

I. Das könnte die Realität sein

1. Vom Ich zur Realität

René Descartes führte grundlegend den Zweifel ein. Lange zuvor hatte schon Sokrates bei den „Besserwissern“ mit kritischen Fragen etwas Ähnliches versucht und erlitt dafür freiwillig den Tod. Descartes kam dagegen schließlich zum Ergebnis:

„cognito ergo sum“: Ich denke (zweifle H.V.), also bin ich.

Im Sinne des Zweifels sei nun für die weitere Betrachtung ganz allgemein festgelegt:

1. Auf jede Frage gibt es nur entweder *Ja* oder *Nein* und damit kein Drittes¹.

Als erste Frage folgt so: Existiert etwas vom Ich Unabhängiges? Die zwei möglichen Antworten lauten: **Ja**: Etwas, was ich die **Realität** nenne oder **Nein**: Nichts, nur ich existiere allein. Für die Realität ist dann weiter zu fragen: Ist sie stofflich-energetisch (materiell)? Bei **Ja** gilt: Sie ist physikalisch-chemisch und bei **Nein**: Alles beruht nur auf unserem Denken und unseren Gedanken. Dann folgt aber ein *circulus fisiosus*, ein in sich geschlossener, endloser Teufelskreis der Rückbezüglichkeit. Daher kann es keine **Letztbegründung** geben. Bereits Platon fragte deshalb in seinem Theaitetos „Was ist Erkenntnis?“ und ließ Sokrates darauf antworten:

„Wir kommen an einen Punkt, wo wir nicht weiter machen können, also werde ich eine Geschichte erzählen“.

Doch jede hierfür erdachte erzwingt Schöpfungslegenden, Mythen oder Ähnliches. Die Realität muss also materiell sein. Dafür ist wieder ein universell gültiges Gesetz sinnvoll oder gar notwendig.

2. Für die Realität existieren immer (jederzeit) und überall (an jedem Ort) die gleichen Regeln und Zusammenhänge (Gesetze). Das wird als **Ständigkeit** bezeichnet.

Doch was sind Raum und Zeit? Genauer hierzu wird im Abschnitt 3.2 erklärt. Jedoch vier Wochen vor seinem Tod (1955) schrieb hierzu Albert Einstein:

Für uns gläubige Physiker hat der Unterschied von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur den Charakter einer wenngleich hartnäckigen Illusion ... Zeit ist nicht ein unabhängig Seiendes, sondern eine Ordnungsform der Materie.

Dabei ist zu beachten, dass Materie² unterschiedlich benutzt wird. Philosophisch und wohl auch bei Einstein besteht sie aus Stoff mit der Masse m in Gramm g und der Energie E in Joule J. Doch leider wird häufig statt Stoff wiederum Materie oder Material benutzt. So ergibt sich die Einteilung von **Bild 1**. In ihm ist auch die mögliche Umwandlung zwischen Stoff und Energie gemäß $E = mc^2$ ausgewiesen, wobei c die Lichtgeschwindigkeit und m die Masse (Menge des Stoffes) sind. Die Masse ist damit auch ein Energieträger.

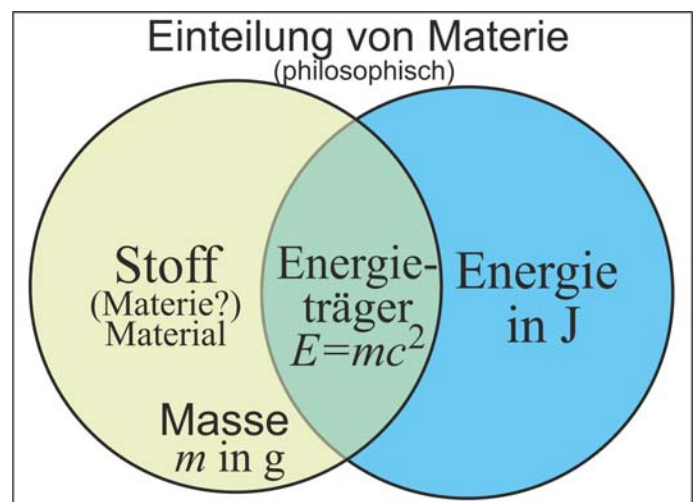


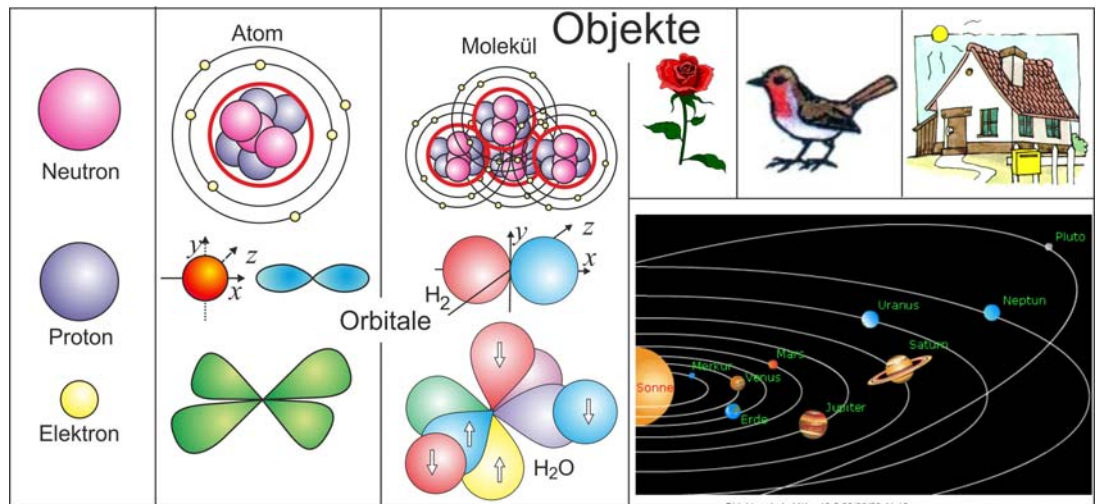
Bild 1. Zu den Begriffen Stoff mit der Masse m , Energie, Materie und Energieträger.

¹ Auf Grenzen hierzu, wie etwa Paradoxien usw., wird im Abschnitt ### eingegangen.

² Lateinisch materia Stoff. Jeder Stoff (jede Substanz) wird unabhängig vom Aggregatzustand so bezeichnet.

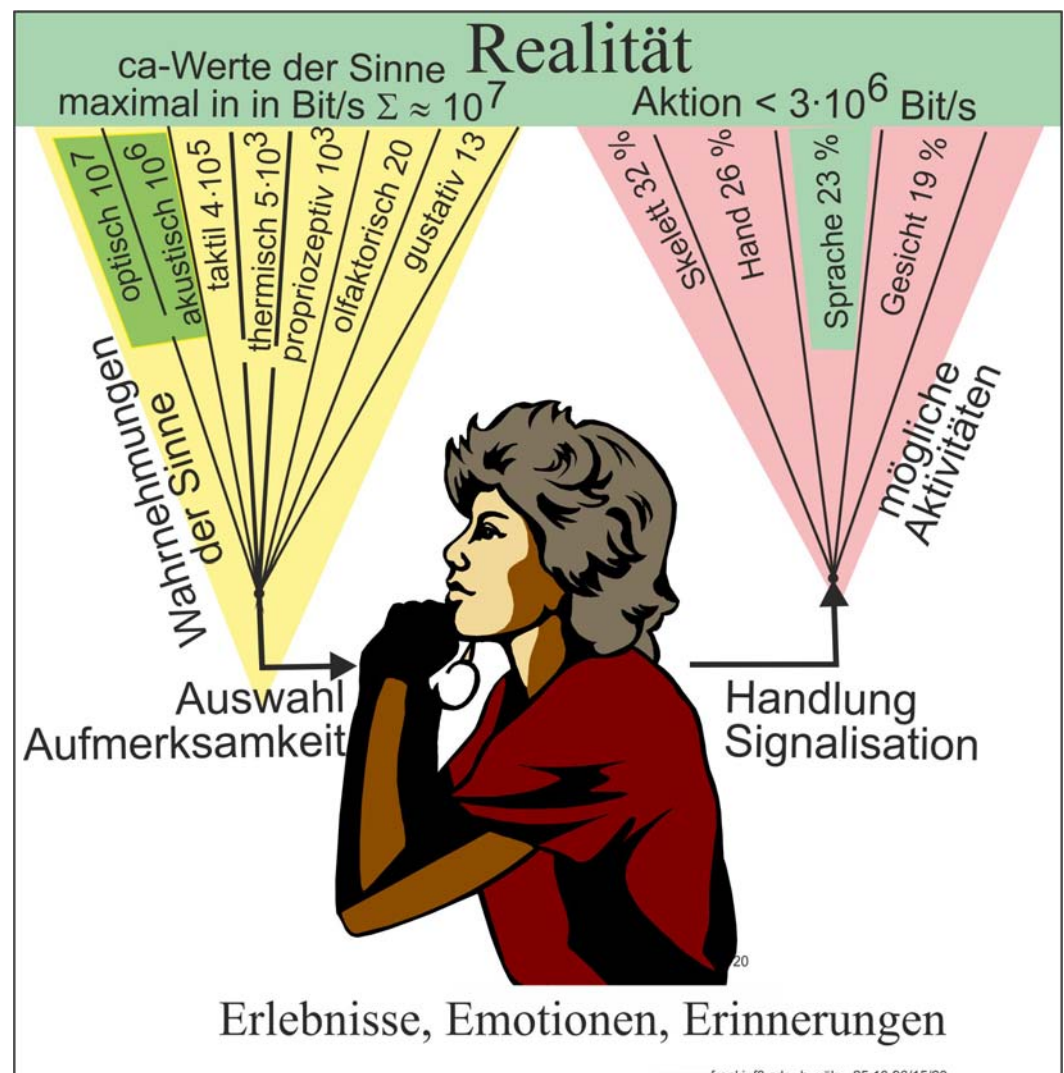
Die **Energie** kann **Änderungen** bei physikalisch-chemischen Einzelheiten der Realität hervorrufen. Sie können erheblich von dem Ort und der Zeit abhängen. Deshalb muss die Materie nicht dicht, also lückenlos vorliegen. So sind **Objekte** möglich, die allseitig abgegrenzt und dadurch grundlegende Elemente des Stoffes sind und eine Struktur der Realität erzeugen. Beispiele zeigt das **Bild 2**. Dazu gehören auch Atome, Kristalle, Steine, Berge, Flüsse, Seen, Pflanzen, Einzeller, Tiere, Menschen, Geräte, Gebäude, Planeten, Sterne, usw. Für weitere Betrachtungen sind die Eigenschaften der Objekte wichtig. Auf sie wird genauer bei der Messung im Abschnitt 2.1 eingegangen.

