichkeit ist nur eine entweder gültige oder ungültige Feststellung. Im zweiten Fall muß zwischen drei Temperatur-Eigenschaften unterschieden werden. Auf der dritten Stufe besitzen wir schon 8 Eigenschaftswerte, die durch die qualitativen Zusätze der vierten Möglichkeit noch weiter unterteilbar sind. Der Übergang zur fünften Möglichkeit ist insofern fast nur noch formal, weil die Skale der möglichen Eigenschaftswerte durch eine Zahlenskale repräsentiert wird. Die hier betrachteten Möglichkeiten stellen also eine Steigerung der möglichen Meßgenauigkeit der Eigenschaft Temperatur dar. Häufig wird nur der fünfte Fall als „echte" Messung angesehen, was eine unzulässige Einschränkung bedeutet. Zahlenwerte sind also nur bedingt für das Messen notwendig.

Allerdings spiegelt diese Verwendung des Meßbegriffs die sich bis heute herausgebildete Betrachtungsweise des Messens wider. Dabei ist Messung jede Zuordnung einer

Zahl zu empirisch Gegebenem gemäß einer Regel. Metrisierung ist die Konstruktion einer numerischen Funktion über einem empirischen Relationalsystem. Damit wird nur dann von der Messung einer Größe gesprochen, wenn die dem Begriff zuzuordnende Zahl das Vielfache einer (oder mehrerer) Einheiten ist (vgl. Böhme 1993).

Doch kommen wir noch einmal zu unserer Betrachtungsweise zurück. Wir hatten gesehen, daß einem Objekt bestimmte Eigenschaften zukommen, die in ihrer verschiedenen Ausprägung den Zustand des Objektes charakterisieren. Bei der Temperatur waren dies z.B. heiß, warm, kalt, eisig. Die unterschiedliche Anzahl dieser Ausprägungen heißt Ausprägungsgrad der Eigenschaft in bezug auf eine ausgewählte (Meß-) Methode. Den einzelnen Ausprägungen können Zahlenwerte zugeordnet werden, z.B. heiß = 1, warm = 2, kalt = 3 und eisig = 4. Auf diese Art entstehen quantifizierte Skalen. Die Art der Zuordnung bestimmt den entstehenden Skalentyp. Die Messung stellt dann fest, welcher Zahlenwert zur Eigenschaft des Objektes gehört. Der so verstandene Meßvorgang läßt sich formal in folgende Reihe logisch aufeinander aufbauender Begriffe bringen:

$$\text{Objekt} \rightarrow \text{Eigenschaft} \rightarrow \text{Ausprägung} \rightarrow \text{Skalentyp} \rightarrow \text{Messung} \rightarrow \text{Zahl}.$$

Alle links vom Begriff Messung stehenden Begriffe gehören zu den theoretischen Grundlagen des Messens. Die Messung selbst und damit die Gewinnung des Zahlenwertes ist die experimentelle Seite des Messens.

Betrachtet man den Meßprozeß unter dem Aspekt der Instrumentenentwicklung in seinen Entwicklungsdimensionen, so kann man vier wesentliche Etappen unterscheiden:

- Die Phase der *Validierung*. Hier wird die Frage gestellt, „Messe ich auch, was ich messen will?" In der Wissenschaftsgeschichte war die Phase auch oft mit der Frage „Was mißt mein Meßgerät eigentlich?" verknüpft.
- In der Phase der *Universalisierung* einer Meßtechnik geht es dann darum, die Resultate universell vergleichbar zu machen.
- Bei der *Generalisierung* wird die Meßtechnik für eine Größe von den Grenzen eines bestimmten Instrumententyps gelöst. Damit kommt man in die Lage, die prinzipiell (theoretisch) möglichen Wertebereiche der entsprechenden Größe auch meßtechnisch zu erfassen.
- Die *Idealisierung* löst sich von bestimmten Substanzen, die ursprünglich einmal als paradigmatisch angenommen wurden. Diese Phase hängt eng mit der Generalisierung zusammen.

Der methodische Vorgang, der zur für die Messung vorauszusetzenden Begriffsbildung führt, kann wie in Abbildung 6.1 gezeigt zusammengefaßt werden.

Diese Übersicht macht deutlich, daß die Quantifizierung und die Metrisierung ganz wesentliche qualitative Schritte bei der Entwicklung des Meßprozesses sind. Sie haben zu dem heute existierenden Stand geführt, der sich u.a. auch in den Skalen des Kapitels 3 widerspiegelt. Die Metrisierung mit der Herausbildung der verschiedenen Skalentypen hat auch die Möglichkeit eröffnet, die Meßergebnisse mittels mathematischer Methoden zu verarbeiten, sie sozusagen als Basisdaten für Voraussagen über Eigen-

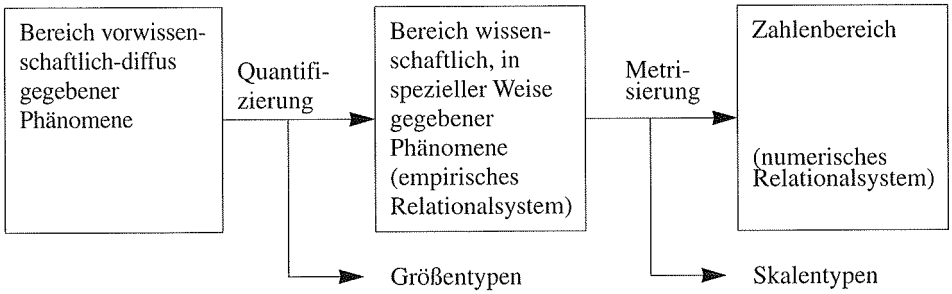


Abb. 6.1
Für die Messung vorauszusetzender Begriffsbildungsprozeß (nach Böhme 1993)

schaften oder Verhalten der untersuchten Objekte zu verwenden. Dabei ist zu beachten, daß die Skalentypen festlegen, welche mathematische Verwendung man von den nach der jeweiligen Skale erhobenen Daten machen kann. Mathematisch gesprochen bedeutet dies u.a., daß Formeln, in denen Variablen für Meßdaten vorkommen, nur dann sinnvoll sind, wenn sie der Form nach gegenüber Transformationen invariant sind, die nach dem für die Daten maßgeblichen Skalentyp zugelassen sind. So sind insbesondere je nach Skalentyp für die Daten nur bestimmte Typen von Statistik brauchbar. Wir wollen hier nicht tiefer auf das Problem eingehen. Es macht aber zumindest deutlich, daß der Skalentyp etwas mit der zur Beschreibung möglichen Mathematik zu tun hat. Das hat auch Auswirkungen auf unsere in Kapitel 5 gestellte Frage nach der Widerspiegelung der realen Welt durch die Zahlen und ihre mathematische Verknüpfung. In Kapitel 7 wird darauf noch einmal zurückzukommen sein.

Eine kurze Erwähnung muß hier noch die Frage des Einflusses der Messung auf die Eigenschaft des Objektes finden. In der klassischen Physik wird davon ausgegangen, daß die Messung das Objekt bzw. den Prozeß nicht stört (bzw. diese Störung beliebig klein gemacht werden kann). Diese Voraussetzung ist in der Mikrophysik nicht mehr gegeben. Hier sind die Wirkungen der Meßapparatur in der Größenordnung der zu betrachtenden Wirkungen. Das hat wichtige Konsequenzen für die Betrachtung des Meßprozesses und für die mit diesem gewonnenen Daten. Die Ursache liegt darin, daß wir als makroskopische Wesen letztlich jede Messung im Mikrokosmos zuletzt in den Makrokosmos „übersetzen" müssen. Das führt auch dazu, daß wir für die Beschreibung der mikrophysikalischen Welt nur unsere (nichtadäquaten) makrophysikalischen Größen und Begriffe zur Verfügung haben. Wir benötigen daher zur ganzheitlichen Beschreibung solcher Phänomene sich makrophysikalisch ausschließende Begriffe. Das führt zum Komplementaritätsprinzip von Niels Bohr (1885–1962). Mit der zunehmenden Bedeutung des Mikrokosmos für unsere Technik – es sei nur an die Mikroelektronik erinnert – wird aus diesem erkenntnistheoretischen Problem zunehmend eines der täglichen Praxis.

Der Meßprozeß, der in seinem Ergebnis zu den uns überall umgebenden Daten führt, ist also erkenntnistheoretisch eine durchaus komplexe und schwierige Fragestellung. Hier sollte dafür nur das Verständnis geweckt werden. Das Bewußtsein über

den besonderen Charakter dieses Prozesses wird auch den durch ihn gewonnenen Daten ihre Absolutheit nehmen und zu einem differenzierteren Umgang mit ihnen anregen. Es sollte auch deutlich geworden sein, daß der Meßprozeß immer nur einen bestimmten (meist sehr engen) Ausschnitt des Objektes erfassen kann. Die Abstufung vom Objekt bis zur Zahl macht deutlich, daß bei jedem Messen vieles und oftmals auch Wesentliches des Objektes keine Beachtung findet bzw. finden kann. Was ein Mensch, oder gar ein gütiger Mensch ist, kann gewiß niemals durch gemessene Zahlenwerte in Erfahrung gebracht werden. Bei aller Notwendigkeit und Bedeutung des exakten Messens in unserer Gesellschaft sollte diese Problematik niemals vergessen werden.

6.1.3 Meßwert, Meßfehler

Nachdem wir den Meßprozeß betrachtet haben, wollen wir uns nun dem Ergebnis dieses Prozesses zuwenden – dem Meßwert. Er steht am Ende der Messung. Er ergibt sich aus der Zuordnung des Ausprägungsgrades einer Eigenschaft zu einem Zahlenwert aus einer Skale. Der Meßwert besteht, wie die Größe, die er repräsentiert, aus dem Zahlenwert und der Maßeinheit.

Diese Betrachtung suggeriert, daß man bei einer Messung einen exakten Zahlenwert erhält, der unter den gleichen Umständen immer wieder erhalten wird. Daß dies in der Realität so nicht funktioniert, zeigt folgendes einfache Beispiel.

Auf einem Markt kann man genau drei Äpfel kaufen. Es ist aber unmöglich, genau drei Liter Wein zu erstehen. Die natürlichen Zahlen, mit deren Hilfe die Äpfel gezählt werden, geben einen exakten Wert für die Anzahl, da sie diskret sind. Der bei der Messung aus einer Skale erhaltene Wert ist mit einem Fehler behaftet. Auf diese Weise werden aber die drei Liter Wein bestimmt. Der Fehler bei der Messung hat einmal seine Ursache in der Meßapparatur und zum anderen in der Tatsache, daß die Werte auf der Skale ein Kontinuum bilden, aus dem durch die Messung ein Wert ausgewählt wird.

Bei der Wiederholung einer Messung stellt man schnell fest, daß jedesmal ein etwas anderer Zahlenwert erhalten wird. Der Meßwert ist mit einem Fehler behaftet. Es stellen sich nun zwei Fragen: Woher kommt der Fehler? und Wie groß ist der Fehler? Die letzte Frage impliziert die Frage nach dem „richtigen" Meßwert.

Die Ursachen des Fehlers, der eine objektive Eigenschaft von Meßwerten ist, sind unterschiedlicher Natur. Es gibt einerseits *systematische Fehler.* Sie entstehen dadurch, daß bestimmte Meßvorschriften immer in der gleichen Art nicht beachtet werden, bzw. daß bestimmte äußere Einflüsse die untersuchte Eigenschaft des Objektes immer in gleicher Weise zusätzlich beeinflussen. Diese Fehler sucht man durch entsprechende Sorgfalt zu beseitigen. Die *zufälligen Fehler* entstehen bei der Messung, weil im Moment des Meßvorganges irgend ein zusätzlicher Einfluß zufällig auf die untersuchte Eigenschaft des Objektes einwirkt. Damit wir aus dem Zahlenkontinuum der Skale in einem gewissen Bereich ein zufälliger Wert durch die Messung ausgewählt.

Einen weiteren Einfluß auf das Ergebnis hat das Meßinstrument. Von der Feinheit seiner Meßskale bzw. seiner Empfindlichkeit hängt der minimale Abstand zwischen zwei möglichen Skalenpunkten dieser Messung ab. Dieser Einfluß wird oftmals als der Fehler des Meßgerätes bezeichnet. Die Auswahl der entsprechenden Empfindlichkeit des Meßgerätes für das entsprechende Meßproblem ist ein wichtiger Schritt beim Meßprozeß. Es macht wenig Sinn, das Gewicht eines normalen Briefes mit einer Waage feststellen zu wollen, deren minimaler Abstand zwischen zwei Skalenwerten ihrer linearen Skala 100 g beträgt. Genauso unsinnig wäre die Angabe einer mit einer Briefwaage bestimmten Masse zu 18,92543 g. Der kleinste Skalenabstand einer solchen Waage liegt bei 1 g, womit 19 g eine sinnvolle Angabe für die Masse wäre. Auch hier ist natürlich eine lineare Skala vorausgesetzt.

Doch was ist nun der „richtige" Wert einer Messung? Diese Frage ist nicht so leicht zu beantworten. Betrachten wir ein Beispiel. Wir nehmen einen Glaszylinder mit einem Innendurchmesser von 10 cm und füllen ihn bis zur Höhe von 10 cm mit Wasser. Mittels der Formel $V = \pi r^2 h$ läßt sich das Volumen der Wassersäule berechnen, ein Taschenrechner liefert 785,3981634 cm^3. Nun nehmen wir an, daß sowohl der Zylinderdurchmesser wie auch die Höhe der Wassersäule nur auf 1 mm genau gemessen wurden. Dies hat Konsequenzen für das ermittelte Volumen. Vielleicht sollte es mit 785 cm^3 angegeben werden. Doch eine weitergehende Analyse zeigt, daß nicht einmal die erste Ziffer korrekt ist. Kontrollrechnungen mit den extrem möglichen Werten 5,1 bzw. 4,9 cm für den Radius bzw. für die Höhe 10,1 oder 9,9 cm ergeben einen Bereich zwischen 825,2... und 746,7... cm^3. Man möchte aber den wahrscheinlichsten Wert gern als eine Zahl besitzen. Dazu eignet sich gut die in Abschnitt 5.2 eingeführte Exponentialschreibweise. Der Wert $8 \cdot 10^2$ cm^3 ist etwas zu ungenau, der Wert $7{,}9 \cdot 10^2$ cm^3 etwas zu genau. Selbst die Schreibweise 790 cm^3 suggeriert eine deutlich zu hohe Genauigkeit. Eine korrekte Schreibweise für einen solchen Meßwert gibt den Fehlerbereich mit an, in unserem Beispiel wäre dies (785 ± 40) cm^3.

Durch eine Vielzahl von Messungen kann hier der Meßfehler verringert werden. Wir erhalten eine statistische Verteilung von Meßwerten um einen Häufungspunkt, welcher den Meßwert repräsentiert. Mittels verschiedener Verfahren zur Auswertung solcher Meßreihen kann dieser Punkt als Meßwert mit seinem Fehlerbereich bestimmt werden. Das bekannteste Verfahren ist die Gaußsche Fehlerrechnung. Sie beruht auf der Einsicht, daß solche, auf zufälligen Fehlern basierende Meßwerte, bei genügend großer Anzahl eine Gaußsche Normalverteilung ergeben. Damit ist auch noch einmal klar gemacht, daß nur der zufällige Fehler auf diese Weise einen Ausgleich erfahren kann.

Auch die Angabe natürlicher Zahlen kann fehlerbehaftet sein, wenn nämlich die Anzahl durch Schätzung ermittelt wurde. Das ist in vielen Fällen nicht anders möglich, wie z.B. bei der Ermittlung von Teilnehmerzahlen einer Demonstration. Sinnvollerweise sollte hier nur eine Ziffer angegeben werden. Da in diesen Fällen der Kontext auf den Enstehungszusammenhang und damit auf die Fehlermöglichkeit hinweist, kann statt der korrekten Schreibweise $3 \cdot 10^5$ auch 300 000 geschrieben werden, ohne damit eine erzielte Genauigkeit vorzutäuschen.

Innerhalb der Physik und der Technik war man schon immer bemüht und ist es noch heute, sowohl die Darstellung der Basiseinheiten wie auch die Meßmethoden zu mög-

lichst hoher Präzision weiterzuentwickeln. Das ergibt für die einzelnen Maßeinheiten zu jedem Zeitpunkt in Abhängigkeit von ihrer Größe sehr unterschiedliche Fehlergrenzen. Einen kleinen Überblick gibt Abschnitt 3.11.1. Es gibt Meßwerte, wie z.B. die Vakuumlichtgeschwindigkeit, die mehr als zehn gültige Ziffern erreichen. Es gibt aber auch Werte, für die nicht einmal die erste Ziffer garantiert ist. In extremen Fällen kann sogar die Zehnerpotenz ein wenig unsicher sein. Dennoch haben auch solche Zahlenwerte oft gewichtige Aussagekraft, denn selbst so ungenau bestimmte Zahlen sagen mehr aus, als wenn gar kein Zahlenwert angebbar ist.

Dieser Effekt tritt auch in den Skalen des Kapitels 3 auf. Infolge ihrer logarithmischen Einteilung ist oft nur noch die Zehnerpotenz der entsprechenden Werte erkennbar. Aber gerade dadurch ist es möglich, mit der Darstellung einen gebietsübergreifenden Vergleich zu verschiedenen Fach- und Anwendungsgebieten zu erreichen. Das bietet die Möglichkeit zu überraschend neuen Einsichten.

Die historische Entwicklung der Meßgenauigkeiten wird in Tabelle 6.1 am Beispiel der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in ihrer historischen Abfolge demonstriert.

Tabelle 6.1
Entwicklung der Genauigkeit der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Autor	Jahr	c in 10^6 m/s	Fehler in m/s
Römer	1676	214	100 000 000
Fizeau	1848	315	10 000 000
Foucault	1850	298	500 000
Michelson	1879	299,91	50 000
Michelson	1927	299,796	4 000
Essen	1950	299,792	1 000
Bergstrand	1951	299,7931	200
Froome	1958	299,7925	100
Simkin	1967	299,79255	50
Bay	1972	299,79246	20
Evenson	1972	299,792457	1

Für wichtige Basiseinheiten werden folgende Meßfehler erreicht:

Sekunde	$1 \cdot 10^{-14}$
Meter	$4 \cdot 10^{-9}$
Kilogramm	$8 \cdot 10^{-9}$
Ampere	$3 \cdot 10^{-6}$.

Sie gelten aber nur für das Normal. Soll beispielsweise eine Länge im Millimeter- oder gar im Nanometerbereich bestimmt werden, so addieren sich noch beachtliche Fehler, die aus dem Vergleich der Länge mit dem Normal resultieren. Auch bei astronomi-

schen Entfernungen ist die Bestimmung oft nur auf eine oder zwei gültige Ziffern möglich.

Wir haben auf die prinzipiell immer vorhandenen Fehler von Meßwerten hingewiesen. Es gibt nicht „den" Meßwert für eine Größe. Auch die Frage nach dem „richtigen Meßwert" ist falsch gestellt. Die Frage ist nur in zwei Richtungen zu beantworten. In bezug auf eine theoretische Voraussage kann man angeben, wieweit sich der experimentelle Wert dem theoretischen Wert nähert. Untersucht man die Fehlerbreite des gemessenen Wertes, kann abgeschätzt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit der theoretische Wert durch den experimentellen bestätigt wurde. Die andere Richtung dieser Frage zielt nach dem Wert, der aufgrund der Meßreihe und ihrer Genauigkeit für die untersuchte Größe der wahrscheinlichste ist (entsprechend der statistischen Verteilung der Meßwerte) und mit welcher Fehlerbreite er behaftet ist. Die Fehlerbreite ist ein Maß für die Sicherheit der mit dem Meßwert getroffenen Aussage.

Dieser Tatsache muß in konsequenter Weise auch im Umgang mit den Meßwerten Rechnung getragen werden. Das ist nicht nur für die richtige Angabe der Werte gemeint, sondern auch für den weiteren Umgang mit ihnen. Weitere Rechnungen mit den entsprechenden Werten müssen deren Intervall-Charakter berücksichtigen. Strenggenommen wird nicht mit einer exakten Zahl gerechnet, sondern mit einer unscharfen Menge (die allerdings einen Schwerpunkt, Mittelwert aufweist). So haben sich aufgrund von unterschiedlichen Annahmen der statistischen Verteilung der Meßwerte einer Meßreihe verschiedene Methoden der Ausgleichsrechnung zur Bestimmung der Meßwerte entwickelt. Zahlreiche Untersuchungen zur Fehlerfortpflanzung in Rechnungen haben Methoden entstehen lassen, der Fehlerbehaftetheit der in die Rechnung eingehenden Größen zu genügen und den Fehler des (berechneten) Endergebnisses abzuschätzen.

Die aus der Meßtechnik gemachte Erfahrung, daß in der Realität keine scharfen Werte zu gewinnen sind, hat auch in der Mathematik ihre Widerspiegelung erfahren. In den letzten Jahrzehnten haben sich Gebiete entwickelt, die auf unterschiedliche Weise diesem Faktum Rechnung tragen wollen. Erwähnt seien hier nur die Intervallmathematik, das Rechnen mit unscharfen Mengen (Fuzzy-Mengen) und die neuronalen Netze. Die letzteren sind eine besondere Lösungsvariante zum Umgang mit großen Datenmengen. Dem neuronalen Netz werden bestimmte mögliche Strukturen des Zusammenhanges zwischen den gewonnenen Daten vorgegeben. Anhand der dann eingegebenen Daten lernt das Netz, selbsttätig nach neuen Zusammenhängen zu suchen, die einen wahrscheinlichsten Zusammenhang zwischen den fehlerbehafteten Daten ergeben. Mittels der heute verfügbaren Computertechnik können dann relativ schnell für große Mengen realistischer Daten Verknüpfungen ermittelt werden, die reale Wirkbeziehungen widerspiegeln.

6.1.4 Grenzwerte

Nachdem wir festgestellt haben, daß Meßwerte immer fehlerbehaftet sind, muß an dieser Stelle noch etwas zu Grenzwerten gesagt werden. Aufgrund der sehr vielfältigen Bedeutung des Wortes „Grenze" im Deutschen, schwingen bei seinem Gebrauch (auch

in Zusammensetzungen wie Grenz-wert) immer mehrere Bedeutungsinhalte mit. Allen gemeinsam ist der Inhalt, daß Grenzen eine Abgrenzung zu etwas anderem darstellen. Grenzwert suggeriert dann, daß man die Stelle dieser Abgrenzung mit einem (exakten) numerischen Wert charakterisieren kann.

In unserem hier betrachteten Zusammenhang interessieren Grenzwerte unter zwei Gesichtspunkten:

- Grenzwerte für bestimmte Größen innerhalb der Skalen;
- numerische Zahlen als Grenzwerte für bestimmte Wirkungen.