Bild 2. Einige Beispiele für Objekte.



Vieles hiervon erfahren wir mittels unserer Sinne, deren Möglichkeiten **Bild 3** zusammenfasst. Einige Objekte können wir unmittelbar sehen, hören, schmecken, riechen oder fühlen und ertasten. Auf einzelne Objekte können wir einwirken und so weitere Veränderungen erzeugen. Um große Objekte können wir herumgehen. Weitere Details enthalten auch [Sch93] und [Völ99]

Bild 3. Möglichkeiten für das Wahrnehmen und Handeln des Menschen. Geändert nach [Fra69].



Die so gewonnenen Ergebnisse können zuweilen auch beträchtliche Fehler enthalten. Das belegte bereits Platon (um 428 bis ca. 347 v. Chr.) mit seinem Höhlengleichnis. Es befindet sich im siebenten Buch „Der Staat“ (Politeia). Dafür benutzt er einen Dialog mit seinem erdachten Schüler, der so beginnt:

Stelle dir nämlich Menschen vor, in einer höhlenartigen Wohnung unter der Erde, die einen nach dem Lichte zu geöffneten und längs der ganzen Höhle hingehenden Eingang habe. Menschen, die von Jugend auf an Schenkeln und Hälsen in Fesseln eingeschnitten sind, so dass sie dort unbeweglich sitzen bleiben und nur vorwärts schauen, aber links und rechts die Köpfe wegen der Fesselung nicht umzudrehen vermögen. Das Licht für sie scheine von oben und von der Ferne von einem Feuer hinter ihnen; zwischen dem Feuer und den Gefesselten sei oben ein Querweg; längs diesem denke dir eine kleine Mauer erbaut, wie sie die Gaukler vor dem Publikum haben, über die sie ihre Wunder zeigen.

Diese Menschen erleben hier nur die Schatten als ihre „Realität“ (**Bild 4**). Doch wenn dann einer freikommt und umhergehen kann, so erkennt er etwas ganz Anderes. Doch davon wird er kaum die weiterhin Gefesselten überzeugen können. Noch extremer wird der Unterschied, wenn er gar der Höhle entkommt und ans Tageslicht gelangt.

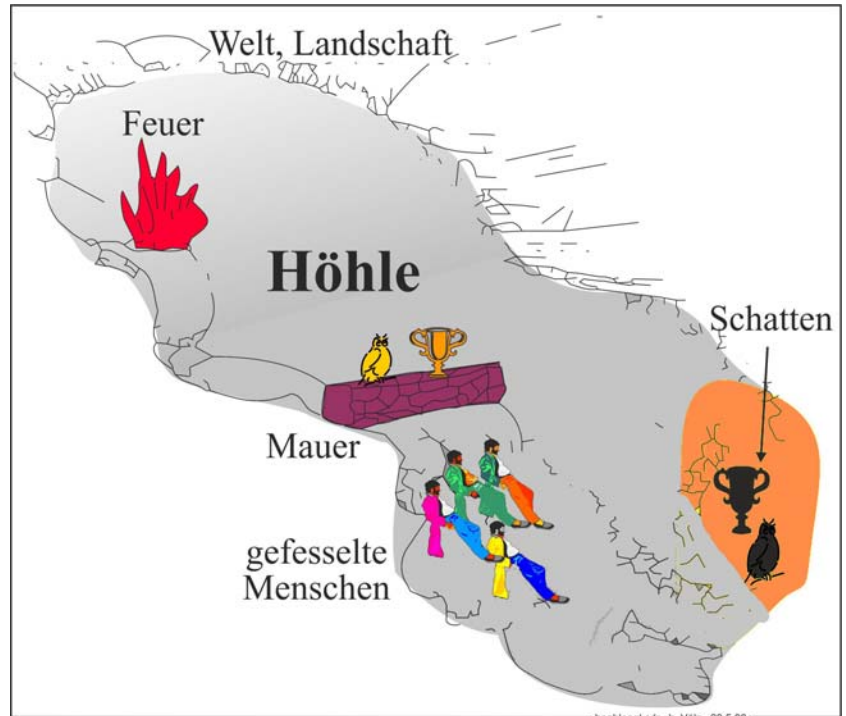


Bild 4. Zum Höhlengleichnis.

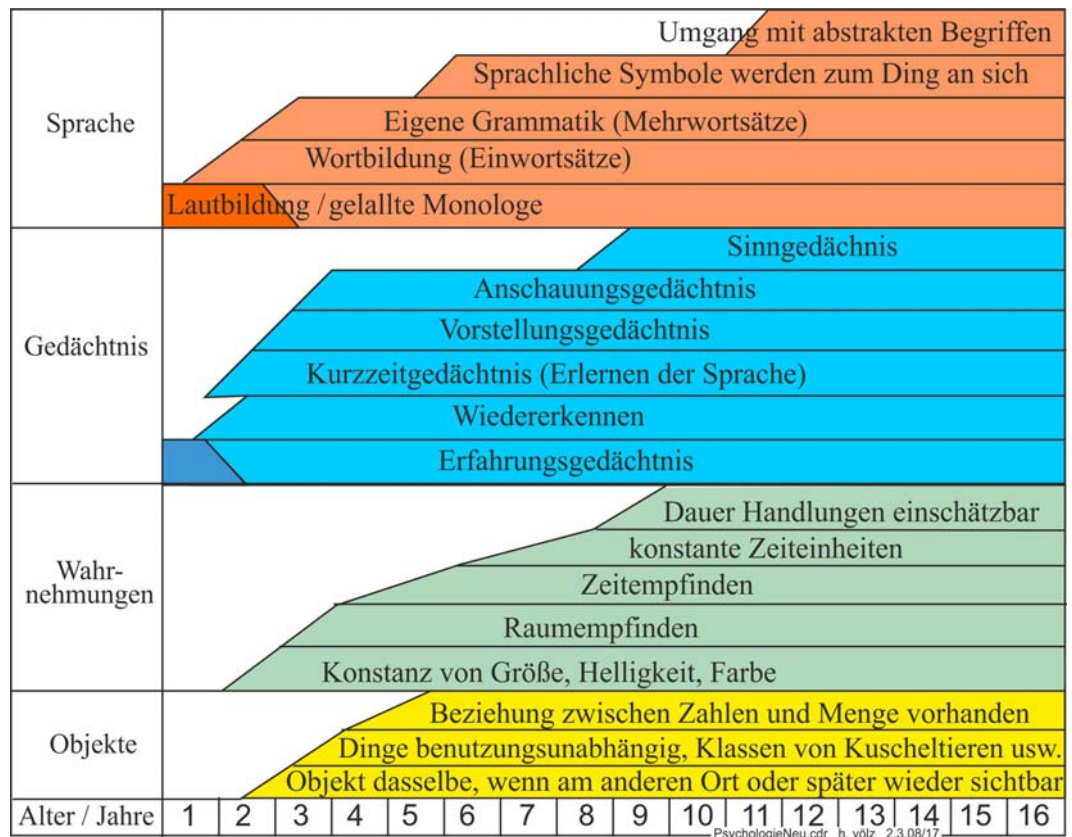
Die erfahrbaren Erkenntnisse über die Realität hängen also weitgehend von den jeweils vorhandenen Wahrnehmungs- und Handlungsmöglichkeiten ab. Daher werden z. B. Viren, Insekten, Mäuse, Löwen und Menschen deutlich unterschiedliche „Realitäten“ erfahren. Entsprechend der fortlaufenden Entwicklung neuer (technischer) Untersuchungsmethoden (s. Abschnitt ####) änderte sich auch ständig das Bild der Menschheit über die Realität. Woher wissen wir dann aber, dass unsere jetzigen Kenntnisse voll oder zumindest weitgehend mit der Realität übereinstimmen? Andererseits wissen wir noch kaum etwas über die dunkle Masse und Energie! Dennoch dürfte der Kenntnis-trend vorwiegend in Richtung zur Realität geschehen sein und sich weiter vollziehen. Bezüglich der Evolution können wir weiter folgern, dass die jeweilige Ausstattung mit Wahrnehmungs- und Handlungsmöglichkeiten für alle Lebewesen – teilweise sogar für Objekte – bestmöglich für ihr eigenes Fortbestehen erfolgte. Das ergibt sich u. a. aus der biologischen Grundregel von Haeckel. Dafür hatte bereits 1926 Karl Ernst von Baer erkannt, dass frühe Entwicklungsstadien verwandter Organismen einander ähnlicher sind als die ausgewachsenen Individuen. Dennoch wird diese Grundregel heute oft als erhebliche Vereinfachung betrachtet. Im Kontext der Begriffe Phylogenese³ als stammesgeschichtliche Entwicklung einer Art und der Ontogenese⁴ als individuelle Entwicklung eines Lebewesens wurde die Regel 1866 von Haeckel eingeführt. Der Zusammenhang besteht z. B. für die Entwicklungsstadien, beginnend mit der Keimentwicklung bis zum voll entwickelten adulten Lebewesen. Dabei sind aber auch Rückbildungen möglich. Wiederholt werden also nicht die Adultstadien, sondern die frühen Embryonalstadien einer Art. Das kann dadurch erklärt werden, dass evolutionäre Neuentwicklungen immer auf bestehende Arten und damit auf bestehende Organsysteme aufbauen. Daher schließt die Entwicklung (Ontogenese) des Individuums

3 Phylogenese altgriechisch φύλον phýlon Stamm und γένεσις génesis Ursprung. Hierzu gehört meist der Baum der Verwandtschaften in der biologischen Systematik.

4 Ontogenese altgriechisch ὀντογένεσις; aus altgriechisch ὄν von das Seiende und altgriechisch γένεσις génesis Geburt, Entstehung.

einer Art auch die vorher jeweils bereits vorhandenen Schritte mit ein. Beispiele einer solchen Wiederholung sind das Auftreten eines Kiemendarms und von Kiemenspalten bei allen Wirbeltierembryonen. Das belegt: Alle heutigen Wirbeltiere stammen von den Fischen ab. Bartenwalembryonen bilden Zahnanlagen, während die adulten Individuen keine Zähne mehr haben. Folglich haben sich die Bartenwale aus Zahnwalen entwickelt. Haeckel war sogar davon überzeugt, dass sein Gesetz nicht nur auf Pflanzen und Tiere, sondern auch auf den Menschen und das menschliche Seelenleben übertragbar seien. Hierbei passt auch gut die individuelle Entwicklung zu einzelnen Leistungen, die sehr gründlich bei Kindern untersucht wurden und stark vereinfacht in **Bild 5** zusammengefasst wurden [Oer98].

Bild 5. Die kindliche Entwicklung der Wahrnehmungen, des Gedächtnisses und der Sprache.



Entsprechend den obigen Vergleichen lässt sich dieses Ergebnis auch recht ähnlich auf die Entwicklung der Menschheit übertragen und führt dann etwa zum **Bild 6**.

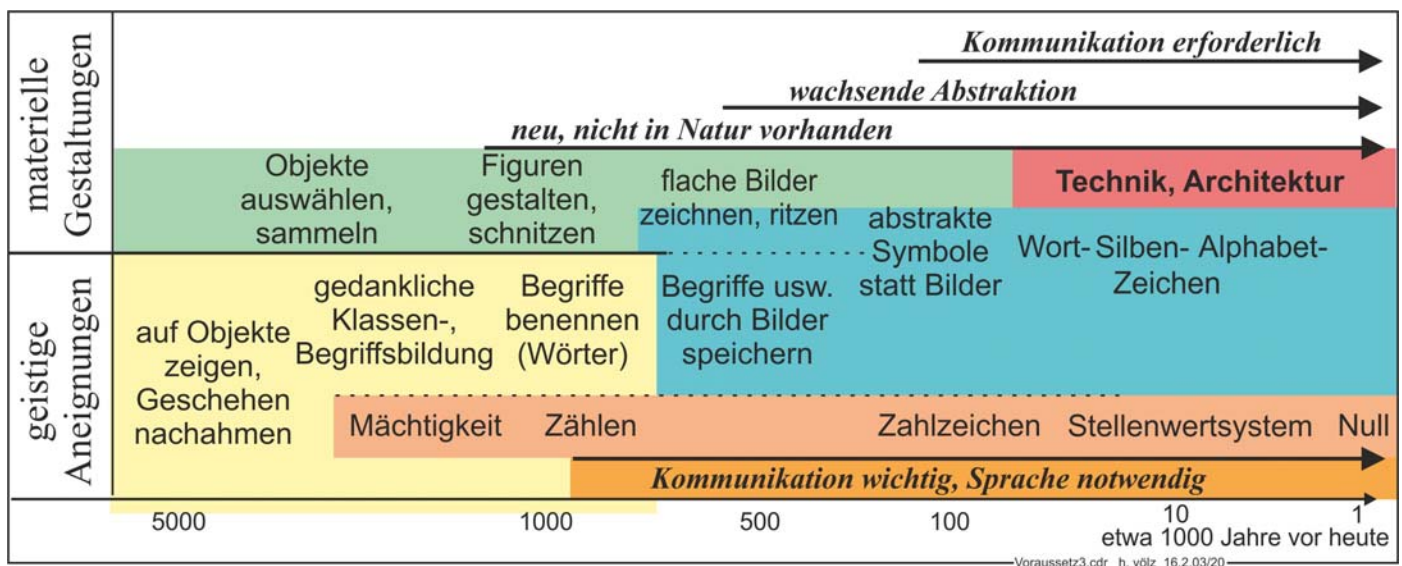


Bild 6. Verknäppte Zusammenstellung der geistigen und gestalterischen Menschheitsentwicklung.

Freud hat ziemlich ähnlich vier charakteristische Phasen für die individuelle Entwicklung jedes Menschen herausgearbeitet. Deutlich allgemeiner leitet Darwin 1871 die Evolution des menschlichen Denkens und der Kognition von den Vorfahren der heutigen Menschenaffen über die Frühmenschen ab. Er betont dabei die graduellen, aber nicht prinzipiellen Unterschiede zwischen den intellektuellen Fähigkeiten von Mensch und Tier. Dazu ist heute u. a. nachgewiesen, dass nicht nur

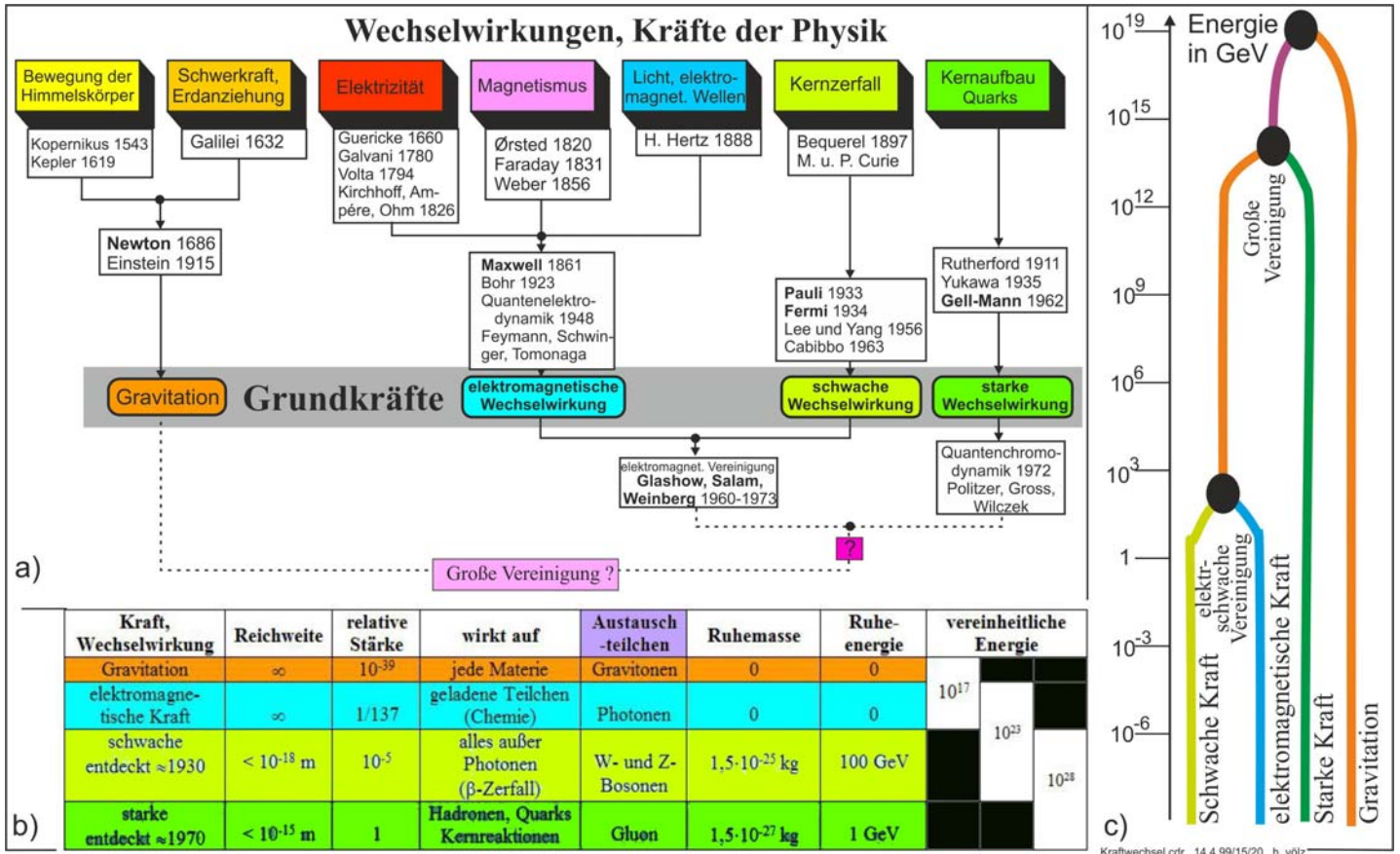


Bild 8. Die vier verschiedenen Kräfte: a) ihre geschichtliche Entwicklung, b) ihre Daten und c) die Zusammenhänge bezüglich der einwirkenden Energie.