Zu den Grenzwerten innerhalb der Skalen ist in den entsprechenden Abschnitten etwas gesagt. Diese Grenzwerte können prinzipieller Natur sein (wie z.B. 0 K als untere Grenze der Temperaturskale), sie können aber auch nur durch bestimmte Bedingungen entstehen. Das können z.B. Meßverfahren oder theoretische Vorstellungen sein. So entstandene Grenzwerte unterliegen einer zeitlichen Dynamik.

Anders liegt die Situation bei den Grenzwerten, die die Auswirkung bestimmter Stoffe oder anderer Wirkungen (vorwiegend) auf den Menschen so eingrenzen wollen, daß mit einem minimalen Schadensrisiko zu rechnen ist. Diese Grenzwerte stellen also festgelegte Werte dar.

Historisch kann man solche Grenzwerte als eine deutsche Erfindung betrachten (Henschler 1995). Die ersten Grenzwerte waren für Arzneimittel festgelegt und erstmals in der 2. Auflage des Deutschen Arzneibuches (Editio alters) 1882 genannt. Wesentlich bedeutsamer für die weitere Entwicklung war die zunehmende Beachtung des Arbeitsschutzes in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Vor allem der Pettenkofer-Schüler Karl Bernhard Lehmann und der Toxikologe Ferdinand Flury erarbeiteten ein System der Grenzwerte am Arbeitsplatz. Es haben sich bis heute verschiedenste Verfeinerungen und Ansätze zur Grenzwertbestimmung herausgebildet, es seien nur die MAK-Werte (maximale Arbeitsplatz-Konzentration), TRK-Werte (technische Richt-Konzentrationen), ADI-Werte (acceptable daily intake), MIK-Werte (maximale Immissions-Konzentration) oder das ALARA-Konzept (as low as reasonably achievable) erwähnt.

Indem man diese Werte in der Regel zu immer geringerer Größe hin verschiebt und sie auch immer genauer angibt, suggeriert man, die ablaufenden Prozesse so genau zu verstehen und die Wirkung der entsprechenden Stoffe so genau messen zu können, daß eine so „exakte" Grenzwertfestlegung möglich wird (natürlich gibt es auch echte Verbesserungen der Kenntnisse). Wir möchten hier aus unserer bisherigen Sicht auf zwei Punkte hinweisen.

Erstens sind alle Meßwerte immer fehlerbehaftet und die betrachteten Vorgänge meist so komplex, daß eine so genaue Festlegung eines Grenzwertes in aller Regel in keiner Relation zu der Genauigkeit der Kenntnis für den gesamten Prozeß steht. Das gilt vor allem auch bei den zunehmend auftretenden Grenzwerten im ökologischen Bereich. Sie sind i. allg. durch eindimensionale Betrachtung bestimmter Wirkungspfade entstanden und berücksichtigen den komplexen, vernetzten Charakter der Ökosysteme nur ungenügend (eventuell überhaupt nicht). Wenn die anderen Werte der im System agierenden Substanzen und Wirkungen weniger genau bekannt sind, dann nützt die um Zehnerpotenzen größere Genauigkeit einiger weniger Werte wenig oder

nichts für die Genauigkeit der Beschreibung des Systems (Fehlerfortpflanzung in komplexen Systemen).

Der zweite Gesichtspunkt, der bei Grenzwerten immer beachtet werden muß, ist ihr Entstehungszusammenhang. Grenzwerte sind immer Werte, die aussagen, welche Folgen man bei bestimmten Wirkungen noch akzeptieren will. Sie sind somit normativ und entstehen im politisch geprägten diskursiven Prozeß, spiegeln somit die jeweilige gesellschaftspolitische Situation wider. Eine durch genauere Zahlenangaben und kleiner werdende Fehlerbalken suggerierte „wissenschaftliche" Gewinnung von Grenzwerten, unabhängig vom politisch handelnden Subjekt, läßt eine wesentliche Facette dieser Grenzwerte unter den Tisch fallen. Damit werden die an den Grenzwerten interessierten Akteure aber auch eines wichtigen Ansatzpunktes für eine Veränderung der Grenzwerte in ihrem Sinne beraubt – nämlich der Änderung im Sinne eines besseren ganzheitlichen Gesundheits- und Umweltschutzes.

Grenzwerte sind wichtige Elemente zur Steuerung der Risikominimierung unseres Lebens in alle Richtungen. Dazu ist ein realistischer Umgang mit diesen Meßwerten geboten – sie dürfen nicht ob ihrer Wissenschaftlichkeit zum Fetisch erhoben werden .

6.2 Skalentypen

Wir hatten gesehen, daß wir über Objekte sowohl qualitative wie auch quantitative Aussagen machen können. Die qualitativen sind vorwiegend ganzheitlicher Natur und treten u.a. meist in der Philosophie und der Kunstkritik auf. Die quantitativen betreffen vor allem das Zählen und Messen. Das Messen kann in verschiedenen Ausprägungsformen geschehen, die durch das Vorhandensein von Skalentypen gekennzeichnet sind. Ein Skalentyp wird i. allg. durch eine mathematische Funktion der Art $Y = f(X)$ beschrieben. Dabei bedeuten Y den Zahlenwert des Meßergebnisses und X die einzelnen Ausprägungen der zu messenden Eigenschaft. Um eine solche Funktion für eine Eigenschaft definieren zu können, müssen mindestens zwei Ausprägungsgrade existieren. Im einfachsten Falle kann dies die Frage danach sein, ob ein Körper heiß sei. Die Antwort hat die zwei Ausprägungsgrade Ja und Nein. Der Gang zu weiteren Ausprägungsgraden haben wir für dieses Beispiel in Abschnitt 6.1.2 betrachtet.

Die Konstruktion von Skalentypen über dem empirischen Relationalsystem entspricht einer Metrisierung. Ein Skalentyp ist somit eine Metrisierung, die bis auf eine, für den Skalentyp charakteristische, Gruppe von Transformationen eindeutig ist.

Wir wollen im folgenden nur die vier wichtigsten Skalentypen mit der Funktion $Y = f(X)$ erläutern.

Eine *Nominal-Skala* verlangt ausschließlich die umkehrbar eindeutige Zuordnung zwischen Zahlenwerten und festgelegten Ausprägungsgraden. Die zugelassene Transformationsgruppe ist die Permutationsgruppe. Beispiele sind die Numerierung der Fußballspieler oder die Verwendung von Kontonummern. Über den Zahlenwert kann hier nur in eindeutiger Weise auf die Objekte verwiesen werden. Zusammenhänge oder gar mathematische Relationen zwischen den einzelnen Zahlenwerten haben hier

keinen Sinn. Daher steht die Nominalskala im engen Zusammenhang mit einer einfachen Aufzählung oder Auflistung der Objekte.

Die *Ordinal-Skala* verlangt einen monoton steigenden Zusammenhang zwischen den Zahlenwerten und Ausprägungsgraden:

$$Y_1 < Y_2 \text{ dann und nur dann, wenn } X_1 < X_2 \text{ gilt.}$$

Hier werden also Objekte bezüglich der ausgewählten Ausprägung nach einer Größer-Gleich-Relation geordnet. Zugelassene Transformationsgruppe ist hier die isotone Gruppe. Typische Beispiele hierfür sind die Mohssche Härteskale und die Schulzensuren. Zwischen zwei beliebig ausgewählten Objekten kann bezüglich der ausgewählten Eigenschaft immer entschieden werden, welches Objekt die stärkere Ausprägung besitzt. Bei der Mohsschen Härteskale erfolgt dies über die Ritz-Probe. Das härtere Material ritzt jenes mit der geringeren Härte. Ebenso ist es für eine Schulnote 2 notwendig, in dem Lehrfach mehr Leistung als für eine Note 3 zu erbringen (von typisch subjektiven Fehleinschätzungen soll hier natürlich abgesehen werden). Unter gewissen Umständen kann aber selbst diese einfache Ordinal-Skala unsinnig sein. Dies wird deutlich, wenn jemand behaupten würde, daß Mahlers 1. Sinfonie mehr wert sei als das Kriegstriptichon von Dix. Beide Werke sind dagegen problemlos im Sinne der Nominal-Skala mittels Inventarnummern zu erfassen.

Die *Intervall-Skala* verlangt zwischen den Zahlenwerten Y und den Ausprägungsgraden X einen linearen Zusammenhang entsprechend der Gleichung

$$Y = a + bX.$$

Darin bedeuten a und b jeweils passend gewählte Konstanten. Aus der Formel folgt unmittelbar die typische Eigenschaft dieses Skalentyps. Die Differenz von Zahlenwerten ist bei gleichen Intervallen unabhängig von der Lage des Meßwertes im Meßbereich. Das setzt ein lineares Verhalten der Ausprägungsgrade der Eigenschaft voraus. Zugelassene Transformationsgruppe ist die affine. Dies ist für viele physikalische Größen erfüllt. Mißt man die Temperatur in Celsius, so nimmt die Wärmebewegung zwischen 20 °C und 40 °C um genauso viel zu wie zwischen 60 °C und 80 °C. Bei den Schulnoten wäre es dagegen unsinnig zu behaupten, daß von der Note 2 zur Note 1 der gleiche Leistungsanstieg wie von der Note 4 zur Note 3 erforderlich sei.

Eine spezifische Intervall-Skala verwendet zusätzlich den Logarithmus gemäß

$$Y = a + b \cdot \log(X).$$

Die *Verhältnis-Skala*

$$Y = bX$$

und die *absolute Skala*

$$Y = X$$

verlangen proportionale bzw. absolute Zuordnungen zwischen Zahlenwerten und Ausprägungen. Die absolute Skala stellt einen Sonderfall der Verhältnis-Skala für $b = 1$ dar. Zugelassene Transformationsgruppe ist hier die Gruppe der Ähnlichkeitstransformationen. Insbesondere existiert hier ein absoluter Nullpunkt. Deshalb gehorcht die Maßeinheit Celsius nur der Intervall-Skala, während das Kelvin sogar der absoluten Skala genügt. Trotz dieser strengen Forderung genügen viele physikalische Meßgrößen der Verhältnis- bzw. absoluten Skala. Beispiele sind u.a. Strom, Spannung und Leistung. Die zugehörigen Messungen beruhen hier meist auf dem Vergleich mit einem allgemein (international) vereinbarten Normal. Dieses Normal legt dann die Maßeinheit fest und das Messen führt zur Maßzahl. Sie gibt an, wie oft die Ausprägung des Normals in der des gemessenen Objekts vorhanden ist. Dies kann durchaus auch eine rationale Zahl sein.

Die aufgeführten Skalen besitzen eine eindeutige Reihenfolge bezüglich der Präzision von Messungen. Daher ist es nicht verwunderlich, wenn die Technik meist exakte Meßmethoden im Sinne des absoluten Skalentyps fordert. Es liegt die Vermutung nahe, daß so die Zuverlässigkeit der Technik erhöht wird. Um dieses Ziel zu erreichen, ist aber eine lange und mühsame Entwicklung der zugehörigen Meßtechnik erforderlich. Derartige genaue Messungen erfordern eine meist sehr teure Meßtechnik, so daß nicht selten ökonomische Betrachtungen einfachere Meßverfahren verlangen.

In jedem Fall existiert für jede zu messende Größe eine historische Entwicklung, die folgendermaßen strukturiert ist:

- Es wird klar, daß eine Eigenschaft prinzipiell meßbar sein könnte.
- Die Leistungen unserer Sinnesorgane bestimmen erste Meßgrößen, meist gemäß der Ordinal-Skala.
- Es entstehen spezielle Meßmethoden und -geräte, welche die Messung ermöglichen.
- Die Meßgeräte werden ständig bezüglich des Bedienkomforts und der erreichbaren Meßgenauigkeit verbessert.
- Es erfolgt schrittweise ein Übergang zu den „höheren" Skalentypen.
- Der Stand der Technik allgemein und der mögliche gerätetechnische und ökonomische Aufwand setzen jeweils zeitbedingte Grenzen.
- Schließlich werden theoretische Grenzen der Meßbarkeit deutlich. Sie können sowohl den Skalentyp als auch die erreichbare Meßgenauigkeit betreffen.

Innerhalb dieser historischen Entwicklung durchläuft die Instrumentenentwicklung die in Abschnitt 6.1.2 skizzierten Entwicklungsdimensionen der Validierung, Universalisierung, Generalisierung und Idealisierung.

Als Beispiel für die meisten der o.g. Stufen und damit auch für die Anwendung unterschiedlicher Skalentypen kann die Farbenlehre dienen. Farben sind für viele Menschen ähnlich den Gefühlen sehr subjektiv. Sie werden daher nicht nur über Ausprägungen wie rot, gelb, grün, blau und violett wahrgenommen, sondern rufen auch Bedeutungen hervor: weiß für Unschuld und Reinheit, rot für Gefahr bzw. blau für kalt und rot für heiß. Etwa vom Mittelalter an versuchte man, die Farben u.a. in einem Farbenkreis zu ordnen. Über viele Zwischenstufen können wir sie heute exakt über drei Zahlenwerte, z.B. die Intensitäten der drei additiven Farbanteile rot, grün und blau

definieren. Ein Gemälde von Rubens kann so in aller Detailtreue mit höchster Farbgenauigkeit gespeichert und daher praktisch zum Original identisch reproduziert werden. Das geht heute soweit, daß von Museologen ernsthaft diskutiert wird, ob für derartige digitale Daten das Urheberrecht gilt. Dennoch ist ein solcher „Zahlenfriedhof" gewiß nicht das Bild. Die Meßwerte betreffen ja nur die einzige Eigenschaft „Farbe der diskretisierten Bildpunkte" und keinesfalls die Gesamtheit der Aussage des Bildes.

Trotz der erwähnten Möglichkeit des absoluten Skalentyps für Farben werden heute häufig nur Chargennummern (wie für Wolle) im Sinne einer Nominal-Skala verwendet. Dies senkt die Kosten im Produktionsprozeß gewaltig, da keine hochgenaue Reproduktion erforderlich ist. Schon seltener wird über eine Farbnummer (Lippenstift) die Wiederholbarkeit des Farbtones und damit eine Ordinal-Skala garantiert. Vom absoluten Skalentyp wird aber selbst beim Fernsehen und beim Drucken nur in ausgewählten Fällen Gebrauch gemacht.

Das letzte Beispiel macht deutlich, daß ein niederer Skalentyp durchaus kein Manko zu sein braucht. Nicht das Begnügen-müssen sondern die Angemessenheit des Skalentyps ist entscheidend. Ein überzogenes Streben nach ranghohen Skalentypen und exakten Zahlenwerten kann sogar nachteilig sein. Was wäre z.B. damit gewonnen, wenn wir sagen könnten, die 5. Sinfonie von Beethoven besitzt 3,157 ÄN (ästhetische Normeinheiten) einer absoluten Skala?

Andererseits wäre es aber sträflich leichtsinnig, wenn wir uns bezüglich der Sicherheit einer Brücke mit einer Ordinal-Skala gemäß 1 = haltbar, 2 = eventuell haltbar und 3 = gefährdet begnügen würden. Hier sind genaue Maßzahlen des Sicherheitsfaktors unerläßlich. Weiter wären viele moderne Techniken nicht ohne exakte Maße existent. Man denke nur an die extrem geringen Toleranzen in der Computerindustrie oder bei einem Satellitenstart. Auch der Geldwert erfordert meist präzise Zahlen: Millionen oder gar Milliarden Mark müssen meist auf Bruchteile eines Pfennigs stimmen. Das Bankgewerbe würde andernfalls wohl zusammenbrechen.

Die Geschichte der Meßtechnik zeigt weiter, daß die verschiedenen Eigenschaften zu jedem Zeitpunkt unterschiedlich gut meßbar waren. Eine etwa jetzt gültige Rangfolge könnte folgendermaßen aussehen:

Zeit, Länge, Volumen, Helligkeit, Farbe, Intelligenz, menschliche Güte.

Während die Länge exakt gemessen werden kann, läßt sich darüber streiten, ob menschliche Güte überhaupt jemals auch nur in einer Ordinal-Skala meßbar sein kann. Dies würde ja voraussetzen, daß man feststellen müßte, ob jemand „gütiger" als jemand anderes ist. Daß wir hier nur Steigern können ohne neue Attribute zur Verfügung zu haben, zeigt uns schon im Sprachlichen das Problem des Fehlens von Ausprägungsgraden. Es ist hier natürlich die schon ins Philosophische gehende Frage zu stellen, ob solche qualitativen Eigenschaften überhaupt dem Versuch einer Quantifizierung unterzogen werden sollten.

6.3 Maßsysteme, SI

Wir haben gesehen, daß ein Meßwert für eine physikalische Größe durch die Kombination einer Maßzahl mit einer Maßeinheit genau bestimmt wird. Kennt man die Maßeinheiten für zwei physikalische Größen, die durch eine mathematische Verknüpfung eine dritte Größe ergeben, so kennt man auch die entstehende Maßeinheit. Wir hatten dies am Beispiel der Beziehung $F = ma$ in Absatz 6.1.1 betrachtet. Es leitet sich daraus nun die Frage ab, ob man nicht ein System aufstellen kann, das für das gesamte Gebiet der Physik den Zusammenhang der verwendeten Maßeinheiten definiert (wir erinnern an unsere Darstellung der Zusammenhänge der Maßeinheiten in Kapitel 4). Dazu müssen einige Maßeinheiten als Basiseinheiten bestimmt werden, aus denen sich alle anderen Einheiten eindeutig ableiten lassen. Ein solches System muß vollständig und in sich widerspruchsfrei sein und sollte möglichst wenige Basiseinheiten haben (Prinzip der Einfachheit).

Historisch waren die schon lange in Gebrauch befindlichen Einheiten des täglichen Lebens für die Zeit, die Länge und die Masse als Basis für die Einheiten der anderen Größen ausreichend, da man sich ja auch nur in dem Bereich der Makrophysik befand, für die diese Einheiten als Basis ausreichen. Die Situation wurde mit der Entwicklung der Elektrizitätslehre und des Magnetismus komplizierter, und es stellte sich die Frage, wie die dort verwendeten Einheiten mit den schon gebräuchlichen in ein System zu bringen seien.

Als erste entwarfen wohl Carl Friedrich Gauß (1777–1855) und Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) im Jahre 1836 das cgs-System. Es leitete alle Einheiten von den Basiseinheiten cm, g und s ab und wurde 1881 international für die Wissenschaft verbindlich. Gut hundert Jahre lang wurde dann geglaubt, daß sich alle physikalischen Größen eindeutig auf diese drei mechanischen Grundgrößen – Länge, Masse und Zeit – zurückführen lassen. Insbesondere wurden daher viele Größen nur in Längeneinheiten gemessen. Es ist für uns heute kaum mehr vorstellbar, daß dies z.B. für die elektrische Kapazität und Induktivität noch bis etwa 1940 galt. Es wird aber verständlich, wenn man bedenkt, daß für die Induktivität 1 cm Draht in bestimmter Anordnung und für die Kapazität eine Kugelelektrode mit 1 cm Durchmesser als Vergleichsnormale gewählt wurden. Außerdem wurden damals die meisten Meßwerte über einen Zeigerausschlag oder eine andere Längenänderung analog bestimmt. Die Temperatur entsprach der Länge einer Quecksilbersäule, der Luftdruck der Länge einer Wasser- oder Quecksilbersäule, das Gewicht dem Ausschlag einer Federwaage und der Strom der Anziehung eines Eisenstücks.

Um die Jahrhundertwende traten dann aber immer deutlicher Probleme auf. Hier seinen zwei ausgewählt, welche die Zusammensetzung der Maßeinheiten aus cm, g und s betreffen. Für mehrere physikalische Größen traten gebrochene Exponenten auf. Je nach dem Ausgangspunkt für die Ableitung ergeben sich für eine Eigenschaft unterschiedliche Kombinationen in der Einheitenzusammensetzung. Für die elektrische Ladung hatte das z.B. folgende Konsequenz: wenn im elektrischen cgs-System für die Ladung ein Wert von $3 \cdot 10^9\ \mathrm{cm^{3/2}g^{1/2}s^{-1}}$ gilt, so folgt im magnetischen cgs-System der Wert $0{,}1\ \mathrm{cm^{1/2}g^{1/2}}$. Daher wurden um 1900 immer neue Maßsysteme versucht. Etwas

übertrieben kann man behaupten, daß zu dieser Zeit jeder Physiker, der etwas auf sich hielt, ein eigenes Maßsystem entwickelte.

6.3.1 Absolute Maßsysteme

Mit der Einführung des Meternormals war der Übergang von den Maßen, die sich auf den Menschen bezogen, zu den Maßen der Natur begonnen worden (vgl. Kap. 2). Was lag daher näher, als alle Basiseinheiten aus der Natur abzuleiten. Hierzu bieten sich in geradezu optimaler Weise die verschiedenen Naturkonstanten an. Sie besitzen außerdem den Vorteil, daß sie sich selbst in kosmologischen Dimensionen nach allem, was wir bis heute wissen, kaum ändern. Aus mehreren Abschätzungen ist uns z.B. heute bekannt, daß sich die Planck-Konstante um maximal 10^{-18}/a und die Elektronenladung um weniger als $2 \cdot 10^{-13}$/a ändern dürften, damit unsere Welt so ist, wie wir sie vorfinden. Für entsprechend abgeleitete absolute Systeme werden vorrangig das Plancksche Wirkungsquantum h, die Vakuumlichtgeschwindigkeit c, die Gravitationskonstante G und die Elementarladung e_0 verwendet. Eddington (1882–1944) glaubte sogar, aus einer Maßzahl, die eventuell der Anzahl der Teilchen im Weltall entsprechen könnte, alle Fakten herleiten zu können. Besonders häufig wurde das von Max Planck (1858 bis 1947) definierte System für Masse, Länge und Zeit diskutiert:

$$m_{Pl} = \sqrt{hc/G} = 5{,}456\ldots \cdot 10^{-11}\ \text{g} \quad \text{(Planck-Masse)},$$
$$l_{Pl} = \sqrt{hG/c^3} = 4{,}051\ldots \cdot 10^{-35}\ \text{m} \quad \text{(Planck-Länge)},$$
$$t_{Pl} = \sqrt{hG/c^5} = 1{,}351\ldots \cdot 10^{-43}\ \text{s} \quad \text{(Planck-Zeit)}.$$

Praktische Bedeutung hat keines dieser absoluten Systeme erlangt. Einmal haften auch ihnen die zuvor erkannten Widersprüche an (Grundeinheiten sind wieder nur aus Länge, Masse und Zeit gewonnen). Zum anderen sind die Einheiten wenig praktikabel, da sie ohne Vorsätze bzw. Zehnerpotenzen völlig unanschaulich sind. Einige Bedeutung haben sie in theoretischen Diskussionen um absolute Grenzen möglicher meßtechnischer Erfassung unserer Welt.

6.3.2 Das Système International (SI)

Das erste wirklich neuartige System stammt von Gustav Mie (1868–1957), welches er in seinem 1910 erschienenen Lehrbuch der Physik entwickelte. Es verwendet für die Elektrizität eine zusätzliche Maßeinheit, das Ampere. Etwa gleichzeitig begannen auch systematische Forschungen zu den Problemen der Maßeinheiten. Hierbei war Julius Wallot führend und besonders verdienstvoll. Der wohl entscheidende Hinweis kam aber 1954 von dem jungen Physiker R. Fleischmann. Er zeigte, daß alle Maßeinheiten eine abelsche Gruppe bilden, die aus wenigen Basiseinheiten abzuleiten sind. Daher verlangt jedes neu einbezogene Teilgebiet eine eigene, spezifische Basiseinheit. Nur für die Mechanik genügen daher drei Basiseinheiten. So lassen sich u.a. die

Widersprüche und gebrochenen Exponenten vermeiden. Fleischmann schlug damals folgende Gliederung vor.

Tabelle 6.2
Einheitensystem nach Fleischmann

Gebiet	Grundgröße
Geometrie	Länge
Kinematik	Zeit
Mechanik	Energie
Elektrizität	Ladung
Magnetismus	magnetische Spannung
Gravitation	Gravitationspotential
Wärme	Temperatur

Den entscheidenden Abschluß dieser Entwicklung vollzog der Beschluß der X. Generalkonferenz für Maße und Gewichte 1954 in Genf. Das hier vorgeschlagene Konzept erhielt dann auf der XI. Generalkonferenz 1960 den Namen SI (die Benennung ist gültig für alle Sprachen). Es wurde – so die Präambel – vor allem zu dem Zweck geschaffen, daß die zwischenstaatlichen Beziehungen in Wissenschaft, Technik, Handel usw. möglichst vereinfacht und vereinheitlicht werden. In ihm sind als Basiseinheiten festgelegt:

Tabelle 6.3
Système International (SI)

Gebiet	Basisgröße
Geometrie	Länge in m
statische Mechanik	Masse in kg
Kinematik	Zeit in s
Elektromagnetismus	elektrische Stromstärke in A
Thermodynamik	Temperatur in K
Chemie	Stoffmenge in mol
Lichtmessung	Lichtstärke in cd

Zur Vervollständigung wurden noch zwei Einheiten hinzugefügt:

ebener Winkel	rad
räumlicher Winkel	sr.

Wie auch unsere Skalen in Kapitel 3 zeigen, überstreichen die einzelnen Maßeinheiten oft einen Bereich von vielen Zehnerpotenzen. Um dennoch mit anschaulichen Zahlenwerten operieren zu können, wurden verschiedene Vorsätze in Tausender-Abstufung festgelegt, die jeweils eigene Bezeichnungen erhalten und vor die Maßeinheit gesetzt werden. Tabelle 6.4 listet diese auf.

Tabelle 6.4
Vorsätze im SI

Vorsatz	Name	Wert	Vorsatz	Name	Wert
E	Exa	10^{18}	m	Milli	10^{-3}
P	Peta	10^{15}	μ	Mikro	10^{-6}
T	Tera	10^{12}	n	Nano	10^{-9}
G	Giga	10^{9}	p	Piko	10^{-12}
M	Mega	10^{6}	f	Femto	10^{-15}
k	Kilo	10^{3}	a	Atto	10^{-18}

Lediglich für einige wenige, vor allem historisch bedingte Fälle, sind auch die folgenden Vorsätze zugelassen:

h	Hekto	10^{2}
da	Deka	10
d	Dezi	10^{-1}
c	Zenti	10^{-2}.

6.3.3 Probleme des SI

Das SI bedeutet einen gewaltigen Fortschritt für die gesamte Meßtechnik. Neben der so erreichten internationalen Vereinheitlichung ist dadurch vieles erst möglich geworden. Auch dieses Buch war eigentlich nur auf seiner Basis zu erstellen. Dennoch gibt es einige offene Fragen und Probleme.

Unklar ist insbesondere der Umgang mit einheitenfreien Meßwerten, wie sie Zählwerte, Windungszahlen, Prozent und andere Anteile, logarithmische Maßzahlen (z.B. dB, Np, Phon), aber auch Währungen darstellen. Besonders auffällig ist derzeit das Fehlen eines Informationsmaßes. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Information in unserer Gesellschaft wurden hier in Kapitel 3 deswegen auch einige Skalen mit Informationsmaßen aufgenommen. Hier steht das SI vor der Problematik, für ein neues Gebiet der Erfassung unserer Welt eine neue Einheit aufzunehmen.

Für den mechanischen Druck und die mechanische Spannung gab es vor dem SI eine Vielzahl unterschiedlicher Einheiten wie

- Kilopond je Quadratmillimeter (kp/mm^2),
- Kilopond je Quadratzentimeter (kp/cm^2),
- technische Atmosphäre (at),
- physikalische Atmosphäre (atm),
- Meter Wassersäule (mWS),
- Millimeter Wassersäule (mmWS),
- Torr.

Sie alle können durch die Einheiten Pascal (Pa) oder Newton pro Quadratmeter (N/m^2) ersetzt werden. Bei allen Vorteilen dieser Vereinheitlichung gehen aber leider auch einige Spezifika dieser zum Teil doch recht unterschiedlichen Einheiten in ihrem an-

schaulichen Bezug zum Meßproblem verloren. So erfordert auch die Ersetzung der in der Technik vor dem SI gebräuchlichen Krafteinheit Kilopond (kp) durch das Newton (N) einen erheblichen Umdenkprozeß, da das Kilopond durch seine Kopplung an die Wirkung der Erdanziehung ($1\ \text{kp} = 1\ \text{kg} \cdot g$) für die praktischen Probleme sehr anschaulich war.

Neben dem europäischen MKS-System mit den Grundeinheiten Meter, Kilopond und Sekunde existierte vor dem SI in den angloamerikanischen Staaten das ft-lb-s-System mit den Grundeinheiten Foot (ft), Pound (lb) und Sekunde sowie die dazu gebräuchlichen Maße Yard (yd) und Inch (in). Der Übergang zu den SI-Maßen ist in diesen Ländern wesentlich erschwert. Gründe dafür sind die umfangreichen Umrechnungen, die Existenz vieler Standards in den alten Systemen und der zunächst bedingte Verlust an Anschaulichkeit.

Die Energie ist eine fundamentale Größe für alle physikalischen Gebiete (vgl. auch Abb. 4.1). Sie fehlt im Gegensatz zu Fleischmanns Vorschlag bei den Basiseinheiten des SI. So wird für sie eine in der logischen Reihenfolge später liegende elektrische Einheit zur Bezugseinheit. Eine weitere Folge davon ist auch der Nachteil, daß bis heute für die Masse immer noch ein Prototyp – das Urkilogramm – als Bezugsnormal dienen muß. Allein für diese Basiseinheit konnte nämlich bisher kein unmittelbarer Bezug zu elementaren Naturgrößen gefunden werden.

Nicht immer wurde den tradierten Größen genügend Gewicht beigemessen. Ein Musterbeispiel hierfür ist der Winkel. Mit der erzwungenen Ausnahme bei den lichttechnischen Einheiten wird sich wohl rad und sr kaum jemals richtig durchsetzen. Die Winkeleinheiten Grad (°), Minute (′) und Sekunde (″) werden trotz der Namensgleichheit mit anderen Einheiten wohl noch lange – entgegen den Festsetzungen des SI – bestehen bleiben und nicht durch mrad und µrad ersetzt werden.

Die Wärmeeinheit Kalorie (cal) wird durch die betont elektrische Größe Joule (J) ersetzt. Da Kalorien im täglichen Leben eine beträchtliche Rolle bei der Nahrungsaufnahme spielten und die Umrechnung nicht trivial im Kopf erfolgen kann, treten auch hier Probleme auf.

Die Basiseinheit Kilogramm (kg) ist wegen des Vorsatzes Kilo ($k = 10^3$) unlogisch. Konsequent hätte das Gramm oder ein neuer Name für Kilogramm als Basiseinheit verwendet werden müssen. Doch gerade hier wurde der traditionellen Kontinuität der Vorzug gegeben. Bei den Skalen in Kapitel 3 wurde aber fast immer das Gramm als Bezugseinheit verwendet.

Für die magnetischen Einheiten wurde im Gegensatz zu Fleischmanns Vorschlag und den Vorschlägen anderer Autoren keine zusätzliche Basiseinheit eingeführt. Dadurch entstehen die in den Abschnitten 3.4 und 3.5 ausführlich behandelten Probleme.

Unerwartet problemlos erfolgt dagegen der Übergang bei der Temperatur, wo die Bezeichnung Grad (grd) wegfällt. Für Temperaturdifferenzen und -toleranzen dürfen dagegen – eigentlich inkonsequent – K und °C verwendet werden.

Die hier aufgeführten Probleme des SI sollen keineswegs die große Leistung schmälern, die mit der erstmaligen Schaffung eines einheitlichen Maßsystems für die ganze Welt erbracht wurden. Gerade für die Wirtschaft und die Technik hat dieses Maßsystem zu einer weiteren internationalen Vereinheitlichung geführt. Insofern stellt das SI einen Kompromiß dar, der sicherlich unter metrologischen Gesichtspunkten

und unter dem Blickwinkel des Systems der unsere Welt quantitativ beschreibenden Wissenschaften immer wieder einer Präzisierung unterzogen werden muß.

Das SI hat mit seiner globalisierenden Wirkung aber auch zu einer Globalisierung der Technik und Wirtschaft geführt, die u.a. auch zu den für uns heute akut werdenden ökologischen Problemen geführt hat. Auch sind regionale Spezifika der quantitativen Erfassung unserer Welt – die sich in regionalspezifischen Maßen und -einheiten widerspiegelten – durch das SI nivelliert worden und der Gefahr des Vergessens ausgesetzt. Es wird uns also auch bei einem so abstrakten Gebilde wie einem Maß-System die Ambivalenz der menschlichen Schöpfungen deutlich. Wir sollten eingedenk dieser Tatsache zu einem verantwortungsvollen Umgang mit den Maßeinheiten und ihren Systemen finden.

7 Die vermessene Welt

Wir haben einen Exkurs durch eine Welt voller Zahlen hinter uns gebracht. Über den historischen Werdegang der Gewinnung von Zahlenwerten und deren wechselnder Bedeutung im Leben der Menschen sind wir im Kapitel 3 zu einer strukturierten Darstellung von Zahlen gelangt, die unser heutiges Leben beeinflussen bzw. bestimmte Seiten unserer Lebensweise verdeutlichen. Bei den etwas systematischeren Überlegungen zu der Frage, wie wir zu den vielen Daten kommen, sind zwei Grundprobleme deutlich geworden:

- Was spiegelt die aus den Daten und ihren Relationen bestehende Zahlenwelt wider?
- Wie sollten wir mit der Unmenge von existierenden Daten umgehen; was heißt das für den Prozeß ihrer Gewinnung?

Diesen beiden Fragen soll zum Abschluß noch einmal nachgegangen werden. Unsere Überlegungen beanspruchen dabei keinesfalls Originalität oder Vollständigkeit. Unser Ziel ist es, Denkanstöße zu geben, die vielleicht auch noch einmal einen anderen Blick auf die Skalen des dritten Kapitels provozieren.

Die Daten, unter denen wir entsprechend unseres bisherigen Verständnisses in diesem Buch i. allg. Meßwerte verstehen wollen, spiegeln in ihrer Gesamtheit wichtige Aspekte unserer physischen Umwelt wider. Da es bestimmte Regeln gibt, nach denen die Daten gewonnen werden (Meßvorschriften), charakterisieren diese Regeln auch den Zusammenhang zwischen der Zahlenwelt und der physischen Welt. Entsprechendes muß dann auch für die existierenden Relationen zwischen den Daten innerhalb der Zahlenwerte gelten – sie reflektieren Relationen zwischen Aspekten der physischen Welt.

Die Aspekte der physischen Welt, die wir mittels Zahlen für uns darstellen, sind solche, die für uns Menschen wichtig sind. Das nicht nur, weil wir als Menschen diese Darstellung vornehmen. Vielmehr können nur Menschen zu dieser Darstellung gelangen. Folgen wir der begründbaren Auffassung, daß Zählen eine spezifisch menschliche Verhaltensweise ist (Keller 1984), so ist die Repräsentanz der physischen Welt mittels Zahlen eine typisch menschliche Leistung. Den diese Auffassung stützenden Weg vom Zählen zum Messen haben wir schon beleuchtet. Messen, Gewinnung von Daten und Darstellung der physischen Welt mittels dieser Daten ist damit eine typisch menschliche Erkenntnisform. Doch was passiert bei dieser Reduktion der Welt auf Zahlen?

Die uns umgebende Welt ist so vielfältig und hat so vielfältige – zum Teil realisierte, zum Teil mögliche – Verknüpfungen, daß wir dieses Phänomen aus der Sicht unserer Erkenntnismöglichkeit als Komplexität charakterisieren. Diese Komplexität ist durch Systembildung organisierbar. Es entstehen zusammenhängende Mengen von Elementen mit einer eminenten Beschränkung der Verknüpfungskapazität. Nicht jedes Element ist jederzeit mit jedem verknüpft. Komplexität führt so zu Selektionszwang. Selek-

tionszwang heißt Kontingenz und diese heißt Risiko. Das bedeutet für die organisierte Komplexität, die Möglichkeiten des Anders-Seins sich im Sinne der Risikominimierung weitgehend offenzuhalten. Organisierte Komplexität bringt systemische Strukturen hervor. Diese bedeuten einerseits Reduktion der Komplexität, führen aber andererseits auch erst zur Komplexität der Welt. Die Umwelt einer systemischen Struktur ist daher komplexer als sie selbst. Daraus resultiert die Notwendigkeit für diese Struktur, sich systemadäquat einzurichten. Neben dieser äußeren Anpassung muß sich eine entstehende komplexe systemische Struktur aber auch an ihre eigene Komplexität anpassen. Selektion kann so zu einem Ordnungsbegriff werden. Differenzen determinieren dann nicht was, wohl aber wie selektiert wird.

Erkenntnistheoretisch stellt sich uns die Frage, wie wir mit unseren anthropomorphen Voraussetzungen in der Lage sind, diese Situation zu bewältigen. Auch der Mensch kann in dem hier gebrauchten allgemeinen Sinn als eine systemische Struktur betrachtet werden, die allerdings viel komplexer als die anderen uns bekannten Strukturen ist. Dieser Mensch steht ebenfalls vor dem Problem, sich in der komplexen Umwelt adäquat einzurichten (auf Erkenntnis unserer Umwelt beruhendes Verhalten) bzw. sich an seine eigene Komplexität anzupassen (Verhalten gemäß den Erkenntnissen der Humanwissenschaften, wie z.B. Medizin, Psychologie, Soziologie etc.). Neben diesem, auf rationale Bewältigung der umgebenden Komplexität ausgerichteten Aspekt, hat der Mensch allerdings auch noch andere Möglichkeiten der Bewältigung. Diese äußern sich z.B. in seiner Fähigkeit, ganzheitlich zu erfahren und auch zu handeln. Außerdem wird sein rationales Erkennen und Handeln immer durch seine Leiblichkeit beeinflußt (wenn auch z.B. die modernen Naturwissenschaften diesen Aspekt ausblenden – ihr Erfolg beruht gerade auf dieser als Entsubjektivierung (Objektivierung) verstandenen Ausblendung). Diese verschiedenen qualitativen Dimensionen der Bezüglichkeit des Menschen zu seiner Umgebung ist auch Ausdruck seiner enormen Komplexität. Wir wollen hier aber unter dem Gesichtspunkt der Widerspiegelung der physischen Welt mittels der Zahlenwelt uns im weiteren auf den rationalen Aspekt der Komplexitätsbewältigung beschränken.

Die rationale Betrachtung aller möglichen Verknüpfungen ist eine unfaßbare Komplexität. Sie ist daher auch ein Maß für Unbestimmtheit und Mangel an Information. Durch Strukturierung der Komplexität wird eine Reduktion derselben erreicht. Das geschieht genau dann, wenn das betrachtete Relationsgefüge durch einen Zusammenhang mit weniger Relationen rekonstruierbar ist. Dieser Prozeß läuft über die Klassenbildung zur Modellbildung. Die Klassenbildung eliminiert aus der Gesamtzahl der Eigenschaften von Objekten gerade so viele, daß die Modellbildung für die verbleibenden einfache, durchschaubare und möglichst wenige Relationen findet, die den betreffenden Teil der Wirklichkeit unter dem betrachteten Gesichtspunkt möglichst adäquat widerspiegeln. Diese Reduktion der Komplexität bewirkt das Auftreten von Ungenauigkeiten und Unschärfen, denn sie hat immer etwas mit dem „Wegschneiden" anderer wichtiger Aspekte des Objektes zu tun („Ockhamsches Rasiermesser"). Die Reduktion stellt gleichzeitig eine Beseitigung von Redundanz dar. Bei der Reduktion findet ein Übergang von der Möglichkeit zur Wirklichkeit statt und es wird jedesmal von der Fülle der Möglichkeiten genau eine zur Wirklichkeit. Die anderen Möglichkeiten waren unter dem betrachteten Gesichtspunkt redundant. Damit wird die unbestimmte,

unscharfe Zukunft genau um diesen Punkt konkreter, aus informationstheoretischer Sicht wird Unbestimmtheit beseitigt.

Komplexität reduzierende Prozesse haben somit etwas mit Informationsentstehung, Redundanzverminderung und Unschärfen zu tun. Die Gewinnung von Information über ein Objekt schneidet redundante Informationen bzw. Informationsgewinnungswege weg. Zunehmende Genauigkeit der Daten zu einem Aspekt des Objektes führt zu größeren Ungenauigkeiten bei anderen Aspekten. Einbeziehung vielfältigerer Aspekte (weniger reduzierte Komplexität) führt zu Unschärfen beim interessierenden Aspekt.[1]

Der hier beschriebene Prozeß ist genau die Grundlage für die Existenz der Naturwissenschaften. Diese gibt es, weil die Natur in vielen Fällen als algorithmisch komprimierbar betrachtet wird. Die Naturgesetze, die i. allg. in mathematischen Formeln ausgedrückt werden, sind die ökonomische Komprimierung von Informationen darüber, wie sich unsere Welt verhält. Diese ökonomische Komprimierung (oder Reduktion von Komplexität) ist das, was wir intellektuelle Erfassung der Welt nennen. Der Grund für die Nützlichkeit der Mathematik bei dieser Beschreibung der Welt liegt darin begründet, daß die physische Welt zumindest in einem Teilbereich algorithmisch komprimierbar zu sein scheint. Wir sind es gewohnt[2], intellektuell algorithmisch zu komprimieren. Obwohl unsere Sinneseindrücke fast immer ganzheitlich sind, können wir komplexe Folgen von Sinneseindrücken in verkürzter Form komprimieren. Diese Verkürzungen ermöglichen Erinnerungsvermögen und Denken. Gleichzeitig schützen sie uns vor einer Informationsüberlastung seitens der Welt und stellen den Versuch dar, wie wir uns als Teil der Welt in deren Komplexität adäquat anpassen.

Unter diesem Blickwinkel stellt die Messung mit der Gewinnung von Meßwerten eine enorme Reduktion der Komplexität eines Objektes dar – nämlich auf einen einzigen Meßwert. Über diesen reduzierten Aspekt des Objektes erhalten wir als Information eine Zahl hoher Genauigkeit. Mit dieser Reduktion entsteht ein *qualitativer* Fehler bei der Beschreibung des Objektes. Die im Abschnitt 6.1.3 betrachteten Meßfehler sind hingegen *quantitative* Fehler innerhalb der selben Qualität. Inwieweit auch sie ein Ausdruck des qualitativen Fehlers sein können (indem existierende Zusammenhänge ausgeblendet werden, die dann als systematische oder zufällige Fehler in Erscheinung treten), bedarf weiterer Untersuchungen.

---

[1] In der Mikrophysik ist dieser Sachverhalt durch die Heisenbergsche Unschärferelation ausgedrückt. Die Makrophysik geht normalerweise davon aus, daß jeder beliebige Aspekt eines Objektes gleichzeitig mit den anderen beliebig genau erfaßbar ist. Trotzdem bleibt unsere Aussage richtig, weil es eine Grenze gibt, ab der wir offensichtlich die beliebig genau bestimmten Aspekte und ihre Zusammenhänge nicht mehr exakt zu erfassen vermögen. Der Schwerpunkt liegt hier dabei auf den Zusammenhängen. Sie sind einerseits wesentlich (was nützt ein zusammenhangloses Nebeneinanderstellen genau bestimmter Aspekte eines Objekts für sein Verständnis), werden aber gerade in der makrophysikalischen Betrachtung der Aspekte eines Objektes i. allg. vernachlässigt. Die disziplinäre (physikalische, chemische, biologische ...) Betrachtung von Naturvorgängen ist dafür beispielhaft. Unter verschiedenen Gesichtspunkten werden unterschiedliche Aspekte des Vorgangs betrachtet – für unser Leben ist aber der Vorgang in seiner Gesamtheit (ganzheitlich) entscheidend.

[2] Diese Gewöhnung wird von manchen Autoren auch als stammesgeschichtlicher (evolutiver) „Lerneffekt" verstanden. So sind diese unsere Fähigkeiten nach der evolutionären Erkenntnistheorie für das Individuum ein erkenntnistheoretisches a priori, während sie für die Menschheit ein evolutionäres a posteriori sind (vgl. z.B. Vollmer 1983; auch Barrow 1993 fußt wohl z.T. auf dieser Annahme, ohne sie explizit zu nennen).

Auf diese Weise ist im Verlauf der Menschheitsgeschichte eine riesige Menge von Daten in Form von Zahlen (mit Maßeinheiten) angehäuft worden. Um diese Menge zu strukturieren, ist wiederum in dieser Zahlenwelt eine Komplexitätsreduktion vorzunehmen. Das Ziel ist auch hier das Auffinden weniger, charakteristischer Relationen zwischen den Zahlen. Da die Zahlen die Objekte der Mathematik sind, sollte diese passende Relationen zur Verfügung stellen. Die möglichen Relationen hängen dabei von der Art der Datenerfassung ab, die den Skalentyp determiniert, welcher wiederum die zulässige Mathematik zur Widerspiegelung der Datenzusammenhänge bestimmt. Die verwendete Mathematik zur Komplexitätsreduktion der Zahlenwelt spiegelt somit auch die Art der Gewinnung und Darstellung der jeweiligen Daten wider. Andererseits gehen spezielle Genauigkeiten einzelner Daten bei der Betrachtungsweise der Relationen zwischen ihnen verloren – es geht um wesentliche Aspekte. Ausdruck dafür ist die in der Physik oft anzutreffende Betrachtung von Größenordnungen. Die Skalen in Kapitel 3 wollen auch dazu auffordern.