Naturkonstanten		Konstanten der Mathematik	
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6,62607554 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	Exponentialwert	$e = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = 2,71828\dots$
Boltzmann-Konst.	$k_B = 1,38065812 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	Euler-Konstante	$C = 0,577216\dots$
Gas-Konstante	$R_0 = 8,314510 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$	Kreisquadratur	$\pi = 3,1415926\dots$
Gravitationskonstante	$G = 6,6725985 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^2 \text{ g}^{-2}$	Diagonale des Quadrats	$\sqrt[2]{2} = 1,41421356\dots$
Lichtgeschwindigkeit	$c_0 = 2,99792457 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$	Goldener Schnitt, Fünfeck	$\frac{1}{2}(\sqrt{5} - 3) = 0,61803\dots$
Abs. Nullpunkt	$T_0 = -273,15^\circ \text{C}$	Periodendopplung	$F = 4,6692016090\dots$

2. Geschehen in der Realität

Die Objekte sind für die wahrnehmbare Realität wesentlich. Deren Kenzeichen sind ihre Eigenschaften, wie Form, Größe, Temperatur, Farbe, Masse usw. Die Kräfte können deren Änderung bewirken sowie ein Zusammenfügen und Zerlegen von Objekten hervorrufen. Das ist wesentlich für die Entwicklung (Evolution) der Realität. Doch wann, wo, wie und warum das begann, führt wieder zu einem circulus fisiosus. Auch hierfür kann es daher keine Letztbegründung geben. Nur die Urknalltheorie nimmt Quantenfluktuationen an. Für die Bestimmung der Eigenschaften, Änderungen usw. sind fünf Wege bzw. Methoden entstanden: Der unmittelbare Weg, die Anwendung von Experimenten, die wissenschaftliche Methode und spezielle Experimente. Ihre Ergebnisse werden dann im fünften Schritt bezüglich ihrer Gültigkeit (Wahrheit) eingeschätzt. Das erfolgt in den fünf Unterabschnitten.

2.1. Unmittelbarer Weg durch Wahrnehmen und Messen

Einige Objekteigenschaften können wir wahrnehmen, also sehen, hören, fühlen, schmecken und riechen und/oder nutzen. Außerdem können wir uns im Raum bewegen sowie handeln. Dadurch können wir die Eigenschaften und Werte bezüglich ihrer Ausprägung ungefähr erfassen. Typisch menschliche Grenzen dafür sind in Bild 3 ausgewiesen. Die gewonnenen Werte hängen aber auch von einigen Umständen, wie Entfernung, Aufmerksamkeit und Erfahrung, ab. Dennoch reichen sie häufig zum Wiedererkennen einzelner Objekte aus. Dabei ist allerdings weitgehend unklar, wie das Erkennen und Wiedererkennen erfolgt. Für die Wahrnehmung ist es nämlich ziemlich einerlei, ob hierbei ein Objekt durch ein dafür stehendes bzw. festgelegtes Zeichen ersetzt wird. Schematisch zeigt diesen Zusammenhang **Bild 9** am Beispiel eines Apfels. Im Bewusstsein, genauer mittels Gedächtnis (s. Abschnitt 5) kann er durch ein Wort, Bild oder ein beliebiges anderes Zeichen ersetzt werden. Dieser Zusammenhang

entstand spätestens mit der Sprache. Hierfür benutzte bereits Platon ein dreiteiliges Schema, das von einem Ding (eigentlich dem Objekt) ausgeht (**Bild 10a**). Nach seiner Auffassung ist es in uns von Geburt an als eine zeitlose Idee und sinnlich nicht zugängliches Urbild der Seele gegeben. Es wird also mittelbar durch einen Begriff erfasst. Erst für den Gebrauch wird es dann durch einen Namen, ein Zeichen bzw. Wort benannt. Die Bedeutung kommt nur mittelbar vor und zwar in Bezug auf die ideale, konstante Wahrheit, der Idee die total selbständig besteht. Schriftliche Zeichen sind für Platon daher sekundär, denn sie verweisen nur auf die mündlichen Zeichen, die Wörter. Wichtig ist aber das Gedächtnis (s. Abschnitt 3.1).

Aristoteles vereinfachte das Schema (Bild 10b) in Richtung zur später üblichen Dreiteilung der Semiotik nach Peirce (10c). An die Stelle des dortigen Interpretanten – des Wahrnehmenden – benutzt er aber noch die Vorstellung, welche das Objekt abbildet und dabei den Gedanken hervorruft. Als Ergebnis wird dann das Objekt in uns mit einem Namen oder Zeichen verbunden.

Der übergeordnete Begriff **Semiotik** wird erstmals 1689 von Locke verwendet. Als Begründer (auch wenn er das Wort kaum verwendete) gilt aber Peirce [Pei31]. Von hier ab werden die drei Teilbegriffe – Syntaktik, Semantik und Pragmatik – deutlich unterschieden (10d) [Mor72]. Lediglich erst 1963 fügte Klaus die Sigmatik (10e) hinzu [Kla63]. Für weitere Details siehe [Völ83].

Einen wichtigen Grund für die Verbesserung der Genauigkeit der Wahrnehmung hat schon Sokrates (470 - 399 v. Chr.) genannt. Nach Platons Überlieferung soll er etwa gesagt haben:

„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.“

Auf Protagoras (≈485 bis ≈415 v. Chr.) geht außerdem der Ausspruch *„Der Mensch ist das Maß aller Dinge“* zurück. Da auch seine Schrift *„Die Wahrheit“* verloren ging, ist das Zitat wiederum ur über Platon bekannt.

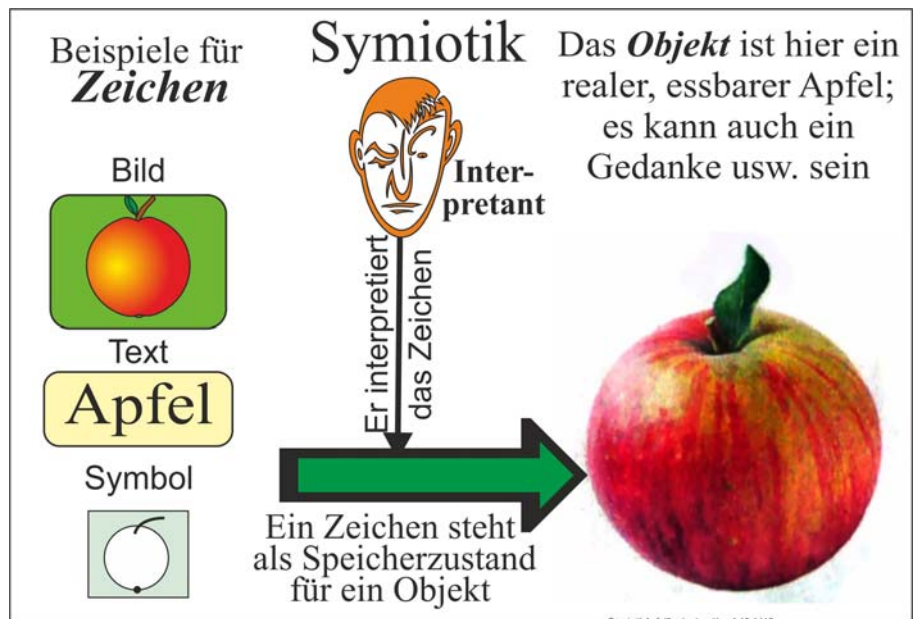


Bild 9. Ersetzung des Objektes Apfel, durch ein Wort, Bild oder allgemein Zeichen.

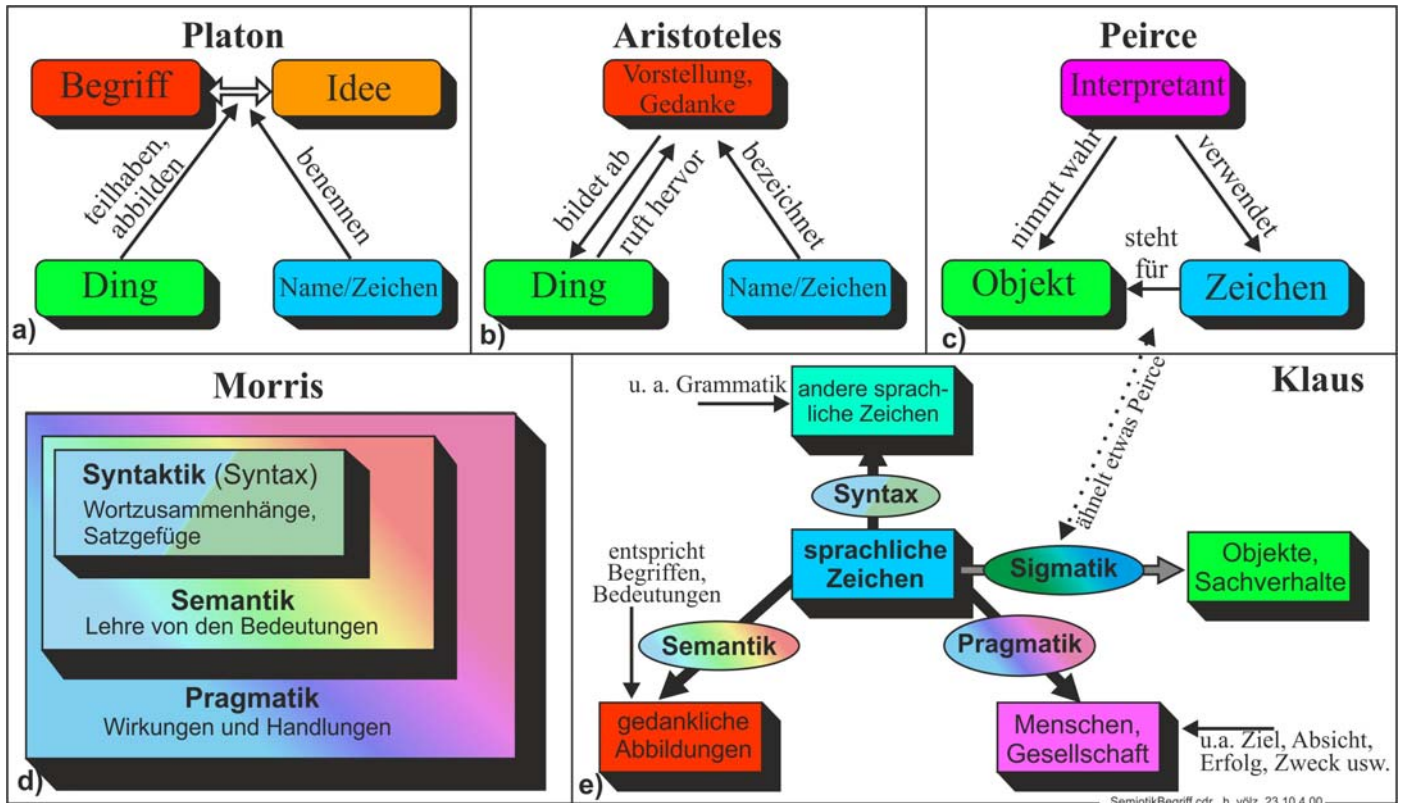


Bild 10. Vom dem Erkennen bei Platon und Aristoteles zur Semiotik.