Andererseits hat die Wissenschaftsgeschichte gezeigt, daß eine Anhäufung von Daten und ihre mathematische Verarbeitung alleine nicht zu neuen Erkenntnissen führt. Hierzu ist „theoretische Innovation" notwendig, die zu einem neuen Begriffsinventar und damit entwickelbarer theoretischer Voraussetzungen führt. Diese können dann anhand vorhandener Daten oder mittels durch gezielte Experimente neu gewonnener Daten überprüft werden. Vor diesem Problem stehen alle die Versuche, mittels noch so ausgefeilter rechentechnischer Verfahren der Verarbeitung von Daten, die zu Komplexitätsreduktionen führen, neue Aussagen über unsere physische Welt zu gewinnen (z.B. auch Computerexperimente). An irgendeiner Stelle muß eine innovative Idee in diesen Prozeß einfließen.[3] Darum haben wir uns u.a. auch der Interpretation der durch die Skalen naheliegenden Relationen zwischen den dort aufgetragenen Daten aus den unterschiedlichsten Bereichen unserer Welt enthalten. Je nach den Erfahrungen, dem Vorwissen und den Intentionen des einzelnen Lesers oder der Leserin werden sich ganz unterschiedliche Anregungen einstellen, um bestimmte Zusammenhänge neu oder unter anderen Gesichtspunkten zu betrachten.

Diese komplexe Dimension der Zahlenwelt und der Umgang damit leitet zu unserer zweiten grundlegenden Frage über – dem verantwortungsbewußten Umgang mit den Zahlen. Wir hatten festgestellt, daß die Gewinnung von Daten eine enorme Komplexitätsreduzierung unserer Wirklichkeit bedeutet – nämlich auf den jeweils quantitativ erfaßbaren Aspekt. Diese Reduktion geht gleichzeitig mit einer hohen Genauigkeit der Erfassung des jeweiligen quantitativen Aspekts einher. Die gewonnene Zahl ermöglicht weiterhin eine mathematische Verarbeitung (ohne daß dabei schon etwas über die Sinnhaftigkeit derselben ausgesagt ist). Da diese Aspekte für den naturwissenschaftlich-technischen Teil unserer Welt von großer Bedeutung sind, hat mit zunehmender Bedeutung von Naturwissenschaft und Technik im Leben der Menschen die Komplexitätsreduktion auf quantitative Aspekte unserer Welt eine paradigmatische Funktion bekommen.

---

[3] Vgl. dazu u.a. Rompe/Treder 1985.

Das hat mittlerweile zu einer wiederum sehr komplexen Zahlenwelt geführt. Vielfach wird schon der ambivalente Charakter dieses Vorgehens bemerkt, wenn z.B. eine Ökologie des Umgangs mit Daten (oder allgemeiner mit Informationen) gefordert wird. Auch in der Politikberatung auf dem Feld Umwelt und Technik ist z.B. durch die entsprechenden Enquet-Kommissionen des Deutschen Bundestages ungeheures Datenmaterial durch Expertisen angehäuft worden. Zunehmend ist zu verzeichnen, daß daraus keine politischen Entscheidungen mehr ableitbar sind (welcher Abgeordnete kann einen Bericht von 1500 Seiten lesen?), Vierecke spricht von einer „Havarie im Datenmeer"[4]. Die Dominanz der Naturwissenschaftler und Ingenieure in solchen Kommissionen führt zu dieser quantitativen Komplexitätsreduktion, die ihrerseits aber wieder die Diskussion über (notwendig komplexe) Leitbilder verhindert. Hier finden wir eine kontraproduktive Seite der immer weiteren Gewinnung von immer genaueren Daten.

Andererseits hat der Erfolg dieser Methode dazu geführt, immer mehr Aspekte unserer Welt und unseres Lebens mittels quantitativer Größen zu beschreiben. Der Entwicklungsstand einer Gesellschaft wird z.B. am Bruttosozialprodukt gemessen.

Auch die ökologischen Probleme müssen in die quantifizierbare Sprache transformiert werden. Die Folge sind Verfahren zur monetären Bewertung von Umwelteinflüssen bzw. zur monetären Bewertung einer intakten Umwelt. Hier wird über eine repräsentative Befragung erhoben, wieviel die betroffenen Menschen (fiktiv) bereit wären, für eine intakte Umwelt zu zahlen (Nutzen-Kosten-Analysen, kontingente Evaluierung). Dem – qualitativen – Wert „intakte Umwelt" (was immer das im Einzelfall heißen mag) wird ein – quantitativer – Geldwert zugeordnet. Erst dann ist das Problem innerhalb unserer Gesellschaftsstrukturen einordenbar. Analog ist der Versuch zu bewerten, für den Umweltverbrauch eines Produktes ein neues Maß zu finden – die MIPS (*M*aterial-*I*ntensität *P*ro *S*erviceeinheit).[5] Hier wird Umwelt auf ihren quantitativen Ressourcenaspekt reduziert. Es liegt die Vermutung nahe, daß bei einer solchen Quantifizierung der Weg bis zu Grenzwerten nicht mehr weit ist. Auf die Ambivalenz derselben haben wir schon aufmerksam gemacht.

Was hat uns nun der historische und der analytische Weg durch die Welt der Zahlen gelehrt? Es ist unbestreitbar, daß das Beherrschen der Komplexitätsreduktion unserer Welt auf den quantitativen Aspekt mittels der Messung einen enormen Meilenstein in der Menschheitsgeschichte darstellt. Dadurch sind Natur- und Technikwissenschaften möglich geworden. Eine Systematisierung dieser Daten u.a. durch Maßsysteme bis hin zum heutigen SI hat weitere Entwicklungen ermöglicht. Letztlich hat das SI wesentlich zur Globalisierung unseres Lebens beigetragen.

Doch dieser Erfolg hat paradigmatisch zu Anwendungen der quantitativen Beschreibung geführt, bei denen nicht von vornherein klar ist, ob die Komplexitätsreduktion auf die quantitativen Daten die für diesen Bereich adäquate ist. Wir haben an verschiedenen Stellen darauf hingewiesen, daß bestimmte qualitative Aspekte unserer Welt nicht einfach quantifizierbar sind. Diese Spannung zwischen Qualitäten und

[4] Vgl. Vierecke 1995.
[5] Vgl. Schmidt-Bleek 1994, S. 95ff.

Quantitäten in unserer Welt bewegt die Philosophie und die gesamte Wissenschaft im Verlauf ihrer Geschichte und sie ist nicht durch einen einfachen Quantitäts-Qualitäts-Sprung auflösbar.

Da mit Zahlen im täglichen Leben auch Machtpositionen verteidigt oder erobert werden (weil die Aussage der Zahlen angeblich objektiv und nicht bezweifelbar ist), sollten wir einen bewußteren Umgang mit Zahlen anstreben. Es müssen immer die Entstehungsbedingungen dazu bekannt sein und es muß immer wieder gefragt werden, ob die Zahlen das Wesentliche des betrachteten Objektes oder Prozesses wiedergeben. So sei hier nur an die geschickt graphisch aufbereiteten Zahlen für die Nachrichten über den Golfkrieg 1993 erinnert. Mit der graphischen Versachlichung und vorgenommenen Kompaktifizierung waren Details verschwunden und die Komplexität des Vorgangs „Krieg" auf eine Verarbeitung von Daten reduziert. Das für den einzelnen Menschen grausame Wesen dieses Krieges war bei dieser Reduktion ausgeblendet. Die Gefahr besteht, diese durch quantitative Informationen aufgebaute Welt als Realität hinzunehmen und in ihr zu leben – d.h., sie nicht mehr als Abbild zu begreifen. Selbst der „Schöpfer" dieser Welt, der die Vorstellung hat, damit Macht über die anderen Menschen auszuüben, verliert diese Macht und wird „Opfer" seiner Schöpfung, denn den Entstehungszusammenhang und die Konstruktion der Daten kennt schließlich niemand mehr.

Wir leben in einer Welt, die zunehmend vermessen und mittels quantitativer Daten gesteuert wird. Das Ziel der Quantifizierung liegt darin, die mögliche quantitative Nutzung des Objektes oder Prozesses für den Menschen abzuschätzen. Es ist fraglich, ob das allein die Basis für weitere Entwicklungen auf diesem Planeten sein kann. Man könnte aus unserer historischen Erfahrung heraus auch umgekehrt sagen, daß ein Gut, was nicht vollständig vermessen ist, nicht knapp werden kann. Wir hoffen auf einen verantwortungsbewußten, kritischen Umgang mit den Zahlen der vermessenen Welt. Wir sehen auch die der geschaffenen Zahlenwelt inneliegende Potenz zu neuen Erkenntnissen. Dafür müssen wir uns in der Zahlenwelt mit wachen Sinnen bewegen und neue Ideen mit hineinnehmen, die wir aus anderen „Welten" herüberholen.

Wichtige Konstanten

absoluter Nullpunkt	$T_0 = -273{,}15\ ^{\circ}C$
Avogadro-Konstante (früher Loschmidt-Zahl)	$N_A = 6{,}0221367 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$
Avogadro-Konstante (alt)	$A = 2{,}68699 \cdot 10^{25}\ m^{-3}$
Bohrscher Radius	$r_B = 5{,}29177249 \cdot 10^{-11}\ m$
Bohrsches Magneton	$\mu_B = 9{,}274078 \cdot 10^{-24}\ Am^2$
Boltzmann-Konstante	$k_B = 1{,}38065812 \cdot 10^{-23}\ JK^{-1}$
Compton-Wellenlänge des Elektrons	$\lambda_e = 2{,}426 \cdot 10^{-12}\ m$
dielektrische Konstante	$\varepsilon_0 = 8{,}85418782 \cdot 10^{-12}\ Fm^{-1}$
elektrochemisches Äquivalent	$1\ g/Ah = 3{,}6 \cdot 10^{-3}\ g/As$
Elementarladung	$e_0 = 1{,}60217733 \cdot 10^{-19}\ C$
Energie des Elektrons (Ruhmasse)	$W_0 = 81{,}872 \cdot 10^{-15}\ Ws$
Energie des Protons (Ruhmasse)	$W_p = 1{,}5033 \cdot 10^{-10}\ Ws$
Erdbeschleunigung	$g = 9{,}80665\ ms^{-2}$
Faraday-Konstante	$F = 9{,}6485309 \cdot 10^{3}\ Cmol^{-1}$
Flußquant	$h/2e = 2{,}0678345 \cdot 10^{15}\ Vs^{-1}$
Gaskonstante	$R_0 = 8{,}314510\ JK^{-1}mol^{-1}$
Gravitationskonstante	$G = 6{,}6725985 \cdot 10^{-5}\ Nm^2g^{-2}$
Josephson-Verhältnis	$v = 4{,}835939 \cdot 10^{14}\ HzV^{-1}$
Kernmagneton	$\mu_N = 5{,}05078661 \cdot 10^{-27}\ JT^{-1}$
klassischer Atomradius	$r_{klass} = 2{,}82 \cdot 10^{-15}\ m$
Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum)	$c_0 = 2{,}99792457 \cdot 10^{8}\ ms^{-1}$
Massenverhältnis (Proton/Elektron)	$m_p/m_e = 1{,}83610 \cdot 10^{3}$
molares Normvolumen (ideales Gas)	$V_{mol,\,N} = 2{,}241383 \cdot 10^{-2}\ m^3mol^{-1}$
Molvolumen	$V_{mol} = 2{,}241 \cdot 10^{-2}\ m^3$
Permeabilitätskonstante	$\mu_0 = 1{,}25663706 \cdot 10^{-6}\ Hm^{-1}$
Planck-1. Strahlungskonstante	$c_1 = 3{,}74177492 \cdot 10^{-16}\ W$
Planck-2. Strahlungskonstante	$c_2 = 0{,}01438769\ Km$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6{,}62607554 \cdot 10^{-34}\ Js$
relative Atommasse (Bezug auf ^{12}C)	$m_r = 1{,}0008$
Ruhmasse des Elektrons	$m_e = 9{,}10938975 \cdot 10^{-28}\ g$
Ruhmasse des Neutrons	$m_n = 1{,}67492861 \cdot 10^{-24}\ g$
Ruhmasse des Protons	$m_p = 1{,}67262311 \cdot 10^{-24}\ g$
Ruhmasse des Wasserstoffatoms	$m_H = 1{,}6735 \cdot 10^{-24} g$
Rydberg-Frequenz	$R = 3{,}28984195 \cdot 10^{15}\ Hz$
Rydberg-Konstante	$R_\infty = 1{,}09737315 \cdot 10^{7}\ m^{-1}$

Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante	$\alpha = 7{,}29735308 \cdot 10^{-3}$
spezifische Ladung	$e_0/m_e = 1{,}758820 \cdot 10^{8}\ \mathrm{Cg^{-1}}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma = 5{,}6705119 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$
Quanten-Hall-Widerstand (h/e_0^2)	$R_H = 2{,}58128056 \cdot 10^{5}\ \Omega$
Wellenwiderstand des Vakuums	$Z_0 = 376{,}730313\ \Omega$
Wiensche Konstante	$b = 2{,}8978 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{Km}$
Zeeman-Aufspaltungskonstante	$z = 4{,}6685987 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{Asm^{-1}g^{-1}}$

Literatur

Die Literatur enthält nicht alle Quellen für die Daten. Diese stammen z.T. aus Einzelmitteilungen in Publikationen, Berichten usw. und mußten darüber hinaus oft umgerechnet und für die Skalen verdichtet werden. Inhaltlich wichtige Quellen sind in der folgende Zusammenstellung enthalten.

Angerstein, W.: Lexikon der radiologischen Technik in der Medizin. 2. Aufl. – Leipzig: Georg Thieme, 1975

Ardenne, M.v.: Tabellen zur Angewandten Physik. 3 Bd. – Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1973

Ardenne, M.v.; Musiol, G.; Reball, S. (Hrsg.): Effekte der Physik und ihre Anwendungen. – Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1988

Bailey, A.: Units, Standards and Constants. In: Twentieth Century Physics. Vol. II. Ed. by L.M.Brown, A.Pais, Sir B. Pippard. – Bristol and Philadelphie: Institute of Physics Publishing and New York: American Institute of Physics Press, 1995.

Barrow, J.D.: Warum die Welt mathematisch ist. – Frankfurt/Main: Campus Verlag, 1993 (Edition Pandora, Bd. 19).

Barrow, J.D.: Ein Himmel voller Zahlen. – Heidelberg/Berlin/Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 1994

Barrow, J.D.: Theorien für Alles – Die philosophischen Ansätze der modernen Physik. – Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1992

Beilsteins Handbuch der Organischen Chemie. – Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, seit 1918

Bender, D.; Pippig, E.: Einheiten, Maßsysteme, SI. – Berlin: Akademie-Verlag, 1973

Blinkow, S.M.; Gleser, I.I.: Das Zentralnervensystem in Zahlen und Tabellen. – Jena: G.Fischer, 1968

Böhme, G.: Am Ende des Baconschen Zeitalters. – Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 1993 (stw 1094)

Breuer, H.: dtv-Atlas zur Physik, Tafeln und Texte. Bd. 1 + 2. – München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1988

Cahan, D.: Meister der Messung. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt und der Aufstieg der physikalischen Institute in Deutschland 1865–1918. – Weinheim: VCH, 1991

Changeux, J.-P.; Connes, A.: Gedanken-Materie. – Berlin u.a.: Springer-Verlag, 1992

Clark, R.B.: Kranke Meere? Verschmutzungen und ihre Folgen. – Heidelberg/Berlin/ New York: Spektrum Akademischer Verlag, 1993

Dörschel, B; Schuricht, V.; Steuer, J.: Praktische Strahlenschutzphysik. – Heidelberg/Berlin/New York: Spektrum Akademischer Verlag, 1992

Encyclopedia of Applied Physics. Ed. by G.L.Trigg, E.H. Immergut. 21 vols. – New York: VCH Publishers Inc., 1991ff.

Eder, F.X.: Moderne Meßmethoden der Physik. – Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften. Teil 1: Mechanik, Akustik, 1968. Teil 2: Thermodynamik, 1956. Teil 3: Elektrophysik, 1972.

Feitscher, W.: Graphische und tabellarische Wissensspeicher. – Berlin: Zentralinstitut für Information und Dokumentation, 1967

Fischer, R.; Padelt, E.; Schindler, H.: Physikalisch-technische Einheiten richtig angewandt. – Berlin: Verlag Technik, 1975

Fleischmann, R.: Struktur des physikalischen Begriffssystems. Zeitschr. für Physik **129** (1951), S. 377 – 400

Flindt, R.: Biologie in Zahlen. – Stuttgart/New York: Gustav Fischer Verlag, 1988

Fritsch, B.: Mensch – Umwelt – Wissen. 2. Aufl. – Stuttgart: B.G. Teubner, 1991

Gmelin: Handbuch der Anorganischen Chemie. – Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag

Hellemans, A.; Bunch, B.: Fahrplan der Naturwissenschaften. Ein chronologischer Überblick. – München: Droemersche Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf., 1990

Hellweg, G.: Lexikon der Maße, Währungen und Gewichte. – München: Orbis Verlag, 1990

Henschler, D.: Gesundheitsgefährdung durch schädliche Stoffe: Grenzwerte als Instrument der Risikobewältigung. In: Wissenschaft in der globalen Herausforderung. Hrsg. H. Markl u.a. – Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1995

Hey, T.; Walters, P.: Quantenuniversum. – Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1990

Hoffmann, D.: Handbuch der Meßtechnik und Qualitätssicherung. – Berlin: Verlag Technik, 1979

Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. 29. Aufl. – Berlin u.a.: Springer-Verlag, 1989

Jürss, F. u.a.: Geschichte des wissenschaftlichen Denkens im Altertum. – Berlin: Akademie-Verlag, 1982

Keller, O.-H.: Das Zählen als angeborene Verhaltensweise. – Berlin: Akademie-Verlag, 1984 (Sitzungsberichte des Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathem.-naturwiss. Klasse, Bd. 117, Heft 5).

Kern, U.: Forschung und Präzisionsmessung. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zwischen 1918 und 1948. – Weinheim: VCH, 1993.

Köcher, E.; Kriester, A.: Radiologische Technik in der Röntgendiagnostik und Strahlentherapie. – Berlin: Verlag Volk und Welt, 1982 [# ? #]

Kochsiek, M.; Gläser, M.: Massebestimmung. – Weinheim: VCH, 1996

Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. 13. Aufl. – Leipzig - Köln: Fachbuchverlag, 1991

Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik. Data and Functional Relationships in Science and Technology. Neue Serie – New Series. – Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag

Lanius, K.: Mikrokosmos – Makrokosmos. – Leipzig: Urania-Verlag, 1988

Lederman, L.M.; Schramm, D.N.: Vom Quark zum Kosmos. – Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 1990

Lindner, H.: Grundriß der Atom- und Kernphysik. – Leipzig: Fachbuch-Verlag, 1963

Meadows, D. u.a.: Die Grenzen des Wachstums. – Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 1972

Mende, D.; Simon, G.: Physik – Gleichungen und Tabellen. 6. Aufl. – Leipzig: Fachbuchverlag, 1976

Morrison, Ph.; Eames, Ch.: Zehn-Hoch. Dimensionen zwischen Quarks und Galaxien. – Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1985

Nündel, S.; Rothe, H.: Das Internationale Einheitensystem (SI) und seine Anwendung. – Berlin: Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft Nr. 72, 1979

Oberdorfer, G.: Das System Internationaler Einheiten SI, Standort in der Größenlehre. – Wien/New York: Springer Verlag, 1977

Omm, P.: Messkunst ordnet die Welt. Eine Geschichte des Messens und der Meßgeräte – Buchschlag bei Frankfurt/M.: Impuls-Verlag, 1958

Padelt, E.: Menschen messen Zeit und Raum. – Berlin: Verlag Technik, 1971

Padelt, E.; Laporte, H.: Einheiten und Größenarten der Naturwissenschaften. 2. Aufl. – Leipzig: Fachbuchverlag, 1967

Reichardt, W.: Gleichungen in Naturwissenschaft und Technik – Größen und Einheiten richtig angewandt. – Leipzig: Fachbuchverlag, 1983

Richter, M.: Einführung in die Farbmetrik. 2. Aufl. – Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1981

Rompe, R.; Treder, H.-J.: Zählen und Messen. – Berlin: Akademie-Verlag, 1985

Rucker, R.: Der Ozean der Wahrheit – Über die logische Tiefe der Welt. – Frankfurt/M.: Fischer Logo, 1990

Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS – Das Maß für ökologisches Wirtschaften. – Berlin/Basel/Boston: Birkhäuser Verlag 1994

Springer, G. (Hrsg.): Größen, Formelzeichen, Einheiten in Naturwissenschaft und Technik. – Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 1991 (Bibliothek des Technikers)

Trapp, W.: Kleines Handbuch der Maße, Zahlen, Gewichte und der Zeitrechnung. – Stuttgart: Philipp Reclam jun., 1992

Vierecke, A.: Die Technik- und Umwelt-Enquêten des Deutschen Bundestages: Vermessene Zukunft – vertane Zeit. In: Jahrbuch Ökologie 1996. Hrsg. G.Altner u.a. – München: C.H.Beck 1995

Vollmer, G.: Evolutionäre Erkenntnistheorie. – Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1983

Völz, H.: Elektronik. 5. Aufl. – Berlin: Akademie Verlag, 1989

Völz, H.: Grundlagen der Information. – Berlin: Akademie Verlag, 1993

Völz, H.: Information I – Berlin: Akademie Verlag, 1982

Völz, H.: Information II – Berlin: Akademie Verlag, 1983

Völz, H.: Information verstehen. – Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 1994

Völz, H.: Informationsspeicher. Grundlagen – Funktionen – Geräte. – Renningen – Malmsheim: expert verlag, 1996

Wallot, J.: Größengleichungen, Einheiten und Dimensionen. – Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1957

Westphal, W.H.: Die Grundlagen des physikalischen Begriffssystems. Physikalische Größen und Einheiten. – Braunschweig: Friedr. Vieweg + Sohn, 1971

Wiedemann, Chr.: Das Weltall, 3. Aufl. – Leipzig: Urania-Verlag, 1973

Wissenschaft und Technik im alten China. Herausgegeben vom Institut für Geschichte der Naturwissenschaften der Chinesischen Akademie der Wissenschaften. – Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser Verlag, 1989

Namen- und Sachverzeichnis

Die **fetten** Seitenzahlen beziehen sich auf Stichworte in den Skalen, die anderen auf solche im Text. Die Namen sind hier in KAPITÄLCHEN gesetzt, um Verwechslungen mit den wortgleichen Einheitenbezeichnungen zu vermeiden.

A

A-Alpha-Faser **47**
A0-Bogen 30, **31**
A4-Blatt 30, **31, 195**
Abakus **201**
Abelsche Gruppe 272
Ablagerung von Tiefsee-Sedimenten **47**
ABRAHAM BEN EZRA 10
Abrieb **47**
absolute Skala 268
Absorption 216
Abstrahlung **75**
Abstraktion 254
Abwasser **61**
abzählbar 244
Aceton **93, 159**
Acetylen **93, 111**
Achilles-Schildkröte 46
Ackerboden **185**
acre 30
Adaption
  Auge 166
Adjektiv 256
Adlerauge **209**
AE 225
Aerosol **61**
affin 268
Agrargesellschaft **73**
Ah **119**
Ähnlichkeitstransformation 269
Akku 62, **79**, 86, **87, 89**, 120, **215**
  ortsfester **119, 123**
  Anlage **119, 123**
Akkumulation **37**
Aktionspotentiale **105**
Aktivierungsdetektor **187**
Aktivierungsenergie 94
Aktivität 182ff, **183**, 239
  bei Vögeln **135**
  Fusionsreaktor **183**
  spezifische 184ff, **185**
Akzeptanz 284
A_L-Wert 132, 140
Al_2O_3 89, **117, 125, 155**
  -Keramik **155**
Alarmsirene **213**
Albedo **215**, 216
ALBERTUS MAGNUS 126
Alge **193**
Algebra 247
Algorithmus 216
Alkali **87**
Alkoholgehalt 62
All **219**
Alltagsverhalten 250
Alltagswelt **63**
AlNiCo **135, 143**
AlP^- **111**
Alpha-Strahlen 178f, 191
Alpha-Strahler **183, 185**
Alphabet 243
Alter
  der Erde **37**
  der Welt **37**
Aluminium (Al) **47, 61, 69, 89, 93, 149, 155, 159, 215**
  Schmelzöfen **99**
AM (Amplitudenmodulation) **201**
Am **183**
Aminosäure **47, 219**
Ammoniak **93, 159**
Ampere 97ff, 221, 232, 233, 264, 272
AMPÈRE, ANDRÉ MARIE 97
Amperewindung 132
Amplitude 98
Amplitudenstufe 202
Analogie
  elektrische/magnetische Größen 132
Anders-Sein 278
Änderung im Blutbild **193**
Anfahren **51**

von Zügen **51**
Anfangspermeabilität 144f
Angemessenheit 270
Angström 27, 225
Anilin **93**
Annaberg **185**
Anregung **43**
anschaulich **219**
anschaulicher Zahlenbereich 217f, 246, 250
Antennenspannung **105**, 107
Antiferromagnetismus 130
Antimon (Sb) **93**
Aorta **47**
Apollokapsel **209**
Apostilb 166, 237
Apothekerwesen 58
Äquator **51**
Äquivalent **81**
Äquivalentdosis 191ff, **193**, 239
Ar 15, 30, **219**, 225
Aräometer 62
Arbeit 71, 80, **215**, 221, 229, 231, 233
experimentelle 220
grobe, feine usw. **171**
Arbeits
-ellipse 144
-platz **109**
Beleuchtung 170, **171**
zugelassene Felder **135**
-schutz 106, 266
-verrichtung 216
ARCHIMEDES 32, 62, 250
Archiv 206
Argon (Ar) **69, 159**
ARISTOTELES 46
Arithmetik
binäre 247
Arithnomane 244
Armbanduhr **99**
Arrhenius **93**
-Gleichung 94
Arsen (As) **93**
ASA-Filmempfindlichkeit 170, 172
asb 237
Asbest **155**
AsP^- **111**
Assimilation **37**
Asteroiden **55**
Ästhetik 204
Astronomie 208, 216
at 70, 229
Atlanten **31**
atm **69**, 70, 229, 274
Atmosphäre **55, 61**, 70, 274
Atmungsluft **53**
Atom **25, 31, 33, 37, 81, 219**
Bombe **81**, 83, **167**, 177,
Versuche 184
Explosion **69**, 168
Gewicht 146
Kern **25, 31, 37**
Kraftwerk **183**
Modell 127
Reaktor **79**
Versuche **185, 193**
Ätzen
chemisches **47**
Audiokassette **203**
Aufdampfen **47**
Aufladung eines Menschen **105, 119**
Auflösung **25**, 208, **209**
Auftrieb 62
Aufzählung 268
Auge **25, 73**, 84, **85**
Grenze beim Sehen **167**
menschliches **209**
Empfindlichkeit 163
Empfindlichkeitskurve 162f
Ausfallrate 188
Ausgleichsrechnung 265
Auslösezählrohr 190
Ausprägung 256, 260
Ausprägungsgrad 260
Aussage 256
Aussagenlogik 247
Außerirdische **75**
Austauschzeiten **37**
Australien **31**
australischer Baum **37**
Auswirkung von Strahlung **193**
Auto **73**
Akku **119, 123**
Motor **79**
Scheinwerfer **161**
Avogadro-Konstante 158
Axiomatisierung 247

B

Ba-Ferrit **135**
Bäckerhefe **79**
Bad Gastein **193**
Baden **193**
Badestrand Guapari bei Rio **193**
Bahndurchmesser **25**
Bahnen **105, 139**
Baikalsee **31**

Bakelit **125**
Bakterium **25, 55, 195**
Balkenwaage 56
ballistisches
  Meßgerät 120
  Voltmeter 138
Ballon **25**
Bambustrieb **47**
Bananenblüte **47**
Bandbreite 200
Bandgenerator **99, 105**, 107, 178
Bandzug **67**
bar **69**, 70, 229
barel 34
Bark 44
BARKHAUSEN, HEINRICH 211
Barn 30
Barometer 68
Barsch **79**
Basic-Englisch **219**
Basiseinheit 220f, 258, 271
Basisgröße 19
Basissystem des SI 20
$BaTiO_3$ **125**
Batterie **73, 79**, 86, **89, 103, 105, 119**, 120, **123**
  Betrieb 106
Baud 200, 241
Bauelement
  elektrische Strahlung 188
  elektrotechnisches 132
  magnetisches **187**
  passives **187**
Baum **47**
Baumé 64
Baumwolle **61, 159**
bbl 34
Beckenaufnahme **189**
Becquerel 182ff, 239
BECQUEREL, ANTOINE HENRI 182
BEDA VENERABILIS 6f
Bedeutung 243
Befragung
  repräsentative 281
Begriff 252
Begriffsbildung
  zum Messen 261
Begründungsfragen 248
Behandlung Strahlenexponierter 188
Bel 196
Belastung
  berufliche, radioaktive **193**
Beleuchtung **171**
  Kommission 164
  Stärke 164, 170ff, **171**, 237
Belichtung 164, 172, **173**, 237
Belichtungsmesser **99**
Benchmark 200
Benzin **89, 91**
Benzol **91, 93, 111**
BeO
  reines **155**
  Keramik **155**
Berechenbarkeit 218, 253
Bereich
  Zahlen **219**
Berg **25**
Berlin **31**
Bernstein 95
berufliche Belastung **193**
Beryllium (Be) **89, 149**
Beschleuniger **109**
Beschleunigung 49ff, **51**, 224, 226f
Beschleunigungsanlage **81**
Beschreibung
  quantifizierte 1
Bestand von Hochkulturen **37**
Bestrahlung 84ff, **85**, 164, **193**
  Dichte 231
  Stärke 237
Beta-Strahlen 178f, 191
Beta-Strahler **183, 185**
Betatron 178
Beton **69, 155, 159**
Betrachtung
  rationale 278
Bewässerung
  landwirtschftliche **53**
Beweglichkeit
  der Elektronen **111**
  von Ionen **111**
  von Ladungen 110ff
  von Ladungsträgern **111**
  von Löchern **111**
Bewegungskomplexität **201**
Bewertungsfaktor, Strahlung 180, 191, 238
Bezirk
  Weißscher 128
Bibliothek 206
Biene **209**
Big Bang 86
Bild **203, 207**
  Frequenz **109**
  Röhre **175**
  Schirm **169**
  Verstärker **171, 173, 189**
  Wandler **37, 85**
Bildung der Elemente **149**

Billiarde 250
Billion 250
binär **219**
  Arithmetik 247
  System 243
  Zahlenbereich 217f, 246, 247ff
Bindung
  chemische **25, 81**
  ionische **81**
  kovalente **81**
Biologie 249
Biomasse **31, 61**
Bioproduktion der Erde **61**
BIOT, JEAN-BAPTISTE 97
Biot-Savartsches Gesetz 97, 140
Birke 52, **53**, 256
Bit **33, 81**, 194ff, **195**, 241
Bit/m **203**
Bit/m^2 **205**
Bit/m^3 **207**
Bit/s **201**
Bizeps **69**
Blasenkammer 180
Blasinstrument **73**
Blätterrauschen **213**
Blattfeder **67**
Blaualge **193**
Blauwal **55**
Blei (Pb) **87, 89, 159**
Blendenzahl 168
Blendung **167**
Blitz **69, 81, 99**, 107, **109, 119**,120
  Entladung **105**
  Lampe 168, **169**
  Röhre **169**
Block 198
Blut **47, 117**
  Bild **193**
  Druck 70
  Kapillaren **25**
Bodensedimente **185**
Bogenentladung **103**
Bogenmaß 208
BOHR, NIELS 127, 160, 261
Bohrhammer **213**
Bohrsches Magneton 127
BOLTZMANN, LUDWIG 197
Boltzmann-Konstante 80, 94, 151, 198
Bombe **81**
  des 2. Weltkrieges **81**
  Hiroschima **149**
Bonddrähte beim IC **103**
BOOLE, G. 247
Boolesche Algebra 198, 247
Bor (B) **89, 93, 111**
Bordelais 35
BOURBAKI 253
bpi 202, 204
Bq **183**
Bq/g **185**
Brauchwasser **53**
Braunkohle **89, 159**
BRD-Land **31**
Breitband
  Oszillograph **37**
  Übertragung **201**
Bremen **193**
Bremsen 50
  bei Zügen **51**
Brennöle **91**
Brennpunkt **75**
Brennstoff 86, **87**
  Element **79**
  Zelle **215**
Briefmarke **31**
Briese **47**
Brikett **89**
Brovira-Film **173**
Bruch 245
Brücke 270
Brückenschaltung 142
Brunnentiefe 50
Brüter
  schneller **77**
Bruttosozialprodukt 281
BTU **81**, 83
bu 34
Buch **195**, 204
  Druck **205, 207**
  Seite 204
Buche **53**
Bügeleisen **99, 139**
Bündelung von Radarantennen **209**
Büroraum **171**
bushel 34
Byte **195**, 198, 241

C

C **93, 111, 149, 185**
  Stähle 135
  Umsatz der Landpflanzen **61**
Cadmium (Cd) **79, 87, 89**
  Normalelement 104
cal 231, 239
Candela 160ff, 221, 236f
Carbon-Methode 40

CARNOT, SADI 214
Cäsium (Cs) **105, 183, 185**
CCD **85**
  Kamera **103, 171**
CD **203, 205, 207**
  -ROM **201, 205, 207**
Celsius 150f, 235, 268
CELSIUS, A. 151
CERN **81**
cgs-System 96, 271
Champagne 35
Chargennummer 270
Chemie **77**, 221, 273
chemische Reaktion 60
Chemotaxis **63**
Chill-Faktor 148
China **31**
Chip **31**
Chlor (Cl) **89, 93**
Chloroform **93**
Chlorophylldichte **63**
Christi Geburt 38
Ci **183**
Cicero 28
Clausius 83
CLAUSIUS, R.E.J. 82
Club of Rom 52, 80
Cm **183**
cm
  als Induktivität 271
  als Kapazität 122, 271
CMOS-Technik **187**
Co 128, **135, 183**
  Kanone **183**
  Nadeln **183**
  Portio-Platten **183**
CO_2 **37, 55, 89, 93, 149, 155, 219**
  Emission der Industrie **61**
  Verbrauch der Pflanzen **61**
Cobalt 128, **135, 183**
CoCr **135**
Codebaum 196
Codierung 196, 202
CoFe-Legierungen **135**
CoFeNi **135**
Compact-Cassette **205, 207**
Computer 242
Computerexperiment 280
Cortisches Organ 41
Coulomb 118ff, 232f, 238
COULOMB, CHARLES AUGUSTE DE 118, 126
Coulomb-Meter 120
Coulombsches Gesetz 118, 127
c_p **159**
cP **91**
cpi 202, 204
cran 34
Cray **201**
CrCo-Stahl **135**
CrCoFe **135**
Crew im Flugzeug **193**
CrNi **155**
CrO_2 **135**
Cs siehe Cäsium
Cs-Kanone **183**
Cu-Oxide **105**
Cu_2O-Gleichrichter **103**
CuNiFe **135**
Curie 180, 182
CURIE, MARIE 177
c_v **159**
CVD **47**

D

Dämmerungssehen **75**
Dampfdruck **149**
Dampf
  Kessel mit Öl 77
  Lokomotive **215**
  Turbine **215**
Darm **189**
Daten
  quantitative 255
  Ökologie im Umgang 281
  Fluß 200, **201**
Dauergedächtnis **195**
Dauerleistung von Lasern **73**
Dauermagnet **87, 89**, 129
Dauermagnetismus 127
dB 196, 211, **213**, 274
DDR **187**
DEBYE, PETER J.W. 116
Debye-Temperatur 116
Definition 256
Dehnungsmeßstreifen 66
Delphin **47**
Demonstration 263
denier 64
Denkstrategie 245
Deutschland **31, 193**
Deutung 243
Dezibel 196, 211
Dezimeterwellen **43**
DFT 45
DFÜ **219**
Diagnostik 179, 188

Dosis **187, 193**
Diamagnetismus 129, **143**
Diamant **69, 89, 209**
Kristall **155**
Synthese **69**
Diatonie 44
Diazoverfahren **85**
Dichte 32, 52, 60, 62, **63**, 229
in Galaxien **63**
kritische **63**
optische **173**
DIDOT 28
Dielektrizitätskonstante 120f, 124ff, 130
relative **125**
Diesel **89**
Diesel-Motor 78, **215**
Diethylether **91**
Differentialrechnung 46
Diffusion **47**, 92ff, **93**, 229
Konstante **93**
Pumpe **53**
digit 198
Digiti 14
Dimension
Hausdorff 26
DIN
Bogen 30
Filmempfindlichkeit 172
Dinosaurier **37**
Diode **103, 117, 187**
Dioptrie 27, 226
Dipolmoment 120
Diskette **195, 201,** 202, **203, 205, 207**
Diskretheit 251
Distributivgesetz 257
DK 124
DNS
je Zelle **55**
Synthese **61**
Dompfaff **209**
Doppelfenster 156
Dosimeter **187, 189**
Dosimetrie 186
Dosis **187, 189**
applizierte **189**
Äquivalent 181
tödliche **193**
dpi 202, **203**, 204, 241
Drachme 59
Draht **31, 141**
dram 58
Drehkondensator **123**
Drehprozeß 128
Drehspule 98
Drehstrommotor **79**
Drehwiderstand 114
Drehzahl 227
-messer 41
Dreiecke 243
Driftgeschwindigkeit **47**, 110
Drossel **141**
Druck 68ff, **69**, 228f, 274, **471**
Druck
Buchstaben **203**
Festigkeit **69**
kritischer **69**, 70
magnetischer **85**
mechanischer **85**
osmotischer **69**
Verfahren 84
-Wasserreaktor **77**
Welle **69**
Drucker 202
Druckluftnieten **213**
Dulong-Petit-Regel 158
Dunkel-
Adaption **167**
Materie 64
Strom **103**
Strom bei CCD-Kameras **103**
Durchblutung **53**
Durchflutung 131f
durchführbar 218
Durchlaßwiderstand **113**
Durchmesser **25**
Durchschlag **111**
elektrischer 108
in Luft **109**
SiO_2 **109**
Durchsichtigkeit **37**
Düsenflugzeug **69**
Dutzend 8
dyn 66, 229
Dynamik 65
der Wolken **73**
Dynamoblech **135, 143**

E

e **219**
E-Bahnen **105**
Echolot 42
ECL-Technik **187**
EDDINGTON, ARTHUR 272
Edelstein 58
EDV **219**
EEG 107

Effekte
magnetische **149**
Effektivwert 98
Ei **193, 215**
Eiche **37**
Eichung **149**
Thermometer 151
Eigenrotation **43**
des Protons **37**
Eigenschaft 218, 256, 260
Einfamilienhaus **75**
Eingangswiderstand **113**
Einheiten 260
elektrostatische 120
magnetische 232f, 275
System 224, 258
Verknüpfung 221f
einheitenfrei 274
Einkristall **47**
EINSTEIN, ALBERT 48, 80, 253
Einsteingleichung 57, 80
Einsteinrelation **87**
Eintagsfliege **37**
Eis **155, 159**
Eisen (Fe) **69, 89, 93,** 128, **135, 143, 155**
Feilspäne 137
Kernspulen **141**
-Wasserstoff-Widerstand 157
Eisenbahn **47**
Strecke **75**
Eiskappen der Pole **33**
Eiweiß **89, 189, 215**
Eizelle **25**
EKG **105,** 107
Ektrometer **119**
Elast **155**
Elastizitätsmodul **69,** 70
Elefant **55, 73**
elektrisch
Herkunft des Begriffes 95
elektrische Ladung 95, 96, 104, 127
Elektrisiermaschine 107
Elektrizität 95ff, 232ff, 273
Menge 121
Elektrobahn **99**
Elektrodynamik 127
Elektrolyse **99, 103**
Elektrolyt 112, **117**
Kondensator 122, **123**
Wirkung 97
Elektromagnet **81**
Elektromagnetismus 127, 273
Elektromechanik **113**
Elektrometer 118
Elektromotor **73, 215**
Elektron **25, 33, 37, 43, 47, 55,** 95
Austritt 152
Blitz **167,** 168
Gas 110, 116
Hülle **149**
Ladung 120, 272
Mikroskop **25, 99**
Resonanz **81**
Röhre **105**
Spinresonanz **43**
Strahl **75**
Transport **47**
Vervielfacher **99**
Zählrohr **99**
Elektronen/s **99**
Elektronenvolt 83, 179
Elektroofen **215**
Elektrophotographie **85**
Elektrorezeptor bei Fischen 108, **109**
Elektrosmog 138
Element **149**
Elementarladung 98, 118, **119**
Elementarlänge **25,** 26
Elementarteilchen 39
Elementarzeit **37**
Elemente, die vier 249
Elko **109,** 122
Elle 13, 14
Emission **215,** 216
EMK 104
Empirismus 252
Endlichkeit der Welt 246
Energie 80ff, **81,** 84, 154, 221, 229, 230ff, 238, 240, 275
Bedarf **73**
Dichte 88ff, **89,** 206, 231
räumliche 86, **87**
Dosis 88, 181, 186ff, **187,** 239
kalorimetrische 186
eines Neurons **73**
Erhaltungssatz 80, 214, 221
Fluenz 239
Fluß 224
Flußdichte 239
je Atom **81**
kinetische 80, 151
-Masse-Zusammenhang 57
nutzbare 82
potentielle 80
Strom 74
Technik 86
Träger 82
Umwandlung **215**

Verbrauch **73**
täglicher **81**
Verlust
magnetischer 129
Versorgung **43**
Engler-Grad 94
Englisch **219**
Enquete-Kommission 281
Entfernung
Erde – Mond **25**
Erde – Sonne **25**
Enthalpie 88, **89**, 222, 231
Entropie 82, 216, 235, 241
Nachrichtentechnik 197
Entsalzungsanlage **53**
entscheidbar 218, 248
Entscheidung 281
Entscheidungsfragen 247f
Entstehen von Information 279
EÖTVÖS, ROLAND VON 54
Ephemeridensekunde 36
Epsilon 217
Erbrechen **187, 193**
Erbse **61**
Erde **25, 33, 37, 47, 51, 55, 61, 63, 69, 81, 117,** 249
Anziehung 275
Atmosphäre **73, 209**
Beben 42, **51**
Skala **51**
Beschleunigung 49, 56
Bewegung um die Sonne **47**
Durchmesser **209**
Eigenrotation **43, 81**
Erkundung 42
Feld **139**
im Weltall **123**
Inneres **149**
Kern **63, 69**
Magnetismus 40, 127
naß bzw. trocken **117**
Oberfläche **31, 51, 53**
Leistungsflächendichte 74
Radius **25**
Wärme **73**
Erden, Seltene **135**
Erdöl **55**
erg 72, **81,** 231
erg/cm^2 **85**
erg/s **73**
erg/s/cm^2 **75**
Ergänzungfragen 248
Erholung nach radioaktiver Belastung **187**
Erkenntnis 218
Erkenntnistheorie 261, 278
evolutionäre 279
Erprobungszeit 284
Ersatzschaltbilder 154
Erzgebirge **185**
Esotherik 1
Eßlöffel 59
Etalon 23
Ethernet **201**
Europa **31, 53, 187**
eV **81,** 231
Evolution **201,** 218, 246, 251f
evolutionäre Erkenntnistheorie 279
Expansion des Weltalls 64
Expertise 281
Explosion
chemische **69**
von Galaxien **81**
Exponent 245, 250
Exportbegrenzung 182, **183**
Exposition 188ff, **189,** 239
extrafoviales Sehen 166
Exzenter **51**

F

Fabrikhof **171**
Facettenaugen **209**
Fadenelektrometer 118, **119**
Fahrenheit 153, 235
FAHRENHEIT, D.G. 151
Fallbeschleunigung 49, 56
Fallout 178, **185, 193**
Farad 121ff, 232f
FARADAY, MICHAEL 95, 121, 127
Farbdia **207**
Farbe 248
Fernseher **139, 193**
Kreis 269
Lehre 160, 269
Nummer 270
Sehen 162, 166
Zentrum **85**
Faser
synthetische **61**
fath 28
Fax **203**
Fe-Whisker **69**
FeAl **143**
FeCoV **143**
FeCoVCr **135**
Feder **67, 89**