Genauere Bestimmungen der Objekteigenschaften ermöglichen erst Messungen⁵. Im Deutschen bezieht sich bereits im 8. Jh. das Messen auf Zielen, Zuteilen, Mitteilen, Erzählen, Bestimmen, Verkündigen, Vergleichen und Erwägen. Teilweise dürfte es im Kontext mit Messer entstanden sein, es leitet sich aber nicht vom Schneiden ab (vgl. Spannungsmesser). Noch geringer ist ein Zusammenhang mit der Messe für katholische Gottesdienste (9. Jh. missa), Verkaufsausstellungen und Aufenthalts- und Speiseräume auf Schiffen sein.

Erste Messungen mittels Vergleich erfolgten bereits im alten Ägypten. So steht in einem 3 000 Jahre alten ägyptischen Papyrus [Omm58] (S. 108):

„Wenn dein Schatten 16 Fuß mißt, Berenike, erwartet Amasis dich im Olivenhain ...“

Für die Notwendigkeit des Messens sei noch ein Zitat aus dem Beginn von Omm angeführt:

„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.“

Hierzu sind nur noch wenige Ergänzungen notwendig. Denn einmal ermöglicht uns das Messen exakte Kenntnisse über die Realität zu gewinnen. Zum anderen wurde es für einen korrekten Warenaustausch notwendig, Vergleichsgrößen zu entwickeln. Zunächst wurde daher u. a. die Länge einer Elle an Rathäusern angebracht. Da sie aber vom jeweiligen Fürsten übernommen wurde, war ihr Wert von Ort zu Ort recht verschieden. Als dann der Warenaustausch auch über Städte- und Ländergrenzen erfolgte, wurden allgemein gültige Maße erforderlich. Schließlich waren auch Normen für den Austausch von defekt gewordenen Teilen und für die Massenproduktion erforderlich. Insgesamt wurde es so notwendig, dass immer mehr Eigenschaften von Objekten mit ständig höherer Genauigkeit bestimmt werden mussten. Dabei sind deren **Qualität**⁶ und **Quantität**⁷

⁵ Griechische *medesthai* für etwas sorgen, an etwas denken, auf etwas bedacht sein, zurückgehen. Lateinische *meditare* nachdenken, nachsinnen.

⁶ Lateinisch *qualitas* Beschaffenheit, Verhältnis, Eigenschaft und *qualis* wie beschaffen, von welcher Art.

zu unterscheiden. In einem umfangreichen Buch unterscheidet Thiel allgemein 11 Qualitäts- und 9 Quantitätsbedeutungen [Thi67], [Völ91]. Beim Messen wird Qualität durch eine *Maßeinheit* bestimmt, die ein Teil der Messverfahren ist. Das *Quant* erlangte in der Physik durch die Ergebnisse *Plancks* die sehr spezifische Auslegung im Sinne von Energie- oder Lichtquant und wird als Quantenzahl in der Quantenphysik verwendet. Die Technik kennt außerdem das *Quantisieren*, mit dem kontinuierliche (analoge) Signale auf vorgegebene diskrete Signalwerte festgelegt werden. Zur Quantität gehört auch inhaltlich das Quantum. In der Messtechnik entspricht Quantität dem gewonnenen *Zahlenwert*, der die Ausprägung kennzeichnet und meist mit einem *Messfehler* erfasst wird oder zulässige Toleranzen berücksichtigt. Teilweise werden bei den Messgeräten oder in deren Zusammenhang auch *Normale* benutzt, auf die unten noch genauer eingegangen wird. Insgesamt entstand damit schrittweise eine recht umfangreiche Theorie und Technik des Messens gemäß **Bild 11**.

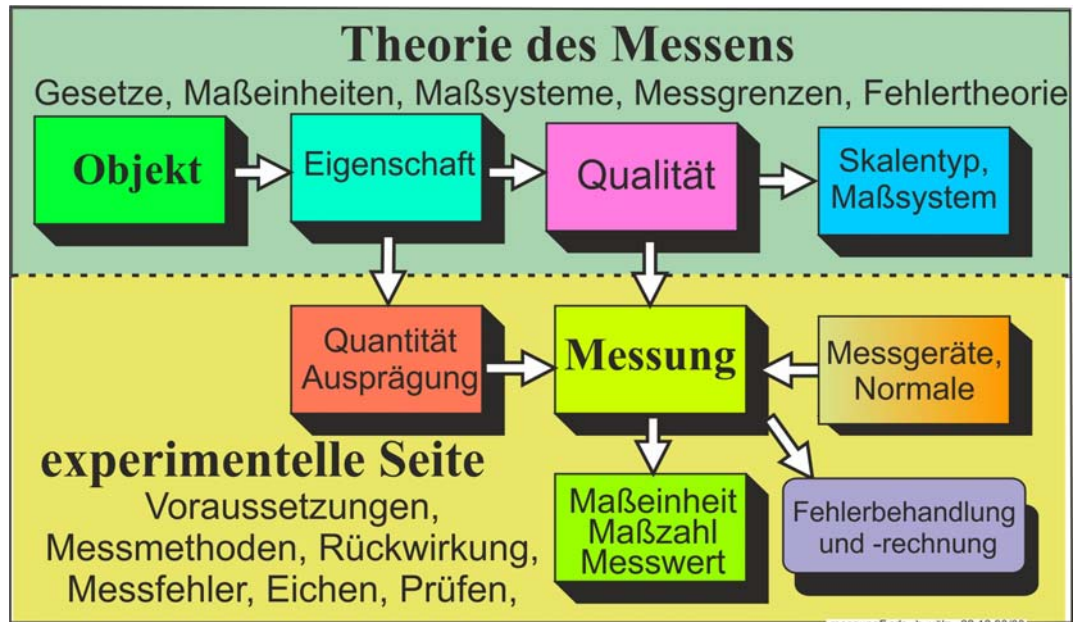


Bild 11. Die theoretischen und experimentellen Gegebenheiten des Messens.

Jede Messung ist mit Fehlern behaftet. Dazu gibt **Bild 12** einen Überblick. Die systematischen Fehler können nur aus Sachkenntnissen über das Messverfahren abgeschätzt werden, dabei gibt es bekannte und unbekannte. Zufällige Fehler sind nicht reproduzierbar und besitzen meist einen regellosen zeitlichen Verlauf. Nur ein Teil der Fehler ist daher korrigierbar.

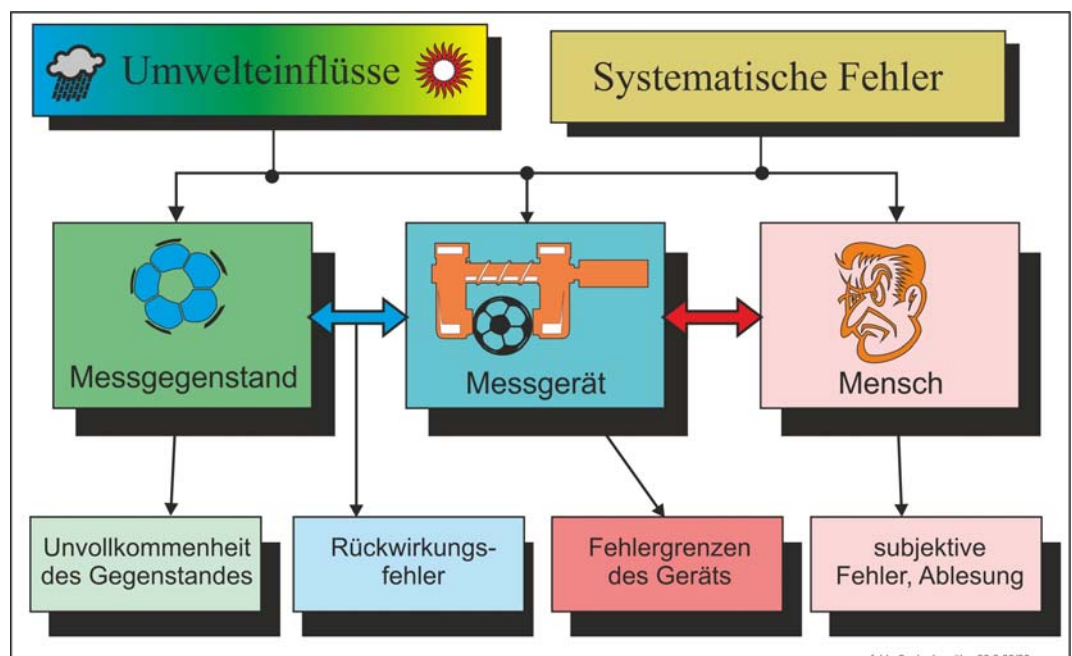


Bild 12. die wichtigsten Entstehungsmöglichkeiten und -arten für Fehler.

Durch Wiederholung kann ein Messwert auch einen anderen Wert annehmen. So kann er oft durch mehrfaches Messen deutlich verbessert werden. Mit der Gaußschen Fehlerrechnung ist dann der wahrscheinlichste Erwartungswert x_0 und die mittlere Abweichung als Streuung $\pm\sigma$ zu bestimmen.

⁷ Lateinisch quantitas, als Größe, Anzahl und quantum, als wie viel, so viel wie, inwieweit, irgendwie.

Im statistischen Sinn sind dabei alle gewonnenen Messwerte gemäß ihrer Häufigkeit durch die Gauß'sche Glockenkurve zu beschreiben. Gemäß **Bild 13** erfasst die dann anzugebende Streuung 68,3 % aller Messwerte. Darüber hinaus sind jedoch Ausreißer möglich. Gemäß der Streuung ist deshalb immer nur eine begrenzte Stellenzahl des Messwertes gültig. Durch die heute breite Anwendung der Taschenrechner und der Computertechnik werden aber leider oft zu viele Stellen angegeben und täuschen so zu Genaues vor.

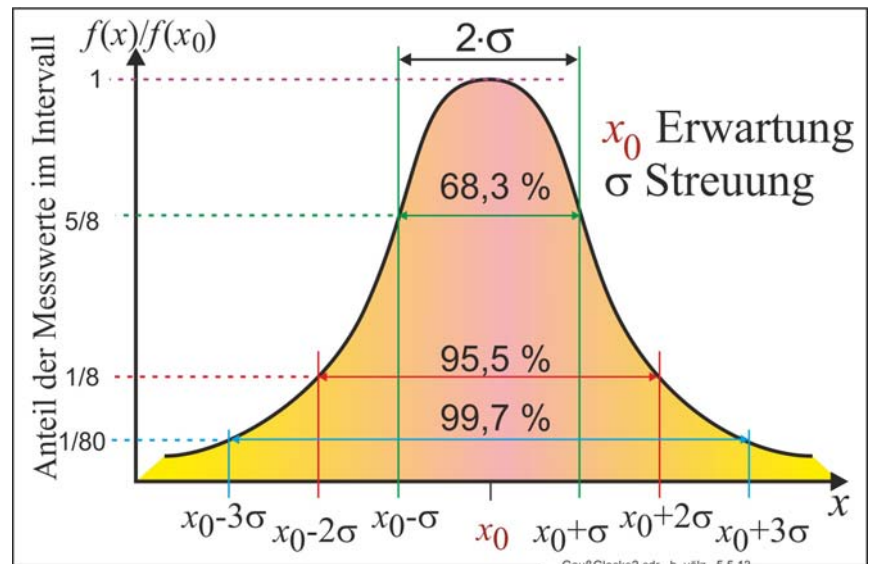


Bild 13. Gauß'sche Glockenkurve zur Bestimmung des σ und der gültigen Stellen einer Messung.

Zu jedem Messergebnis gehört neben der Fehlerbestimmung auch die Maßeinheit als Kennzeichen der Qualität und für sie ist dann zusätzlich eine Bezugsgröße notwendig, die zunächst durch ein spezielles Objekt festgelegt wurde, s. o. Elle an Rathhäuser. So lautet z. B. ein typisches Messergebnis: $x_0 \pm \sigma \times \text{Maßeinheit} = 45,34 \pm 0,05 \text{ kg}$. Ein Objekt oder Zusammenhang für die Festlegung der Maßeinheit und Bezugsgröße wird als Normal bezeichnet. Es setzt umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen voraus. Ab 1889 entstand dafür die **CGPM** = Generalkonferenz für Maß und Gewicht. Deren umfangreiche Entwicklung ist ausführlich in [Wiki1] zusammengestellt. Hier seien nur die wichtigsten Etappen aufgezeigt:

- 1790** Französische Akademie der Wissenschaften leitet die Einheiten der Länge Meter als zehnmillionsten Teil des Erdmeridianquadranten und das Gewicht aus der Masse von 1 dm^3 reinem Wassers bei ca. 4°C ab.
- 1832** Carl Friedrich Gauß und Wilhelm Weber führen das **cgs-System** aus mm, g und s ein.
- 1873** James Clerk Maxwell schlägt vor, die Länge und Zeit über Wellenlänge und Periodendauer von Licht und die Masse von Molekülen abzuleiten.
- 1875** Die Meterkonvention wird durch 17 Staaten unterzeichnet.
- 1889** 1. Tagung der CGPM.
- 1900** Max Planck schlägt vor, Grundeinheiten durch physikalische „Constanten“ zu definieren.
- 1901** Giovanni Giorgi zeigt, dass ganzzahlige Exponenten dann möglich sind, wenn zum MKS-System eine vierte Basisgröße hinzugefügt wird (s. auch [Fle51]).
- 1954** 10. CGPM schlägt ein System mit 6 Basiseinheiten vor: m, kg, s, A und K.
- 1960** 11. CGPM führt französische Bezeichnung „Système International d'Unités“ (**SI**) ein.
- 1971** 14. CGPM fügt als siebte und letzte Basiseinheit das Mol hinzu (**Bild 14**).
- 1983** 17. CGPM Meter neu, Lichtgeschwindigkeit erhält festen Wert, s. auch [Völ96].
- 2018** 26. CGPM legt für alle Basiseinheiten die Werte der sieben physikalischen Konstanten genau fest. (**Bild 15** und Tabelle)

Bild 14 zeigt die Struktur des SI um 1983 [Völ96]. Ein Problem war hierbei vor allem das Winkelmaß. Für den rechten Winkel gilt rad (0,78539816...) statt des vorher viel einfacheren 90° . Weiter fehlt eine Basiseinheit für Magnetismus, wodurch sich die entsprechenden neuen Einheiten nur sehr langsam gegen die alten Ørsted und Gauss durchsetzten (s. auch [Fle51]). Da die Zeit streng physikalisch nicht existiert, gibt es für sie kein reales Normal (s. S. 1 Einstein). Ähnlich steht es mit dem Bit für die Information. Deshalb sind beide bläulich unterlegt. Auch für Maße, die den Menschen betreffen (gelb unterlegt), gilt Ähnliches.

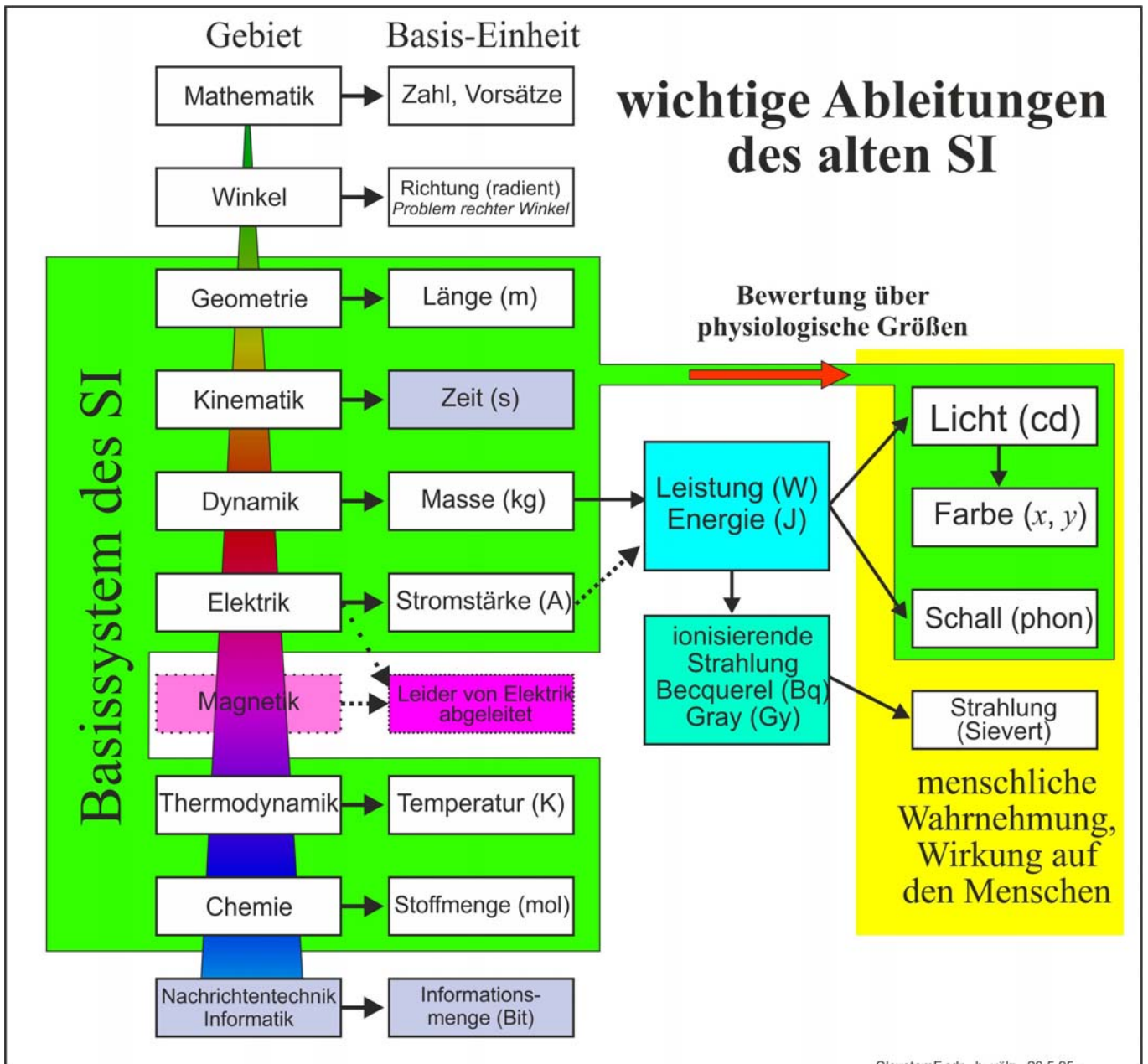


Bild 14. SI gemäß Stand um 1983, vgl. [Völ96],

	Konstante	exakter Wert		seit
$\Delta\nu_{Cs}$	Strahlung des Cs-Atoms	9 192 631 770	Hz	1967
c	Lichtgeschwindigkeit	299 792 458	m/s	1983
h	Planck Wirkungsquant	6.62607015 $\cdot 10^{-34}$	J·s	2019
e	Elementarladung	1.602176634 $\cdot 10^{-19}$	C	2019
k_B	Boltzmann-Konstante	1.380649 $\cdot 10^{-23}$	J/K	2019
N_A	Avogadro-Konstante	6.02214076 $\cdot 10^{23}$	mol ⁻¹	2019
K_{cd}	Strahlungs-äquivalent	683	lm/W	1979