Federwaage 56, 66, **67**, 571
Fehler
  Bereich 3, 263
  Breite 265
  Fortpflanzung 265, 267
  Grenzen 264
  Intervall 265
  Lichtgeschwindigkeit 264
  Meßinstrument 263
  qualitativer 279
  quantitativer 279
  Quote 194
  Rate **219**
  Rechnung 263
  systematischer 220, 262
  zufälliger 220, 262f
Feinheit von Garn 64
Feld
  bei Neutronensternen **109**
  elektrisches 107
  Emission **109**
  größtes magnetisches **139**
  in Leitern **109**
  Konstante 120, 142
  Stärke
    elektrische 107ff, **109**, 124, 233
    magnetische 128, 134ff, **135**, 232f
Feldbus **201**
Feldeffekt-Transistoren **113**
FeNi-Legierung **143**
FeNiCr **143**
FeNiCu **143**
FeNiMoCu **143**
Fensterscheibe **69**
Fernerkundung 216
Fernglas **209**
Fernseher **81**, 99
  analog **201**
  digital **201**
Fernsprechnetz **201**
Ferrit **117**, 130, **135**
  Kernspule **141**
  weichmagnetischer **135**
Ferroelektrika 124
Ferromagnetismus 128, 130
FeSi-Legierung **135**
Festelektrolyt **117**
Festkörper **63, 111**
Festkörperspurdetektor **187**
Festmeter 34
Festplatte **195, 201**, 202, **203, 205, 207**
FET **105**
FET-Spannungsmesser **113**
Fett **89, 159**
Fettfleck-Photometer 165
Feuer 249
FFT 45
Fiktion 252ff
Film **85, 173**, 202
  Belichtung **75**
  Bild **189**
  Dosimeter **189**
  Empfindlichkeit 170, 172
  hochauflösender **205**
  Plakette **187**
  rückwärts laufender 39
  Schwärzung 190
Finger 6
Finnwal **73**
Fisch 101, **109, 139, 185, 193, 215**
  elektrischer 107
  Verzehr **193**
Fischaugen-Optik **209**
Fischen **103**
Fixpunkt 151
Fläche **31**, 224f, 29ff
  für 1 TW-Leistung **31**
  künstlich bewässerte **31**
  Speicherdichte 202, 204ff, **205**
  Widerstand 115
Flagelat **81**
Flamme **149**
Fledermaus 208, **209**
FLEISCHMANN, R. 272, 273, 275
Fleischmann-System 273
Fliege **37**
Fluchtgeschindigkeit **47**
Flug **79**
  Höhe **25**
  Muskelkontraktion **37**
Flügeldruck **69**
Flugzeug **25, 47, 51, 73**, 78, **79, 193, 213**
  Motor **79**
Fluorchlorkohlenstoff **61**
Fluorchlorkohlenwasserstoff **219**
Fluß **25**
  Dichte 232
    magnetische 137, **139**
  magnetischer 131f, 137
  Quant
    magnetisches 133
  Stahl **143**
  Wasser **193**
  Wechsel 202
Flüssigkeit **63, 93, 149**
  Manometer **69**
Flüssigkristall **87, 103, 109**
Flüstern **213**

Fluxmeter 138
FM (Frequenzmodulation) **201**
Fm 34
Fön **139**
foot 30, 275
Formalismus 253
Formanisotropie 128
FORTIN 15
fot 28
Fourieranalyse 44
FOURNIER 28
Frage
  Strategie 196
  Typen 247f
  Wörter 248
Fraktale Geometrie 26
Freeware 284
Freiheitsgrad 151, 158
Freimaurer 243
Frequenz 41ff, **43, 221**, 226ff
Frosch **209**
Frucht **61, 79**
Frühbeet 157
Frühstücksei **193**
ft-lb-s-System 275
Fühlschwelle **81**
Funkverbindung **73**
Fusion **73**
  Energie **81**
  Reaktor 179, 183
Fuß 13, 28
  römischer 14
Fußballplatz 31
Fußgänger **47**
Fuzzy 248, 265

G

GaAs **111**
Gal 50, 225, 227
Galaxie **25, 33, 37, 47, 55, 73, 81**, 83, **149**
Galle **53**
  Produktion **61**
Gallium (Ga) **111**
gallon 34
Galvanik **99, 105**
Galvanisieren **47, 103**
Galvanometer 98
Gamma 58
Gamma-Fe_2O_3 **135**
Gamma-Stahlen 42, 178ff
Gamma-Strahlung **43, 183, 185, 187**
ganze Zahlen von Gott 253
ganzheitlich 278f
GaP 111
Garn 64
Gas **55, 63, 93, 215**
  Ballastpumpe **69**
  Druck
    kritischer 70
  Durchflußzähler **53**
  Entladung 99
    elektrische **149**
  interstellares **63**
  Lampe **175**
  Licht 168
  Ofen **215**
  Theorie 151
  Thermometer **149**
  Turbine **77, 215**
  Vorrat **33**
  Zähler 52, **53**
Gastein, Bad **193**
Gauß **139**
GAUSS, CARL FRIEDRICH 133, 138, 233, 271
Gaußsche Fehlerrechnung 263
Gaußsches System 96
GB 198
Gebiet
  verseuchtes 182
Gedächtnis 36, **37**, 198f, 246, 249
  Arten 199
  lebenslanges **201**
  menschliches **201**
Gefahr 269
Gefäßreflex **109**, 110
Gegeninduktivität 142
Gegenwart **201**
Gegenwartsgedächtnis **37, 195**
Gehirn **53, 77, 79, 87, 85, 195**, 199, **207, 219**
  Feld 139
  Komplexität **219**
  Leistung 76
  Tod **189**
Gehör 41, **43, 73**, 211
  Schäden 212
Geiger-Müller-Zählrohr 180
Geißeltierchen **47**
Geist 243
Geldwert 270
Gemälde 270
Gemüse **61**
Gen **219**
Genauigkeit
  Lichtgeschwindigkeit 264
Generalisierung 260, 269
Generalkonferenz 16, 54, 97, 164, 273

Generator **105**
Genetik 85, 198f, **207**
Geometrie 208, 273
  fraktale 26
Gepard **47**
Gerät **25**
  elektronisches **53**
  optisches 208
  stationäres **51**
  technisches **43**
  tragbares **51**
  transportables **51**
GERBERT VON AURILLAC 12
Germanium (Ge) **99, 105, 111, 117**
  Dioden **103**
  für Halbleiter **61**
  Sperrstrom **103**
Gesangstimme **73**
Geschwindigkeit 42, 45ff, **47**, 224, 226f
  thermische **47**
Gesetze 218, 252, 257
Gesundheit und Magnetfeld 138
Getränk **61**
Getreide **61**
Getreidekorn **55**
Geviert 28
Gewebe
  biologisches **117**
  Erwärmung **109**, 110
  menschliches **135**
Gewicht 32, 56
  spezifisches 62
  und Masse 54
Gewinnung
  von Daten 277
  von Meßwerten 279
Gewitterwolke **105**, 107, 122
Gewöhnung 279
Gezeiten **51**
  Leistung **73**
GILBERT, WILLIAM 95, 126
gill 34
Gips **215**
  Platte **155**
Gitterschwingung **81**
Glas 59, **69, 91, 117, 125, 155, 159**
  Faser **69**
  Spiegel **215**
  Stab 95
  Wolle **155**
Gleichrichter **77, 103, 113, 215**
Gleichstrom **113**
Gleichungen 257
Gleitkomma-Arithmetik 250
Gletscherbewegung **47**
Glimmentladung **99, 103**
Glimmer **125**
Glimmerkondensator **123**
Globalisierung 276, 281
Glockenläuten 38
Glühlampe **77, 167, 215**
  mattierte **167**
  Wendel **167**
Glühstrumpf 168
Glühwürmchen **161, 167**
Glutamine bei Lärche **61**
Glycerin **91, 93**
Gnonom 13
Go (Spiel) **219**
GÖDEL, K. 247
GOETHE, J.W. VON 160
Goethe-Wortschatz **219**
Gold (Au) **93, 155, 159**
Gold Cap 122, **123**
Goldlegierung 58
Golfkrieg 282
Golfstrom **47, 73**
Gon 208
Gonaden 179
  Dosis **187, 189**, 190
Googol 217, **219**, 246, 250
Googolplex 217, 219, 251
Gott
  als Mathematiker 253
  und ganze Zahlen 253
göttlich 243
Grad
  Temperatur 275
  Winkel 208ff, **209**
grain 58
Grammatom 146
Grammolekül 146
Gran 59
Grande Diseense **33**
Granit **69, 155**
Graphit **117**
Gras **215**
  Blüte **47**
Gravitation 27, 49, 56, 273
  Kollaps **63**
  Konstante 272
Gray 186
GRAY, STEPHEN 186
grd 275
Gregorianischer Kalender 40
Grenze 21, **207**, 250
  für 1 Bit **33**
  für Lichtausbeute **175**

für Transistor **31**
holländische **53**
klassische Physik 86
optische Speicherung **203, 207**
Grenzhysterese 129f, 134
Grenzwert 265ff
Grenzwinkel gegen Luft **209**
Gros 9
Groß-Dyn 66
Größen
Art 258
Gleichung 258
Klassen bei Sternen 165
Ordnung 2
physikalische 3, 19, 22, 257ff, 271
Typen 261
Größer-Gleich-Relation 268
Großhirn **31**
Großrechner **201**
Großstadt **61**
Gruppe
abelsche 272
Guapari bei Rio **193**
Gummi **69**
Feder 88, **89**
synthetischer **125**
Gußeisen **143, 155**
Güte
menschliche 270
Güterzug **51**
Gy **187**

H

H **185**
Bindung **37**
Bombe **149**
Brücke **81**
H_2 **37, 69, 91, 93, 111, 149**
H_2O **55, 69, 89, 117, 125, 219**
H_2S **219**
Haar
Dicke **25**
Querschnitt **31**
Wuchs **47**
Hadronen 27, **37**
Haferkeim **173**
Haftpflicht **183**
Halbleiter **47, 61, 77, 87, 85, 117, 187, 205, 207, 219**
dotierter **117**
Laser **215**
Speicher **195, 203**
Halbtonschritt 44
Halbwertszeit **37**, 38, 178, 182
Hall-Effekt 138
Halogenlampe **167, 169, 175**
Haltekraft **67**
Hamburg **31**
Hand 13
hand 28
Handlungsstrategien 252
Harn **61**
Harrisberg-Unfall **183**
Härte **69**
Grad 70
Skala 268
Hartferrit **135**
Hartgummi 95
Hartholz **69**
Hauptsternreihe **25, 51, 79**
Haus **193**
Hausdorff-Dimension 26
Haushaltsstaubsauger **53**
Haut **53, 61, 75**
Havarie
Dosimeter **187**
im Datenmeer 281
HCl **143**
HDK **123**, 124
Keramik **125**
HDTV **201**
Hefe **79**
HEFNER-ALTENECK, F.F. VON 164
Hefner-Kerze **161,** 164f, **169,** 237
Heisenbergsche Unschärferelation 279
Heizgerät 112
Heizwicklung **113**
Hektar 30, 225
Helium (He) **37, 69, 81, 89, 91, 93, 105, 111, 143, 149, 155, 159, 219**
HeNe-Laser **175**
Henry 140ff, 233
HENRY, JOSEPH 140
HERON VON ALEXANDRIA 151
Hertz 226f
HERTZ, HEINRICH 41, 65
Herz
Kammerflimmern **99**
Leistung **73**
Muskel **53, 79**
Schlag **37**
Schrittmacher **139**
Stillstand **99**
Hexadezimalsystem 243
Hexan **91**
HF

-Feld **109**
-Transistor **187**
Hg
-Hochdruck-Stroboskoplampe **167**
-Hochdrucklampe **169**
-Lampe **175**
-Lichtbogen **103**
HgSe **111**
HgTe **111**
HILBERT, DAVID 247
Himmel
bedeckter 171
blauer **167**
grauer **167**
im Winter **171**
klarer **171**
Hintergrundhelligkeit **167**
Hintergrundstrahlung 86, 153
Hiroschima-Bombe **81, 149**
Hiroshima 177
HITLER, A. 243
Hitzdrahtinstrument 98
Hochdruck **69**
Hochdruckchemie **77**
Hochdrucklampe **175**
Hochkulturen **37**
Hochspannungsanlage **113**
Hochspannungsleitung **105**
Hochstrom-Lichtbogen **149**
Hochstromhalbleiter **77**
Höchstspannungsprüftechnik **105**
Hochtemperatur-Supraleiter **149**
Hochtemperaturchemie **77**
Höckerschwan **69**
Höhe, 2000 m **193**
Höhenstrahlung 42, **43, 81**
Höhenwuchs **47**
Hohllochsteine 156
Hohlmaß 32, 59
Holographie **85**
Holz **33, 61, 69, 89, 155, 159**
trockenes **159**
Holzkohleeisen **143**
HOOKE, ROBERT 248
Hookesches Gesetz 66
Hören
Informationsfluß **201**
Schwelle **75, 81**, 211, **213**
horsepower 72
Hubschrauber **69, 79**
Hülsenfrucht **61**
Hummer **47**
Hund **37, 209**
HUYGENS, CHRISTIAN 23
Hydraulik **69**
Hyperschall 42
Hysterese
magnetische 124, 128, 130
Hz **213**

I

IC **103**
Leiterbahnen 102
Idealisierung 260, 269
Idee
immaterielle 253
Identität 247
immateriell 253
Impuls 65
Belastung **75**
Laser **75**
inch 28, 275
Indien **193**
Indium (In) **93**
Induktion
Gesetz 134
Konstante 142
magnetische 127, 137, **139**
Induktivität 132, 140ff, **141**, 233
Industrie **53, 61**
Industrieaufnehmer **67**
Industriegesellschaft **73**
Industriemeßtechnik 179
infinite Mathematik 217
Influenz 108, 118, 124
Informatikkrise 216
Information 82, 221, 240ff, 244
Elektronik **99**
Entstehung 279
genetische **195**
Gewinnung 218
Mangel 278
Maß 274
Menge 194ff, **195**, 206
Speicherung 86
Theorie 196, 214
Träger 82
Infrarot **87**
Infraschall 42
Injektionsspritze **33**
Innovation
theoretische 280
Insekt **25**
Insel
Hiddensee **31**
Rügen **31**

Sylt **31**
Intelligenz
menschliche 270
intercavitäre Therapie **183**
Interferenz 210
Internationale Kerze 164f
Intervall-Skala 268
Intervallarithmetik 265
Intestinaltod **189**
Ionen **37, 111**
Dosis 188, 239
-Getter-Pumpe **53**
Implantation **75**
Triebwerke **67**
Ionisation
Kammer 180, **189,** 190
Manometer **69**
Spannung **105**
Ionisierende Strahlung **221**
ISA-Bus **201**
ISDN **201**
ISO-Filmempfindlichkeit 172
Isobutan **93**
Isolation 113
Isolator **109, 117**
Isotop 146, 184
strahlendes 178
Isotopenbatterie **79**

J

J/kg **187**
Ja/Nein-Entscheidung 247ff
Jahr 49, **187, 189, 193,** 227
Ablauf 36
Jahreszeiten 39, 46, 249
Janusgesicht der Zahlen 244
Jodtest **183**
JOLIOT-CURIE, IRÈNE 177
Josephson-Effekt **81,** 98, 106, 153
Joule 80ff, 224, 227, 229, 231, 235, 237ff, 241, 275
JOULE, JAMES PRESCOTT 80
Jukebox **195**
Junktor 247
Jupiter **51, 55, 73, 81**

K

K **187**
Kabbala 243
KaCl **155**
Kalender 36
Gregorianischer 40
Wesen 12
Kalkstein **117, 155, 193**
Kalorie 83, 275
Kalorimetrie 148
kalorimetrische Energiedosis 186
Kälte
Gefühl **139**
Informationsfluß **201**
Kameraspeed **85**
KAMERLINGH ONNES, HEIKE 114
Kammerton 42
Kanalkapazität 200, 216
Kaninchen **79**
Kapazität 121, 233
elektrische **123**
Kapillare 90
Karabinerschuß **47**
Karat 58, 229
Kardinalzahl 6
Kartenfläche von Atlanten **31**
KASNER, EDWARD 217
Kaspisches Meer **31**
Kathodenstrahlröhre 108
Katoden **103**
Katodenfall **103**
Katzbuckel in Baden **193**
Katze **209**
Kavitation **51**
KB 198
kcal **81**
kcal/h **73**
kcal/mol **81**
Kegel 210
Keimdrüse 190
Kelvin 148ff, 221, 235, 269
KELVIN, Lord (WILLIAM THOMSON) 150
KER 351 **125**
Kerala **193**
Keramik **69, 125**
Kondensator **123, 187**
Trimmer **123**
Kerma 186, 239
Kern
Brennstoff **87**
Dichte **63**
Energie **193**
nutzbare 89
Fusion **75, 81, 149**
Kraft 57, **215**
Kraftwerk **89,** 179, 184, **193**
wohnen **193**
Prozeß 86

Resonanz **81**
magnetische **43**
Suszeptibilität **149**
Umwandlung 153, 182
Veränderungen **43**
von Galaxien **149**
Kernspuremulsion 180
Zerfall 180
Kerze **161,** 164, **167**
Kiefer **61**
Kies **117**
Kilogramm 54ff, 221, 229, 231, 264
Kilokalorie 154
Kilopond 65, 274
Kilowattstunde 83
Kinematik 45, 65, 273
Kino
Lampe **169**
Projektion **167**
Lampe **169**
KKW siehe Kernkraftwerk
Klapprozeß 128
Klasse P, NP 218
Klassenbildung 246
Klasseneinteilung 218
Klavier **73**
Kleidung **105**
Kleinbildfilm **205**
Kleinhirn **31**
Kleinstlüfter **53**
Kleintransformator 101, **103**
Klingeltrafo **141**
KLITZING, KLAUS VON 114
Knochen **187**
Knochenmark-Tod **189**
Knopfzelle **119, 123**
Knoten 48 225, 227
Koaxialkabel **201**
Kobalt siehe Co
Kobaltkanone 182
Koerzitivfeldstärke 129f, 134
Kohle **31, 55, 61, 87, 89**
Fadenlampe **167, 175**
Lichtbogen **103, 167**
Ofen **215**
-Widerstand **149**
Kohlehydrate **89**
Kohlenstoff siehe C
Kohlenstoffisotop 58, 146
Kolbenmanometer **69**
Kolibri **69**
Kolorimetrie 63
Koma **79**
Kombinatorik 217, 246
kombinatorisch **219**
Zahlenbereich 217f, 246, 251
Komet **61**
auf Jupiter 1994 **81**
Kompaß 126
Kompensationsverfahren 106
Komplementaritätsprinzip 261
komplexes System 247
Komplexität **195,** 218, 277
Gehirn **219**
Reduktion 278, 281
Theorie 217
Kondensator **77, 87,** 120, **123, 187**
Konkretisierung 254
Konservierung
Lebensmittel **193**
Konstanten
wichtige 283
Konstruktivismus 253
Kontaktmodulator **105**
Kontaktwiderstand **113**
Kontamination **183**
Kontinuität 251
Kontinuum 46, 262
Kontonummer 267
Kontrolle 244
Konzertsaal **31**
Koralle **47**
Kork **155, 159**
Körper **63**
menschlicher **185**
Schwarzer **161, 215**
Wärme 148
kosmisches Rauschen **109**
Kosmos **193,** 243
Kr 183
Kraft 65 ff, , **67, 221,** 224, 228f, 231
elektromagnetische 27
Kraftwagen **51**
Kraftwerk **73, 77, 89, 215**
Krämpfe **79**
Krater des Kohlelichtbogens **167**
Kreativität 200, **201**
Raten **201**
Krebsbekämpfung 191
Krebs **193**
Krebsnebel **73**
Kreis
Bogen 208
magnetischer 140
Kreiselkompaß **43**
Kreislauf **37**
Kreisprozeß 214
Kriechgalvanometer 120

KRONECKER, LEOPOLD 253
Krümmung
  positive und negative **63**
Kryopumpe **53, 69**
Krypton (Kr) **155**
Küchenmaße 59
Kugelkondensator 122, 271
Kühlkörper 156
Kühlturm **75**
Kultur
  außerirdische **75**
  Leistung 255
künstliche Radioaktivität **193**
Kunststoff **53, 61, 69, 109, 125**
Kunststoffolienkondensator **123**
Kupfer (Cu) **33, 69, 89, 93, 155, 159, 215**
Kurpersonal **193**
Kurzwelle **43**
Kurzzeitgedächtnis **37, 195, 201**
Küste Kerala **193**
kWh **81**
Kybernetik 82, 196

L

Ladung 118ff, 131, 233, 238, 271
  elektrische 95, 96, 104, 119, 127
  magnetische 96
  Träger 110, **111**
    in Plasmen **47**
  Trägeranzahl 112
Ladyzelle **119, 123**
Lagerung 60
Lambert 166
Laminar 52
Lampe **161, 167, 169, 175**
LAN **201**
Land
  BRD **31**
  Vermessung 208
Länge 23ff, **25**, 26, **221**, 224ff, 227
Längenverhältnis **219**
langlay 84
LANGLEY, S.P. 84
Langspielplatte **43**
Längstwelle **43**, 176
Langwelle **43**
Langwellenspule **141**
Lärche **61**
Lärm **213**
Laser 71, **73, 75, 103, 167, 175**
  Drucker **203**
  Focus **87**
  für Fusion **73**
  Impuls **73**
  Kristall **89, 77, 87**
  Strahlbohren **75**
Lastkraftwagen **51, 213**
Lautheit 212
Lautstärke 211f, **213**
Lavalldüse **47**
LCD **85**
LD_{50}-Wert
  Stromstärke 100
Leben **149**
  Dauer **37**, 39
  irdisches **37**
  Kraft 65
  Uhr 35
lebensgefährliche Spannung 106
Lebensmittel **61**
  Konservierung **193**
Lebewesen 247f
Leckrate **75**
LED **85, 161, 167, 175**
Leere im All **63**
Legierung **143**
  magnetische **135**
Leiblichkeit 278
LEIBNIZ, G.W. 247
Leidener Flasche 121
Leinwand **215**
Leistung 71ff, **73, 79**, 221, 229, 230ff, 238
Leistungsdichte 76ff, **77**
Leistungselektronik **99**
Leistungsflächendichte 74ff, **75**
Leistungsgesellschaft 71
Leistungsmassendichte 78ff, **79**, 231
Leistungsumsatz **73**
Leiter
  elektrischer **109**, 117
Leiterbahnen im IC 102, **103**
Leitfähigkeit
  elektrische 116
Leitwert 115, 233
  magnetischer 132, 140
Leitzahl 170
LENZ, HEINRICH FRIEDRICH EMIL 134
Lenzsche Regel 134
Lepton 27
Leptonenära 37
Lerneffekt 279
Lesen **171**
  Informationsfluß **201**
  Lampe 161
Leuchtdichte 74, 164, 166ff, **167, 221**, 237
Leuchtkäfer **209**

Leuchtkraft von Sternen **73**
Leuchtorgan **75**
Leuchtschirm **99, 167**
Leuchtstofflampe **75, 141, 167, 169, 175, 215**
Leuchtstoffphänomen **99**
Leuchtstoffröhre 168
Leuchtturm **161,** 165
Lexikon **195**
Libelle **209**
Libra 14
Licht **81,** 176, 248
  Absorption grüner Pflanzen **73**
  Ausbeute 174ff, **175,** 236f
  Blitz bei Flagelaten **81**
  Bogen **99,** 102, **103, 149, 161**
  Geschwindigkeit 23, 39, **47,** 48, 272
    Genauigkeit 264
  infrarotes **43**
  Leiter **201**
    monomoder **31**
  Menge 164, 168, 237
  Messung 19, 273
  Mikroskop **25**
  Netz **105**
  Quant 48
  sichtbares **25, 43, 87**
  Stärke 160ff, **161,** 164, **221,** 237
  Strom 74, 164, 168ff, **169, 221,** 237
  Technik 236ff
  ultraviolettes **43**
  Wahrnehmung **73**
  Weg **25, 37**
LICHTENBERG, G.CHR. 95
Lichtjahr 24, 27, 225
Lieferzeit 38
Linear-IC **187**
Linearbeschleuniger **109**
Linien/mm 202
LINNÉ, K. VON 151
Lippenstift 270
Liter **33,** 34, 224
Lithium (Li) **89, 93, 111**
Loch
  schwarzes 60
Lochkarte **207**
Logarithmus 268
Logik 246
Logizismus 253
Lokomotivenöl **91**
Loschmidtsche Zahl **219**
Loslaßgrenze
  Strom 100
lpi 202, 204
Luft **53, 63, 91, 93, 109, 111, 125, 143, 155, 159, 209, 219, 249**
  bodennahe **185**
  Druck 68, **69**
  Kondensator **87, 123**
  Schadstoff 61
  Spule **141**
  Trimmer **123**
Lüfter 52, **53**
Lumen 168ff, 237
Lumineszenz
  Dioden **175**
  ultraschwache bei Pflanzen **167**
Lummerwürfel 165
Lunge **31, 61, 189**
Lupex-Film **173**
Lux 170ff, 237
lux **75**
lx·s **85**

M

Machsche Zahl 48
Macht 244, 282
Magensaft **53**
Magnesium (Mg) **111**
Magnesiumoxid **215**
Magnet 137
Magnetband **33, 67, 87, 135,** 137, 292
Magneteisenstein 126
Magnetfeld und Gesundheit 138
magnetisch
  hart 134
  weich 134
magnetische
  Einheiten 232, 275
  Ladung 96
  Monopole 127, 137
  Uhr 40
Magnetisierung 128ff
Magnetismus 96, 126ff, **187,** 232ff, 273
  bei Tieren 126, 134
Magnetkopf **47,** 137, **141**
Magnetmaterial **139**
Magnetometer 134
Magneton, Bohrsches 127
magnetooptisches Verfahren **85**
Magnetpol 129, 134
Magnetspule **75**
Magnum 35
Mais **53, 61, 215**
MAK-Wert 266
Makrokosmos 27, 246
Mammutbaum **37**

Mangan (Mn) **87, 89**
Mangel an Information 278
MANN, THOMAS 38
Manometer 68, **69**
Mantisse 245, 250
marine Sande 184
Marmor **155**
Mars **51, 69**
Maschine **25**
Maschinenöl **91**
Maser **73**
Maß 12
Masse 54ff, **55, 221,** 228ff, 275
  Äquivalent **81**
  atomphysikalische 58
  auf der Erde **55**
  einheitliche 14
  und Energie 57
  Erhaltungssatz 57, 80
  Fluß 52, 60ff, **61**
  und Gewicht 54
  Gewinn der Erde **61**
  Normal 54
  schwere 54
  Strom 229
  träge 54
  Weltall 57
  Verlust 57
    der Sonne **61**
Maßeinheit 3, 5, 12ff, 19, 218, 222, 257, 262, 269
  Zusammenhänge 20
Massenspektrometer **69**
Maßsystem 5, 16, 17, 18, 258, 271
  absolutes 272
  Geschichte 18
  metrisches 15f
Maßzahl 256f, 269
Mastschwein **79**
Material
  magnetisches **135**
Materie **37**
  interstellare **139**
  sichtbare **63**
Mathematik 244ff, 255ff
  Relation zur physischen Welt 253
mathematisch **219**
  Methoden 252
  Strömungen 252
  Welt 254
  Zahlenbereich 246, 250
Maus **37, 79**
Maximalpermeabilität 145
Maxwell 133, 233
Maxwellsche Gleichungen 96, 107, 127, 133
MAYER, ROBERT 80
MB 198
mbar **69**
Mechanik 273
  klassische 39
  Prinzipien 65
  statistische 273
Medien
  elastische 211
Medizin **189**
Meer **37**
  Entsalzungsanlage **53**
  Wasser **63, 117, 185, 193**
Meile 28
Meißner-Ochsenfeld-Effekt 101
Mel 44
Membran
  biologische 108, **109**
  semipermeable 94
Menge 6, 12
  unscharfe 265
Mensch **25, 37, 47, 53, 55, 61, 73, 79, 81, 105, 109, 119, 185, 187, 189, 193, 195, 201, 209, 215**
Menschenwerk 253
Menschheit **37, 61**
Mercalli-Erdbebenskala **51**
Mercalli-Skala 50
Merkur **51**
Mesopotamien 8
Meßapparatur 17, 257, 259
Meßbecher 32, 263
Meßbereich 55
Meßbrücke 114
Messen 3, 5ff, 254f, 269, 277
  experimentell 260
  Fehler 221, 230ff, 262ff
  Gerät 16ff
    ballistisches 120
    elektrostatisches 118
  Grenze mit Supraleitern **139**
  historisch 269
  Instrument 263
  Objekt 257, 259
  Prinzip 3
  Prozeß 256, 259ff
  Reihe 265
  Technik **105,** 245
    subjektiv 165
  theoretisch 260
  ursprünglich 2
  Vorgang 21
  Vorschrift 257, 259, 277
  Wert 262ff

Aufnehmer **51, 67**
Zahlenwerte 259
Messing **215**
Messung 255ff, 260, 279
Begriffsbildung 261
Metall **117**
blankes **215**
Schicht **135**
Metamathematik 247
Meteorit **25, 61**
Meter 23ff, 221, 264
Einführung 15
Methan **91, 159**
Methanol **91, 159**
Methode
der kleinsten Quadrate 220
mathematische 252
Methylbutan **91**
metrisches Maßsystem 15f
metrisches System 15
Metrisierung 260, 261, 267
mho 115
MIE, GUSTAV 272
Mignonzelle **119, 123**
MIK-Wert 266
Mikroelektronik **25, 77**
Mikrofilm **203,** 204, **205, 207**
Mikrokosmos 246
Mikrophysik 261, 279
Mikroskop **25, 99**
Mikrowelle **43,** 176
Mikrowellengerät **75**
mil 28
Milch 184, **185, 215**
Milchstraße **33, 47, 55, 73**
mile 30
Milliarde 250
Millibar 70
Millimeterwelle **43**
Million 250
Mimose **47**
Mindestbeleuchtung zum Lesen **171**
Mine 13
Mineralwasser **193**
Minute 36, 40, 227
Minute (Winkelmaß) 208, **209,** 210
MIPS (Material-Intensität pro Serviceeinheit) 281
mips 200
Mistkäfer **69**
Mittagssonne **75**
Mittelwelle **37, 43**
Mittelwellenspule **141**
Mittelwert 220
MKS-System 65, 275
MnO **79**
MnO_2-Batterie **119, 123**
Mobilität 45
Modell 218
Bildung 278
elektrisches, der Wärmeleitung 154, 156
Modem **201**
Modulator **105**
Möglichkeit 218, 246, 251f, 278
Mohssche Härteskala 268
Mol 146
Molarität 147
Molekül **43**
organisches **25**
Molekularpumpe **69**
Molekularsieb **25**
Monat 36, 40
Mond **25, 33, 37, 51, 55, 73, 167**
Durchmesser **209**
Kalender 8
Oberfläche **31**
Periode 249
Zyklus 36
mondlose Nacht 170
Monitor **99,** 136
Feld **109, 139**
Grenzwerte 110
Monozelle **119, 123**
Morgen 30
MOS-Gate **99**
Mößbaereffekt **81**
Motor **73, 79, 215**
Motorenöl **91**
Motorik **201**
MPR **139**
mrd **187**
Mt **55**
Müggelsee **31**
Müll **61**
Muschel **79**
Muskel **53, 69, 187, 215**
Faser **67**
Krampf **99**
Mutationsrate **219**
Muttermilch **53**
Mystik 242

N

N_2 **69, 89, 111, 149, 219**
Na **185**
Na-Dampf-Lampe **169, 175**

Nachrichtentechnik 196, 214
Nacht
  mondlose 170
  mondlos klare **171**
  Sehen **167**
  Sichtgerät **167, 171**
Nachweisgrenze **63,** 64
  mit Fadenelektrometer **119**
NaCl **93, 117**
Nadeldrucker **203**
Nagasaki 177
Nagelwuchs **47**
Nahrung 275
Nahrungsmittel **89**
NAPOLEON 243
Natrium (Na) 111
naturgegeben **219**
  Zahlenbereich 217f, 246, 250
Naturgesetz 253, 279
natürliche Radioaktivität 182, **193**
Naturwissenschaft 279
NDK **123,** 124
NDK-Keramik **125**
Ne **219**
Negentropie 198
Neper 196
Neptun **51**
Nerv
  Geschwindigkeit **47**
  Faser **47**
  Impuls **99**
Netz
  neuronales 248, 265
Netzgerät 79
Netzhaut **31, 171**
  Empfindlichkeit 166
Netzteil 77
Neue Kerze 164
Neugrad 208, 210
Neukurve 129f, 144
Neuron **31, 73, 219**
neuronales Aktionspotential **105**
  Speicher 199
  Netz 248, 265
Neutrino **55**
  Masse 64
Neutron **37, 55**
  Dosimeter **187**
  Stern **25, 43, 63, 64, 69, 73, 99, 105, 108, 109, 138, 139**
  Strahlung 180, **187**
  thermisches **81**
NEWTON, ISAAC 65ff, 160, 229, 231, 248, 274
Newtonsches Axiom 49, 65
NF **113**
NF-Transistor **187**
Ni-Gehalt **135**
Ni/Cd-Akku **119, 123, 215**
nibble 198
Nickel (Ni) **69, 79, 87, 89,** 128, **143, 155, 215**
Niederdrucklampe **175**
Niere **31, 53**
NiFe-Legierung **135**
NiFe-Pulverkern **135**
Nippur-Elle 13
Nit 166
Nitrobenzol **91**
NO_3 **111**
Nominal-Skala 267
Nordatlantik **185**
Normal 269
Normalelement 104
Normalflasche 35
Normalobjektiv **209**
Normalverteilung 263
Nox 170
NO_x **219**
Np 274
NP, Klasse 218
Nukleotid **219**
Nuklid 182
Null 10
Nullpunkt 150, 153, 269
Nutzung von $E = mc^2$ **87**

O

O_2 **37, 55, 69, 111, 149, 219**
  Erzeugung von Pflanzen 61
Oberfläche 29, **31**
Objekt 218, 256, 260
Ockhamsches Rasiermesser 278
Oe **135**
Oersted 127, 133, 136, 233
OERSTEDT, HANS CHRISTIAN 127, 136
OH^- **111**
Ohm 112ff, 232f
OHM, GEORG SIMON 112
Ohmsches Gesetz 110, 112, 122
Ohr **75**
Ökologie 266, 276
  von Daten 281
  Prozeß **37**
Oktan **159**
Oktave 44
Öl **31, 77, 91,** 92, **93, 155, 215**
  Diffusionspumpe **69**

Samen **61**
Vorrat **33**
Olivenöl **91, 93**
OMM 255
Operationalismus 253
Operationen/Sekunde 200
Operationsgedächtnis **195**
Opfergaben 17
Optik **209**
Optimierung
Nachrichtentechnik 196
optisches Gerät 208
Orchester **73**
Orchide **55**
Ordinal-Skala 268
Ordinalzahl 6
Ordnung 255
Ordnungsbegriff 278
Organ
menschliches **31**
organisches Leben **149**
Orionnebel **63**
Orkan **47**
Osmose **69,** 94
Österreich 185
Ostsee 184, **185, 193**
Oszillograph **37,** 99, 108
Otto-Motor 78, **79, 215**
ounce 58
Oxid-Katode **103**
Ozean **73**
Dampfer **47**
Ozon, Reizung durch **63**

P

P (Phosphor) **93, 185**
Pa **69, 213**
Pantoffeltierchen **79**
Papier **155, 159, 167, 215**
Bild **205**
Kondensator **123**
paradigmatische Funktion 280
Paradoxie 46
Paraffin **117**
Parallaxe 24
Paramagnetismus **81, 143,** 129, **149**
Paranuß **193**
Parsec 24, **25,** 225
Partikel im Magnetband **33**
Pascal 68ff, 212, 229, 274
PASCAL, BLAISE 68
Pb-Akku **215**
PbO **79**
PbTl **111**
PC **201**
PCI-Bus **201**
Pé 28
PEANO, GUISEPPE 246
Peano-Axiom 250
Pech **91**
peck 34
Penningmanometer **69**
Pentagramm 249
Pentanol **91**
Periodendauer 41
Periodizität 35
Permeabilität 97, 129f, 142, 233
magnetische **143**
Varianten 144
Permittanz 130
Permittivität 124, 233
Permutionsgruppe 267
Person **73**
Personal-Computer **219**
Personenzug **51**
Petroleum **89, 91**
Petroleumlampe **161, 169**
PETRUS PEREGRINUS 126, 127
Pfeil-Paradoxie 46
Pferd **79**
Pferdestärke 72
Pflanze **47, 53, 61, 63, 69, 73, 167, 173, 195**
Lichtmenge 172
magnetische Felder **135**
windende **43**
Öl **91**
Wuchs **47**
Pfund 58
pg **55**
Phasengeschwindigkeit 48
Phenol **91**
Phon 211, 274
phon 69, 75, 213
Phosphor (P) **93, 185**
Phot 170, 237
Photo
-CD **203**
Chromie **85**
Graphie **85,** 168, **189,** 208
Grenze **85**
Lampe **169**
Lumineszenzdosimeter **189**
Material 180
Meter 165, 168
Meterwürfel 165
Metrie 84, 160ff, 236f

Größen 163f
Papier **85, 173**
Platte **87**
Polymer **85**
Synthese **37, 75**
Tropismus **173**
Zelle 165, **215**
Photon 48, **55, 73**
Photonenära **37**
photopisch 162
Physik **207,** 221, 246, 255ff, 271
klassische Grenze **87**
physikalische Größe 3, 19, 22, 257, 257ff, 271
physiologische Wirkung von Strahlung 84
physische Welt 252, 253, 254
Relation zur Mathematik 253
Pi 208, **209, 219,** 252
Pica 28
Pied 28
Piezoelektrik 66
Pille **55**
pint 15, 34
pitch 204
PLANCK, MAX 74, 272
Planck
-Formel 74
-Länge **25,** 272
-Masse 272
-Zeit **37,** 272
Plancksche Konstante 42, 272 (s.a. Plancksches Wirkungsquantum)
Plancksches Maßsystem 272
Plancksches Wirkungsquantum 106, 128, 226
Planet **25, 55**
Planimeter 29
Plantensystem **63**
Plasma **47,** 110
Brenner **77, 99**
Kanone **67**
Panel **167, 175**
Plast **33, 69, 117, 155**
Platin (Pt) **89, 143**
Plattenkondesator 121
Plattenspeicher, optischer **195**
Platz
öffentlicher **171**
Pleuel **51**
Plumbicon **169**
Pluto **51, 73**
Plutonium **185**
Pm **183**
Pneumatik **69, 85**
Po **185**
Poise 90, 229
POISEUILLE, JEAN LOUIS MARIE 90
Polareis **33**
Polarisation
magnetische 131
Polarographie **63**
Pole der Erde **33**
Polieren **47**
Politikberatung 281
Polstärke
magnetische 127
Polyethylen **69**
Polystyrol **125**
Pore **25**
Porzellan **215**
Postkarte 30, **31**
Postkutsche 47
Potential 104, 108
Potentiometer 114
pound 68, 275
poundal 66
ppb **219**
ppm **219**
ppt **219**
Präparat von 1 mC (Strom) **99**
Pressen 70
Prime 44
Prinzipien der Mechanik 65
pro-Kopf-Verbrauch **53, 61**
Probleme des SI 274f
Produkt **37**
Produktion 52
Programme 283ff
für Rechner **195**
Projektionslampe **167**
Propanol **91**
Propellerflugzeug **47, 213**
Proportionalzähler 190
Proton **37, 55**
Protostern **63**
Protozoen **193**
Prozent 216, 274
Prozeß 255
geologischer **37**
Prüfen 256
Prüftechnik **105**
PS 72, 73, 231
psychologischer Zahlenbereich 246, 249ff
PtCo **135**
Pulsar **43, 73, 81**
Pulverkern **135**
Pumpe **53, 69**
Punkt

Dichte 202
typographischer 28
Pupillenweite 166, **167**
PVC **159**
Pyknometer 62
Pyramide **33**
Pyrometer **149**

Q

QL-Birne **175**
Quadratgon 210
Quadratgrad 210
Qualität 267
qualitativer Fehler 279
Qualle **37, 47**
Quanten 42, 248
Effekt **105**
Energie **81**
-Hall-Effekt 114
Physik 36
Rauschen 108
Theorie 74, 226, 253
Quanten/s **167**
quantifizierte Beschreibung 1, 280ff
Quantifizierung 260f
Quantität 267
und Qualität 282
quantitativer Fehler 279
Quantor 247
Quark 27
quart 34
Quarte 44
Quarter 58
Quarz 117
Quarzoszillator **43**
Quasar **73**
Quecksilber (Hg) **69, 79, 89, 91, 155, 159**
Quecksilbersäule 112
Querschnitt 29
Quinte 44

R

R **189**
Ra **185, 187**
Rad 181, 186ff
rad **209**
Radarantennen **209**
Radiant 208ff, **209**
Radio-Carbon-Methode 40
Radioaktivität **185, 193**
künstliche **193**
menschlicher Körper **183**
natürliche 182, **183, 185,** 188, 191, **193**
Radiodatierung 40
Radiointerferrometer **209**
Radiometrie 160ff, 236f
Radiostern **73**
Radiostrahlung **73**
Radioteleskop **209**
Radiowellen **43**
Raffinerie 75
Rakete **25, 51, 73, 213**
Triebwerk **67, 77**
Ranke **55**
Rasterdruck 202, **203**
Rate **201**
Ratespiel 196
rationale Betrachtung 278
Rauchen **193**
Raum 224f, 244
interstellarer **63**
Räume, radioaktive Klassen **183**
Raummeter 34
Raumwinkel 210, 236f
Rauschen
kosmisches **73, 109**
Quanten- 108
thermisches **73,** 108, 152
Rauschmaß 194
Rauschtemperatur 152
rd 139, **187**
Reaktion
chemische 60
phototrope **173**
Reaktor **77, 79**
luftgekühlter **77**
Realismus 252
Réaumur 151, 153, 235
RÉAUMUR, R.-A. F. DE 151
Rechenleistung **201**
Rechenmaschine 242
Rechner **195**
Recht 255
Rechteckigkeit 134
rechter Winkel 208
Reduktion 280
von Komplexität 278
Redundanz 278
Redwood-Sekunde 94
Reflexionsgrad 216
Regen 52, **53**
Regenbogen 162
Regenwurm **79**
Registertonne 34

Registriereinrichtung 259
Reibung 90
  Elektrizität 95
  Zahl 194
Reichweite **25,** 26, 186
  der Wechselwirkungen **25**
Reinheit **219,** 269
Reinkohlebogenlampe **167**
Reiz
  Art 21
  Leitung **47**
  Stärke 21
  Wahrnehmung **55**
Relais **113**
  eletromagnetisches **85**
Relationen 6, 217ff, **219**
relativistische Zeitabweichung 39
Relativitätstheorie 48, 56
Religion 17
Reliktstrahlung 86. **87**
Rem 192
rem/a **193**
Remanenz
  magnetische 129f, 137
Rennauto 50, **51**
Rennpferd **47**
repräsentative Befragung 281
Reproduzierbarkeit 17, 38
Ressource 52, 281
Restwiderstand 116
reversibel 39
Reynoldzahl 52, 92
Rhein **53**
RICHARDSON, LEWIS 26
Richtungshören **209**
Richtungszintillation der Erdatmosphäre **209**
Richtwert 2
Ricinusöl **91, 93**
Riechen 200
Riechen, Informationsfluß **201**
Riesenimpulslaser **75**
Riesenstern **25, 51, 63, 79, 81**
Riesenteleskop **209**
Rind **79**
  Fleisch **215**
Risiko 278
  Minimierung 267
Ritus, religiöser 17
Ritzprobe 268
Rm 34
Rockkonzert **213**
rod 28
Roggen **47**
Röhrenanode **75**
Röhrenelektrometer **113**
Rohrpost **47**
römische Zahlen 243
Röntgen 181, 188ff, 239
RÖNTGEN, WILHELM CONRAD 190
Röntgenaufnahme 190
Röntgenfilm **189**
Röntgenfluoreszenz **63**
Röntgenkinematographie **189**
Röntgenröhre **75, 105,** 178
Röntgenstrahlen 42, **43, 87,** 176, 178
rood 30
Rose 248
Rosenkreuzer 243
Rost **215**
Rotation 42
  der Erde **43**
  eines Neutronensterns **73**
  Erde um die Sonne **43**
  Geschwindigkeit **47**
RT **33,** 34
RUCKER 244, 246, 251
Rückwärtslauf, Film 39
Rügen **31**
Ruhe **79**
Ruhmasse 56
Rundfunk **81, 201**
Rütteltest 50

S

S **185**
S-Bahn **51**
Saarland **193**
Sack 59, 62
Salze **37, 63**
Samen
  trockener **79**
  Korn einer Orchide **55**
Sammler und Jäger **73**
Samplingoszillograph **37**
Samt **215**
Sand **155, 159**
  mariner 184, **185**
Sandzahl 250
Satellit **25, 51**
  Start 270
Sättigung
  Feldstärke 134
  Induktion **139**
  Magnetisierung 129f, 137
Saturn **51**
Sauerstoff (O) **93**

Säugetier **25, 195**
Sauggeschwindigkeit **47**
Saugkraft **69**
Säuren beim Mais **61**
SAVART, F. 96
Sayboldt-Sekunde 94
Scanner **203**
Schach **219**
Schaden
  Gehör 212
  Risiko 266
  Stoff **61**
Schaf **79**
Schall 42, 211
  Druck 60, 211f
    am Ohr **75**
  Geschwindigkeit **47, 149**
  Impuls 212
  Platte 202
  Quelle **73**
    Leistung 71
  Schutz 212
  Wahrnehmung **73**
Schaltjahr 40
Schätzen 256, 263
Schaumstoff **63, 155, 159**
Scheffel 14
Scheiner-Grad 172
Scheinleistung 71
Scheinwerfer **161**
Schellackschallplatte **205, 207**
Schiff **73, 79**
Schilddrüse **183**
Schildkröte und Achilles 46
Schirmbild **189**
Schleimhaut **63**
Schleimpilz **47**
Schleusenspannung **105**
Schlicke 184, **185**
Schloßpark Tegel **31**
Schlußregeln 253
Schmecken 200
  Informationsfluß **201**
Schmelzenthalpie 88, **89**
Schmelzpunkt 151
  von C **149**
  von Hg **149**
Schmerz **99**
  Faser **47**
  Informationsfluß **201**
  Schwelle **75,** 212, **213**
Schmetterling **69,** 78, **79**
Schmieröl 92
Schnee **155, 215,** 248
Schnelltod **189**
Schnittgeschwindigkeit **47**
Schock 8
Schöpfer der Welt 282
Schottky-Diode **103**
Schottky-Sperrstrom **103**
Schraubenfeder **67**
Schreiben **171**
Schreibmaschinenbüro **213**
Schreibmaschinentext **207**
Schreien **73, 213**
Schritte/Sekunde 200
Schrittmacher **81**
Schrotrauschen bei Elektronenröhren **105**
Schütteltest 50
Schüttgut 32
Schwachstrom 106
  Technik **105**
Schwalbe **47**
schwarz **215**
schwarzer Körper 74, **161, 215**
schwarzes Loch 60, **63**
Schwarzschallplatte **203, 205, 207**
Schwärzung **189**
Schwarzweißfilm 162
Schwefelkohlenstoff **93**
Schwefelsäure **91, 93**
Schwefelsäuregehalt 62
Schwein **79, 215**
Schweißen **47, 99**
Schweiz **185, 193**
schwere Masse 54
Schwerefeld 49
Schwerkraft 66
Schwimmhalle **31**
Schwimmweltmeister **47**
Schwingkondensator **105**
Schwingung 41, **43,** 226
Schwungrad **89**
scotopisch 162f
Sediment **47**
Seele 255
Seemeile 27, 28, 225
Seenelke **47**
Seestern **47**
Segelflugzeug **69**
Sehen **171,** 200
  extrafoviales 166
  Informationsfluß **201**
  Feld **209**
  Grenze **169**
  Schärfe **139**
  Schwelle **75, 81**
    bei Nacht **75**