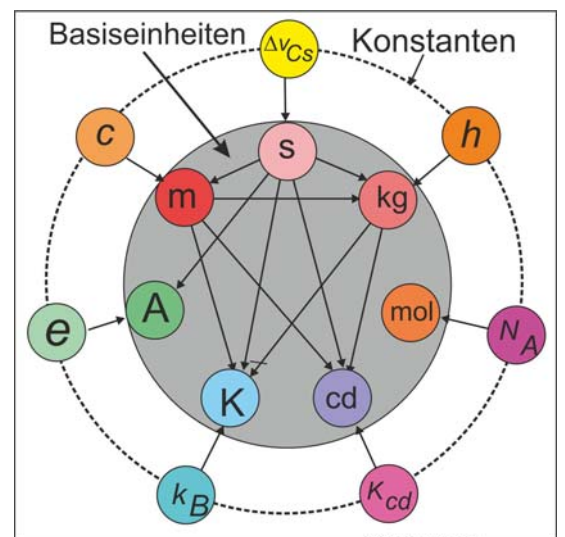


Bild 15. Zusammenhang Konstanten und Basiseinheiten

Gegenüber der Tabelle auf Seite 3 werden nun die Naturkonstanten nicht in Zehnerpotenzen in 10^x , sondern mittels der Exponentialfunktion e^x angegeben. Die Übergänge zu den Basiseinheiten sind in **Bild 15** zusammengefasst. Ihre Herleitung von den Naturkonstanten zeigt die folgende Tabelle.

Einheit	Definition Gleichung	unter Verwendung von	implizit von
Sekunde	$\Delta^{1/Cs} = 9\,192\,631\,770\,1/s$		
Meter	$c = 299\,792\,458\,m/s$	Sekunde	Δv_{Cs}
Kilogramm	$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} kg \cdot m^2/s$	Sekunde, Meter	$\Delta v_{Cs}, c$
Ampere	$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} A \cdot s$	Sekunde	Δv_{Cs}
Kelvin	$k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} kg \cdot m^2/(s^2 \cdot K)$	Sekunde, Meter	$\Delta v_{Cs}, h$
Mol	$N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} 1/mol$		
Candela	$K_{cd} = 683\,cd \cdot sr \cdot s^3/(kg \cdot m^2)$	Sekunde, Meter, Kilogramm	$\Delta v_{Cs}, h$

Von den Basiseinheiten leiten sich weitere, häufig etwa 70 Maßeinheiten ab. Das ist genauer in [Völ96] untersucht und dann getrennt für die einzelnen Basiseinheiten dargestellt. Für jede Maßeinheit sind dort Skalen vorhanden, die den möglichen Zahlenbereich jeder Einheit in Natur und Technik erfassen. Bei der Leistung kommen z. B. Werte von 10^{-20} bis 10^{45} Watt vor. Wegen der gewaltigen Größenunterschiede wurden Präfixe in Abstufungen von 1 000 gemäß der rechts stehenden Tabelle festgelegt. Die Vorsätze h, da, d und c blieben aber weiterhin zulässig. An den oben genannten Skalen sind auch die wichtigsten konkreten Beispiele eingetragen. Wegen der binären Informatik sind aber die Werte leicht vergrößert, indem sie alle auf $2^{10} = 1\,024$ statt 1 000 bezogen werden. Daher gilt z. B. $(2^{10})^x$ mit $x = 10/3$ des Exponenten beim Tabellenwert, also u. a. bei

$$\begin{aligned} \text{MBit oder MByte} \quad 2^{20} &= 1\,048\,576 \\ \text{GBit oder GByte} \quad 2^{30} &= 1\,073\,741\,824 \\ \text{TBit oder TByte} \quad 2^{40} &= 1\,099\,511\,627\,776 \end{aligned}$$

Um die sehr kleinen Messwerte zu erfassen, sind Verstärker aller Art, wie Lupen, Mikroskope, Hebel, schiefe Ebenen Mikrofone usw. notwendig. Die großen Werte erfordern analog dazu Teiler, wie Fotografie, Teleskope, Schatten Perspektive, Teiler, Abschwächer und Kompensatoren. Fast alle derartigen Varianten sind u. a. in [Vö99] umfangreich behandelt.

Der zulässige Umgang mit Maßeinheiten und Messwerten ist gründlich in [Sch66] untersucht. Die Maßeinheiten können nur per Multiplikation oder Division verknüpft werden. So entstehen u. a., die Beispiele in der obigen Tabelle, aber auch m^2 , $W \cdot s$ und kg/m^3 . Doch nicht alle möglichen Kombination existieren in der Realität, z. B. sind m^4 und $A \cdot s^2$ nicht möglich. So ergeben sich die o. g. etwa 70 Einheiten. Die Kombination von Messwerten ist fast nur auf die gleiche Maßeinheit beschränkt und kann dann nur durch Addition oder Subtraktion erfolgen, etwa so wie die Längen von Objekten hintereinander gelegt oder miteinander verglichen werden. Beides ist aber u. a., nicht bei der Temperatur möglich. Die Fläche aus Länge×Breite oder das Volumen mit zusätzlicher Höhe sind fast die einzigen Ausnahmen, die durch Multiplikation entstehen können. Erwähnt sei noch, dass es Ausprägungen gibt, die nur mittelbar messbar sind. Das gilt z. B. für die Bestimmung von Flächen und Volumina aus Längenmessungen oder für die elektrische Leistung aus Strom I , Spannung U und Phasenwinkel φ gemäß $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$. Aber bereits 215 v. Chr. fand Archimedes für das Volumen ein geeignetes Verfahren. Er sollte nämlich prüfen, ob die Krone des griechischen Königs Hieron wirklich aus purem Gold bestand. Als er wie üblich zum Bade in die Wanne stieg und das Wasser überlief, kam ihm die Idee: Aus der Menge des überlaufenden Wassers konnte er mittelbar das spezifische Gewicht der Krone bestimmen. So fand er, dass sie mit Silber legiert war.

Symbol	Name	Wert
Y	Yotta	10^{24}
Z	Zetta	10^{21}
E	Exa	10^{18}
P	Peta	10^{15}
T	Tera	10^{12}
G	Giga	10^9
M	Mega	10^6
k	Kilo	10^3
h	Hekto	10^2
da	Deka	10^1
d	Dezi	10^{-1}
c	Zenti	10^{-2}
m	Milli	10^{-3}
μ	Mikro	10^{-6}
n	Nano	10^{-9}
p	Piko	10^{-12}
f	Femto	10^{-15}
a	Atto	10^{-18}
z	Zepto	10^{-21}
y	Yokto	10^{-24}

Nicht immer ist oder war die Maßeinheit eindeutig gegeben. Dann kann ein Messergebnis unterschiedlich angegeben werden. So gilt z. B. für ein und dieselbe Länge:

$$100 \text{ m} = 0,1 \text{ km} = 0.054 \text{ sm (Seemeilen)} = 3973 \text{ inch} = 238 \text{ foot.}$$

Messen ist aber nicht nur im Sinne der Physik und des SI möglich. Es gibt vielfältige Vorstufen, die Ähnliches in weitaus mehr Bereichen und meist unter deutlich schwächeren Voraussetzungen ermöglichen. Dazu gehören auch Prüfen, Wägen, Wiegen, Urteilen, Schätzen, Testen und Zählen. Teilweise sind das Tätigkeiten, die mit dem Klassifizieren verwandt sind. Dennoch entstehen so Aussagen über Objekte. Etwa in diesem Sinne können auch Tiere „messen“, ohne Zahlwörter zu benutzen. Sie können Objekte vergleichen, bemerken das Fehlen eines Jungtieres und einige können mittelbar bis etwa 7 „zählen“. Es gibt sogar einfache menschliche Kulturen, die noch kein Gefühl für das Zählen entwickelt haben oder nur bis zwei „zählen“ können. Insgesamt ergeben sich so zusätzlich die folgenden Abstufungen:

1. Einfache Alternativen: weiblich $\Leftrightarrow$ männlich, warm $\Leftrightarrow$ kalt oder dick $\Leftrightarrow$ dünn.
2. Mehrere (hier 3) Ausprägungen: kalt, angenehm, heiß.
3. Viele Ausprägungen: eisig, frostig, kalt, kühl, unangenehm, lau, warm, heiß, unerträglich.
4. Eine weitergehende Differenzierung entsteht durch Hinzufügungen von Zusätzen, wie extrem, gewaltig, sehr, mehr, weniger, kaum, etwas und nicht.
5. Die Benennung der Ausprägung mit einem mehr oder weniger willkürlichen Zahlenwert, wie bei Schulnoten oder Chargennummern.