Seismik 50
Seite A4 **195**
Seitenlinienorgan bei Fischen 101, **103**, 108
Sekundärelektronenvervielfacher **99**
Sekunde 35ff, 221, 264, 275
  Musik 44
  Pendel 23
  Winkel 208, **209**, 210, 275
  Zeiger **43**
Selbstinduktion 140
Selektionszwang 277
Selen (Se) **105, 111**
  Gleichrichter **103, 113**
Sellafield **185**
  Verklappung **183**
Seltene Erden **135**
semipermeabel 94
Sendust **135**
Sensorik **201**
SEV **81**
SEV-Vidikon **171**
Sexualität 243
SHANNON, C.E. 196, 214
Shannon-Formel 198
Shannon-Theorie 202, 214
Shubnikov-Phase 101
SI 3, 16, 17, 272ff
  Probleme 274f
  Vorsätze 274
Si-Gleichrichter **215**
Si-Transistor **75**
Si_3N_4 **117**
Sicherheit 255, 270
Sicherheitsventil **213**
Sieben (Zahl) 246, 249
Siedeenthalpie 88, **89**
Siedepunkt **149**, 151
SIEMENS, WERNER 112
Sievert 191ff, 239
SIEVERT, ROLF MAXIMILIAN 191
Signalelektronik **77**
Signalplatte **169**
Silber (Ag) **79, 89, 93, 111, 155, 159**
  Photographie **85**
  Element **87**
Silicongummi **69**
Siliconöl **91**
Silizium (Si) **89, 93, 99, 103, 105, 111, 117**
  Diode **103**
  polykristallines **61**
Sinfonieorchester **73, 213**
Sinne
  Eindruck 279
  fünf 249
  Organ 259
Sinnhaftigkeit 280
SiO_2 **109, 117**
Sirius **33**
Skalen 19ff, 256
  logarithmische 21
  Typ 260f, 267ff, 280
Skatblatt 196
Skelett **79**
Skiurlaub **193**
SO_4 **79**
SOKRATES 255
Solarkonstante **75**
Solarzelle **31, 79, 215**
Sommer **75, 171**
sone 212
Sonne **25, 33, 37, 47, 51, 55, 61, 63, 73, 79, 81, 167**
  am Horizont **167**
  Einstrahlung **73**
  Element **89**
  Fleck **139**
  Gott 160
  Inneres **149**
  Jahr 8
  Korona **139**
  Licht **171**
  Oberfläche **75, 149**
  Zentrum **63**
Sonnenblume **53**
Sonnensystem **33, 37, 47**
Sophistik 243
Spaltzone **77**
Spannung
  elektrische 104ff, 105, 221, 233
  lebensgefährliche 106
  magnetische 131
  mechanische 229
  Messer 108
  Optik 66
  Reihe 104
  thermische **105**
  Waage 106
Spanplatten **155**
Speichel **53**
Speicher
  Dichte 202ff, **205, 207**
    lineare **203**
  Fähigkeit 78
  Kapazität 198
    im dRAM **123**
  neuronaler 199
  Oszillograph **37**
  Technik 199

Speicherung 80
Grenze **203**
magnetische **85**
optische **203**
von Information 86
Spektralfarben 162
Spektrum 45
elektromagnetisches 176f
Geschichte 177
Sperrstrom **99, 103**
Spiegelgalvanometer **99**
Spiele **219**
Spindelöl **91**
Spinmoment 128
Spiralfeder **67**
Spitzmaus **55, 73**
spontan magnetisiert 128
Sprache **73,** 211
Sprengstoff **87**
Sprungtemperatur 114
Spule 140, **141**
Energie **81**
Spur 202, **203**
Abstand 202, **203**
Sr **183, 185**
Stäbchen 166, **167**
Stadt **61**
große **25**
Stahl **33, 47, 53, 61, 69, 135, 155, 215**
Beton **69**
Feder 88, **89**
Guß **143**
weicher **143**
Star **69**
Starkstrom 106
Technik **105**
Netz **113**
Starten von Autos **51**
Statistik 261
Staub
Faden **47**
interstellarer **63**
Sauger 52, **53**
Staubecken Grande Diseense **33**
Stearinkerze **161, 167, 169**
Steinhaufen 6
Steinkohle **89**
Stellenwertsystem 7, 9ff, 243
Stellenzahl **219**
Ster 15, 34
Stereoradient 210, 221, 236f
Stern **25, 37, 47, 51, 55, 63, 73, 153, 219**
Bildung 83
Größenklassen 165
Himmel **167**
Licht **167**
magnetischer **139**
Reihe **79**
Strahlung **73**
Stilb 166, **167**
Stimmung
wohltemperierte 44
Stoff 82
Stoffmenge 52, 146
Stokes 94, 229
STONEY, G.J.S. 95
Störabstand 202
Störung
industrielle **109**
Stoßbelastung **51**
Stoßwelle 50, **51, 87**
Strahldichte 237
Strahlenbelastung **187**
Strahlendosis 188
Strahlenexponierter, Behandlung 188
Strahlenfluß 237
Strahlenschaden 177
Strahlstärke 237
Strahltriebwerk **213**
Strahlung **73, 87,** 236f
Arten 176
Äquivalent 162, 174
Empfänger 84
Formel 74
in 10 km Höhe **193**
Intensität 74
ionisierende 176ff, 221, **221,** 238ff
kosmische **43, 81**
Leistung 164, 239
natürliche **187**
optische 43
Straße **171**
beleuchtete **167**
Beleuchtung 170
Straßenbahn **99**
Streamer **195, 203, 205**
Streufelder **139**
Stroboskoplampe **167**
Strom
bei Neutronensternen **99**
Dichte
elektrische 101, **103**
kritische **103**
elektrischer, Wirkung 100
Stärke 97ff, 233
elektrische **99, 221**
Waage 98
-Wärme-Ersatzschaltung 154

Strömung 52
Struktur **25**
Stubenfliege **69**
Stunde 36, 40, 227, 246, 250
Sturm **47**
Styroflexkondensator **123**
subjektiv **201**
Substanz, strahlende **183**
Süddeutschland **185, 193**
Sumerer 8
Superikonoskop 171
Supernova **43, 73, 81**
Superorthikon **171**
Superweitwinkel-Optik **209**
Suppenteller 59
supraleitender Quanteneffekt **105**
Supraleiter **87,** 101, **105,** 114, **117, 135,** 136, **139, 149**
  Kontakt **113**
  Typ I und II **103**
Süßwasser **55**
Suszeptibilität, paramagnetische **149**
Sv/a **193**
Symbolik 242
Synapse **31**
System
  direktes **85**
  komplexes 247
  metrisches 15
  verstärkendes **85**
Système International 2, 272ff (siehe auch SI)
Szintillationszähler 180, 190

T

t **55**
t TNT **81**
Tag 36, 40, **75,** 227
Tagessehen **75, 167**
Taktzeit 38
Talent 14
Tannen **215**
Tantalelko **109**
Taschenlampe **99**
Taschenrechner **201, 219**
Taschenuhr **213**
Tasse 59
Tätigkeit 256
taubstumm 6
TB 198
Teelöffel 59
Teflon **187**
Teichmuschel **69**
Teilbarkeit 8
Teilchen
  Beschleuniger 179
  Energie **81**
  Fluenz 239
  künstlich beschleunigtes **81**
Teilchenflußdichte 239
Teilnehmeranzahl 263
Telefon **105**
Telefonanschlüsse **219**
Teleobjektiv **209**
Teleskop 208
Telex **201**
Temperatur 148ff, **149, 221,** 234ff, 275
  Angaben 259
  beim Urknall **149**
  des Weltalls **149**
  Differenz 150
  Eichung **149**
  Empfinden **73**
  für Bildung der Elemente **149**
  kritische 70
  reziproke 234f
  Skala 266
  tiefste vom Menschen **149**
  Wellen 156
Templer 243
Tennisball **51**
Terpentinöl **91**
Tesla 133, 137f
TESLA, NICOLA 137
Testen 256
Text **205**
THALES 95
Theorie 246
  Innovation 280
Therapie 110, 179, **187**
  intercavitäre **183**
Thermodynamik 39, 224, 273
Thermoelement **79, 105, 149**
thermographisches Verfahren **85**
Thermolumineszenzdosimeter **189**
Thermometer 148
  absolutes **149**
Thermoplastik **85**
Thermoskop 151
Thorax-Aufnahme **187**
Thorium (Th) **37**
Thunfisch **47**
Thyristor **117**
Tiefsee-Sediment **47**
Tieftemperaturphysik 153
Tierpark Berlin **31**

TiO_2 **117**
Titan (Ti) **149, 185**
Titanat 124
Titanweiß **215**
Titer tex 64
Toaster **139**
tödlich **79, 187, 189, 193**
Toilettenspülung **33**
Tokamak-Strom **99**
Tomographie 136
Tonabnehmer **51**
Tonband 202
Tonne 58, 229
Torf 89
Torr 68, **69,** 70, 229, 274
Torsion 71
  Feder **67**
  Schwingung 90
tpi 202, 204, 241
Trafoverlust **79**
träge Masse 54
Träger
  mechanischer 206
  Rakete **73**
Tragkraft **69**
Transformator 101, **103, 139,** 142
Transistor **31, 75,** 94, **113, 117,** 156, **187**
  minimaler **73**
Traumdauer **37**
Triaden 243
Triebwerk **67, 77**
Trilliarde 250
Trillion 250
Trinkmilch 184
Trinkwasser **53, 193**
Tripelpunkt 150
Tritium **183, 185**
TRK-Wert 266
Trog, elektrolytischer 108
Trommelfell **31**
Tschernobyl 178, 184, **185, 193**
  Totalausstoß **183**
TTL-Technik **187**
Turbogenerator **79**
Turbulenz 52
Turingmaschine 253
Typographie 28

U

U **185**
u **55**
U-Bahn **51, 213**
Übelkeit **187, 193**
Übergangssehen **167**
Übergangswiderstand 112
Überlandleitung 107
Überriese **25, 51, 79**
Überschallflugzeug **47**
Überschrift **203**
Übertragung
  Kanal 200
  Modell 196
Uhr 16
  magnetische 40
  Zeiger **43**
UKW **43**
UKW-Spulen **141**
Ulbrichtsche Kugel 168
Ultrahochvakuum **69**
Ultrakurzzeitspektroskopie **37**
Ultraschall 42, **51, 75**
Ultrazentrifuge **43,** 50, **51**
Umdrehungen 41, **43,** 227
Umgang
  mit Radioaktivität 182
  mit strahlenden Substanzen **183**
  mit Zahlen 245
Umgangssprache **219**
Umlauf
  Bahn **47**
  Geschwindigkeit der Sonne in Galaxis **47**
  Zeit **37**
Umrechnungsvorschrift 224
Umweltschützer 80
Umweltstrahlung **189**
Unbestimmtheit 278f
unendlich 244, 251
unentscheidbar 247, 253
Unglückszahl 1
Unciae 14
Universalisierung 260, 269
Universum **37**
  geschlossenes 63
  offenes **63**
Unschärfe 218, 278
  Heisenbergsche 279
unscharfe Menge 265
Unschuld 269
Unter den Linden **31**
Unterhaltung **213**
Unterlage 206
unterscheidbar 247, 251
  Töne 44
unvorstellbar 251
Uran **81**
Uranatom **55**

Uranus **51**
Urheberrecht 270
Urkilogramm 15, 54, 275
Urknall **37,** 38, **63,** 64, 86, 153
Urmeter 15
Urteilen 256
USA **53**
Uterus-Perlen **183**

V

Vakuum **69, 125**
  Blitz 168
  im Labor **63**
  Physik 68
  Pumpe 52, 68
Validierung 260, 269
van der Waals-H-Brücken **81**
Varistor **117**
VENERABILIS, BEDA 6
Venus **51, 69, 73**
Veränderung der Elektronenhülle **149**
Verbrennung **75**
  Temperatur 214
Verdunstung **53**
Verfahren **85**
Vergleich 3, 5ff
Verhalten 278
Verhältnis-Skala 268
Verhältniszahl 194, 214
Verklappung 182, **183, 193**
vermessene Welt 277ff
Verschiebung
  Dichte 233
  elektrische 124
verseuchtes Gebiet 182
Versionsnummer 284
Verstärkerendstufe **215**
Verstärkerfolie **189,** 190
Vervielfacher **99**
Verzögerungszeit 38
Vesicularverfahren **85**
Vibration **51**
Videorecorder **203, 205, 207**
Vidikon **85, 169, 171**
Vieh **53**
Violine **73**
Virus **25, 195,** 247f
vis vitalis 65
Viskosimeter 90
Viskosität 224, 226ff
  dynamische 90ff, **91**
  kinematische 92ff, **93**
Voet 28
Vogel **135, 139**
Vollmond 165, **167, 171**
Vollständigkeit 248
Volt 104ff, 232f
VOLTA, ALESSANDRO 104
Volta-Säule 104
Voltmeter
  ballistisches 138
Volumen 32ff, **33, 221**
  Fluß 52ff, **53,** 60, **221,** 224, 226f
  Messung 263
  Speicherdichte 206ff, **207**
Vorsätze des SI 250, 273f
Vorschaltdrossel **141**
vorstellbar 246
Vorstrom
  dunkler **99**
Vorvakuumpumpe **53**
Vorwissen 252
Vulkanausbruch **81**

W

W/m^2 **213**
Waage 17, **55,** 56
Wachs **159**
Wachstum 46, **47**
Wägen 256
Wahrheiten
  notwendige 252
Wahrnehmbarkeit **99**
Wahrnehmung 5ff
Wahrscheinlichkeit 217, **219,** 251, 265
Währung 274
WALLOT, JULIUS 272
Walöl **91**
Wälzkolbenpumpe **69**
Walzstahl **215**
Walzstraße **139**
Wämeleitfähigkeit 155
Wanderfeldoszillograph **37**
Wandverschiebung 128
Wannenbad **33**
Warmblüter **75**
Wärme 148
  Äquivalent 80
  Austausch 150
  Informationsfluß **201**
  Kapazität 154, 158, 235
    spezifische **159**
  Konvektion 157
  Kraft **73**

Lehre 214, 273
Leitfähigkeit 154, 235
Leitungsrohr 157
Menge 150, 154, 158, 221, 229, 231
Schmerzschwelle **75**
Senke 156
Strahlung 157
Strom 231
Dichte 235
-Strom-Ersatzschaltung 154
Übergangszahl 235
Wasser **47, 91, 93, 111, 117, 125, 143, 155, 159, 209, 215, 249**
Abgabe **61**
auf der Erde **63**
Dampf **93, 159**
Kraft **89**
Leistung **73**
pro-Kopf-Verbrauch **33**
Säule 70, 229 27,4
Tropfen **33**
Turbine **215**
Verbrauch 52, **53, 61**
einer Millionenstadt **61**
Zähler 52
Wasserstoff (H) **55, 81, 111, 155, 159**
Bombe **81,** 83
Triebwerke **67**
Verbrennung **89**
Watt 71ff, 224, 229, 231ff, 237ff
WATT, JAMES 71
Watte **155**
WEBER, WILHELM EDUARD 133, 271
Weber-Fechnersches Gesetz 21, 212
Wechselstrom 98
Wechselwirkung 27, **37**
schwache **25**
starke **25**
Weglänge
freie 26
Wegschneiden 278
Weinbergschnecke **47**
weißer Riese **81**
weißer Zwerg **25, 51, 63, 79**
Weißsche Bezirke 128
Weizen **215**
WEIZENBAUM, JOSEPH 38
WEIZSÄCKER, C.F.v. 252
Wellen **43**
Länge 26, 42, 226
Theorie 211
Welt **37, 219,** 242ff, 254
Anschauungen 252
Bevölkerung **219**
Bild 252
Buchproduktion **201**
endliche 246
Energiebedarf **73, 81**
in Zahlen 252ff
Krieg, Zweiter **81**
Meer **33**
Wasser **37**
Modell **63,** 82
Produktion **61**
an Holz **53**
Verbrauch **33, 53**
vermessene 277ff
Weltvorrat
Gas **33**
Öl **33**
Wissen **195, 201**
Weltall **25, 33, 55, 81, 87, 123, 149, 219**
Ausdehnung 26
Expansion 64
Masse 57
Wendel bei Glühlampe **77, 167**
Werkhalle **31**
Werkstoffprüfung 179
Werst 28
Wert
theoretischer 265
Weston-Normalelement 104
Whisker **69**
Wichte 62
Widerspiegelung 252ff, 278, 280
Widerspruch 247
Widerstand **149,** 233
Arten 114
elektrischer 112ff, **113, 221**
induktiver 132
kapazitiver 122
spezifischer 115, 116ff, **117,** 130
Widerstandsschweißen **99**
Wiederaufbereitungsanlage **183, 193**
Wiederholbarkeit 38
Wiegen 255
WIENER, NORBERT 82, 198
Wilson-Kammer 180
Wind **31, 89**
Kanal **213**
Stärke **47**
Windung **141**
Zahl 132, 140, 194, 274
Winkel 208ff, **209, 221,** 273, 275
Geschwindigkeit 42
rechter 208
Winter **171**
Wirbeltier **55**

Wirkleistung 71
Wirklichkeit 217f, 251, 278
Wirkung 65
  elektrolytische 97
  physiologische 84, 88
  Quantum, Plancksches 106, 128, 226 (s.a. Plancksche Konstante)
  Querschnitt 29, **31**
Wirkungsgrad 214, **215,** 236
Woche 40
wohltemperierte Stimmung 44
Wohnen am Kernkraftwerk **193**
Wohnraum **171**
Wohnung **31, 139, 213**
  Heizung **215**
Wolframlampe **169, 175**
Wolke **61, 73, 105**
Wolle **155,** 270
WORM **205, 207**
Wort 198
Wortschatz **219**
Ws **81**
Wurzel **47, 79**
Wurzelausscheidung **61**
Wurzelknolle **61**
Wüstenpflanze **69**

X

X-Einheit 27
XE 225
Xe-Hochdruck-Stroboskoplampe **167**
Xenon (Xe) **69, 143**

Y

yard 28, 30, 275

Z

Zähigkeit 90
zählbar 256
zählen 3, 5ff, 41, 244, 246, 255f, 277
  mit Fingern 7
Zahlen 1, 2, 217ff, **219,** 242ff, 260
  Begriff 5
  Bereiche 217f, **219,** 245ff
  Besessener 24
  Friedhof 270
  Gefühl 5
  Gerade 251
  Gläubigkeit 244
  größte 244, 246
  heilige 1
  irrationale 246
  Kontinuum 245
  Loschmidtsche **219**
  Mystik 243
  mystische Seite 1
  römische 243
  System 8f, 243
  Theorie 242, 244, 246
  Umgang mit 245
  Welt 252, 277
  Wert 259, 262
    Gleichung 258
  Wort 9
  Zeichen 243
Zählsysteme 11, 12
  Geschichte 11
Zählwert 274
Zäpfchen 166, **167**
Zehen 6
Zehn-Finger-Flip-Flop 250
Zehnerpotenz 243
Zeichendichte 204
Zeichensprache 6
Zeigerausschlag 271
Zeigerinstrument 98, **99**
Zeilen/mm 202
Zeilenfrequenz **109**
Zeit 35ff, **37, 221,** 226ff
  absolute 38
  Abweichung
    relativistische 39
  Auflösung **37**
  Empfinden 38
  Fluß 35
  Messung 35
  Pfeil 38
  subjektive 38
  Verhältnis **219**
Zeitung 202
Zelle **47**
  biologische **25, 33, 55, 61, 139**
  Membran **25**
Zement **61**
  Fabrik **75**
ZENON 46
Zentimeterwellen **43**
Zentner 58
Zentrifugalbeschleunigung **51**
Zerbrechen **69**
Zerfall 182, 238
Ziegel (Maß) 13

Ziegelstein **155**
Ziffer 243ff
Zimmertemperatur **105**
Zink (Zn) **79, 87, 89**
Zinn (Sn) **111**
Zitteraal **99, 105**
ZnO **117**
ZnS **111**
Zoll 13
Zollstock 17
Zucker **61, 93**
Zug 68
Züge im Spiel **219**
Zugfestigkeit **69**
Zugriff, sequentieller 202
Zündkerze **105**
Zungenfrequenzmesser 41
Zustände **219**
  unterscheidbare 251
Zuwachs der Menschheit **61**
Zuwachsrate **201**
Zweierschritt 194
Zwerg **79**
Zyklotron 178

100 m-Läufer **47**
^{14}C-Strahlung **187**
50 Hz **43, 81, 139**

Wie groß ist das Weltall, wie klein ein Atom? Wie alt ist die Erde, wie schnell der Flügelschlag eines Insekts? - Messen bedeutet stets zu vergleichen. Mit Maßen für Länge und Zeit, Masse, Strom und Temperatur oder für Strahlung jeglicher Art. Und - mit Geräten, deren Vielfalt und Präzision verführen, den letzten noch unbekannten Winkel unseres Universums auszuloten, in Zahlen zu fassen.

Werden wir darum klüger? Verstehen wir unsere Welt und den Sinn unseres Seins in einer Sintflut anscheinend zusammenhangloser Maße und Zahlen? Messen als Ausdruck verständlicher Neugier, „hinter die Dinge" schauen zu wollen - oder Zahlen als Fetisch?

Das Buch bietet Übersicht an : Über Maße und deren vielfache Bedeutung, über Zusammenhänge zwischen den Maßen sowie über unser Wissen, das zwischen den jeweils größten und kleinsten Zahlenwerten eines jeden Maßes angehäuft ist.

Horst Völz lehrt an der Technischen Universität Berlin, **Peter Ackermann** lebt als freier Wissenschaftspublizist in Caputh bei Potsdam.

ISBN 3-86025-118-X
9 783860 251188