Für 5. muss ein Schüler mit der Note 2 nachweisbar bessere Leistungen erbracht haben als einer mit der Note 3. Wie viel besser, ist teilweise recht unwesentlich. Auch für die zehnstufige Mohs'sche Härteskala gilt so: Ein Material, welches das andere ritzt, ist härter und bekommt den höheren Zahlenwert. Schließlich lassen sich recht willkürliche Maßeinheiten bilden. Das trifft etwa für Komplexität, Codelänge oder menschliche Phantasie zu. In diesem Sinne pflegte mein Greifswalder Hochschulprofessor **Schallreuter** für die Trinkfestigkeit bzw. Durchflussgeschwindigkeit von Flüssigkeiten schalkhaft die Einheit „Falstaff“ einzuführen.

Ein historisches Beispiel stammt aus der Ilias (XXIV, 25) von Homer (750 - 700 v.Chr.): Peleus und Thetis feiern Hochzeit. Alle Götter außer Eris waren geladen. Aus Ärger warf sie daraufhin einen goldenen Apfel mit der Aufschrift „Der Schönsten“ unter die Gäste. Das löste den Streit zwischen den drei Göttinnen Hera, Athene und Aphrodite aus. Sie forderten vom Paris, Sohn des Königs Priamos von Troja, die Entscheidung, wer die Schönste sei. Er wählte Aphrodite, die Göttin der Liebe. Über sie gewann er so die schöne Helena von Troja, die Gattin des Königs von Sparta Menelaos und zog mit ihr nach Troja. Zur Rächung dieses Unrechts begann der Trojanische Krieg, bei dem Troja 1184 v. Chr. in die Hände der Griechen fiel.

Eine andere, aber wirkliche erzählte ich in meinen Vorlesungen seit den 60er Jahren. Während meines Studiums in Greifswald ging unser Physik-Semester häufiger in „Schmidts Konzerthaus“ in Greifswald in der Wolgaster Strasse tanzen. Doch einmal war keine hinreichend ansehnliche Dame zum Tanzen anwesend. Also tranken wir, so wie es sich für Studenten gebührt, Bier. Plötzlich stand unser Kommilitone Siegfried Bohl (der später Pfarrer wurde) auf: „Mit der dort tanze ich jetzt“. Erstaunt blickten wir uns an, zählten die Striche auf seinem Bierdeckel. Er hatte 13 Bier konsumiert. Von da ab wurden von uns auf der Strasse vorbeigehende Mädchen eingestuft: 3 Bier, 5 Bier usw. Mit 13 Bier als Maßeinheit, galt nämlich jede Frau als schön. 2001 missfiel das offensichtlich einer Studentin an der FU. Sie hatte sofort, von mir unbemerkt, den Hörsaal verlassen und mich anonym angeschwärzt. Ich wurde vor den Frauenausschuss zitiert, der mich aber zweimal versetzte. Dennoch konnte ich erklären, dass ich anschließend immer die griechische Legende von Eris erzähle und als gefährliche Folge den Trojanischen Krieg nannte. Der Ärger ging dennoch bis zum Dekan weiter. Doch mehrere Studentinnen trösteten mich: Auch wir trinken uns die Männer schön, aber mit etwa 6 Schoppen Wein. Nun erzähle ich den Witz so herum. Aber ein

Männerausschuss hat sich bei mir noch nicht beschwert. Dennoch zeigt dies Beispiel deutlich, wie unscharf derartige Einschätzungen sein können.

Sehr früh entwickelte die Menschheit für ihren Bedarf *spezielle Messgerätenamen*. Davon existieren nur noch *Uhr*⁸, *Kompass*⁹, *Lot*¹⁰, *Waage*¹¹, *Sextant*¹². Teilweise könnte auch der „*Zollstock*“ genannt werden, der von der alten Längeneinheit Zoll abgeleitet war, nun aber neudeutsch Gliedmaßstab heißt. Im Mittelalter erlangte die (Sand-) Uhr auch einen symbolischen Charakter und kennzeichnete die jedem vergönnte „kurze“ Lebensfrist, Fast alle anderen Messgeräte enden auf *-messer*, *-meter*, *-graph*, *-skop* oder *-lehre*, wie Spannungsmesser, Voltmeter, Spektograph, Oszilloskop und Schiebelehre. Für den Umgang mit Messwerten sei noch kurz auf verschiedene **Skalentypen** eingegangen, Ihre Reihenfolge entspricht wachsenden Forderungen an die Ausprägungen. Daher sind bei den höheren Skalen auch immer die Tests der vorangehenden Skalen zulässig. Zuweilen wird die höhere Skala angestrebt. Das ist oft weder erreichbar noch sinnvoll. [Ort00]:

- Bei der **Nominal**-Skala existiert nur eine umkehrbar *eindeutige Zuordnung* zwischen den Zahlen (Messwerte) und den Ausprägungsgraden. Die jeweilige Zahl ist dabei quasi nur ein eindeutiger Code für das Objekt. Beispiele sind die Nummerierung von Fußballspielern und die Kontonummern. Kontrollen ermöglichen teilweise die Entropie und der k^2 -Test.
- Die **Ordinal**-Skala nutzt eine Abbildung zwischen den Ausprägungsgraden und den Zahlenwerten gemäß einer monoton steigenden Funktion mit $\geq$ als Rangordnung. Beispiele sind die Schulzensuren und die Mohs'sche Härteskala. Tests sind u. a. Median, Centile und Vorzeichen.
- Für die **Intervall**-Skala gilt die lineare Verknüpfung $f(x) = a + b \cdot x$ mit den Konstanten a und b . Gleiche Intervalle führen zu gleichen Zahlendifferenzen: $f(x_1) - f(x_2) = b \cdot (x_1 - x_2)$. Ein Beispiel ist die Celsius-Temperatur. Tests betreffen Mittelwert, Streuung, Fehlerrechnung und Korrelation.
- Die **Log-Intervall**-Skala ist ein Spezialfall der Intervall-Skala gemäß $f(x) = a + b \cdot \log(x)$. Logarithmierte gleiche Intervalle führen zu gleichen Zahlendifferenzen. Beispiele sind physiologische Reize, wie die Lautstärke in dB oder phon. Ihre Begründung erfolgt teilweise über das Weber-Fechner-Gesetz, wonach die subjektive Empfindung proportional dem Logarithmus des auslösenden Reizes ist (vgl. Bild 19). Es gelten die Tests von zuvor.
- Die **Verhältnis**-Skala verlangt Proportionalität $f(x) = a \cdot x$. Daher sind die Verhältnisse der Mess- und Zahlenwerte gleich: $f(x_1)/f(x_2) = x_1/x_2$. Beispiele sind Länge, Masse und die meisten SI-Einheiten. Tests ermöglichen der geometrische und harmonische Mittelwert sowie die Variationskoeffizienten.
- Bei der **Absoluten** Skala gilt die Identität $f(x) = x$. Beispiele sind die meisten Absolut-Messwerte, aber auch Häufigkeit, Wahrscheinlichkeit, Währung, Windungszahl und Wirkungsgrad. Es gelten die Tests von zuvor.

2.2. Aktive Einwirkungen bei Experimenten

Der vorherige Abschnitt erfasst für das Erkennen der Realität nur passive Methoden. Das **Experiment**¹³ ist dagegen eine aktive Methode, mit der absichtlich, gezielt und methodisch auf die Realität eingewirkt wird, um dann die dadurch erfolgenden Änderungen zu erfassen. Das ist ähnlich wie

⁸ Griechisch *hora*, lateinisch *ora* Zeit, Jahres-, Tageszeit, Stunde (s. hierzu auch Zeit Abschnitt ###).

⁹ Lateinisch *compassare* abmessen zusammen (*passus* Schritt), um 100 n. Chr. chinesisch „Südweiser“. Aus der italienischen Seefahrt wurde er in viele Sprachen übernommen.

¹⁰ *Lot* (auch Senkblei genannt) sehr ungewisse Herkunft, Das Echolot diente der Ermittlung der Wassertiefe. Später auch für die Senkrechte benutzt. Sein Material wurde beim „Löten“ verwendet. Zum Lot im Alten Testament besteht kaum Bezug.

¹¹ Altdeutsch *wahge* schon im 8. Jh. nachweisbar, hängt mit Wagnis und Schwere zusammen, *wiegen* verdrängte im 17. Jh. das alte *wägen*. Hängt aber nicht mit der Wiege (für Kinder) zusammen. Waage und Wagen (Fahrzeug) wurden erst 1927 eindeutig unterschieden.

¹² Lateinisch *Sextus* der Sechste, hier aber für ein Sechstel von 360° also 60°. Für die frühe Seefahrt wichtig.

¹³ Lateinisch *experimentum* von *experiri* das in Erfahrung Gebrachte; Versuch, Beweis, Prüfung, Probe

beim Handwerk. So können weitaus mehr Fakten und Zusammenhänge gewonnen werden. Im Prinzip wurde das Experiment bereits in allen Hochkulturen benutzt. Dennoch kam es in der Wissenschaft erst relativ spät zur Anwendung. Als Erster weist um 1300 Wilhelm **Ockham** (1230 – 1384) auf seine Notwendigkeit hin, aber nur rein gedanklich. Bereits deutlicher bezieht sich darauf Nikolaus von **Kues** (eigentlich Nikolaus Cryfftz = Casanus, 1401– 1464). Er sagt etwa: So wie Gott die reale Welt erschaffen hat, so schafft der Mensch die Welt in seinem Geist. Hierzu sind Mathematik, Beobachtung und das Experiment notwendig. Doch auch er führte noch keines aus, formulierte es aber bereits recht ausführlich gedanklich. Den entscheidenden Schritt vollzieht erst und gleich mehrfach Galileo **Galilei** (1564 – 1642). Besonders berühmt sind seine Fallversuche ab 1589. Heute werden Experimente in vielen Wissenschaften und zwar vor allem in den Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie in Medizin, Psychologie und Soziologie durchgeführt. Dabei werden meist auch die Methoden des vorigen Abschnitts, wie Beobachten, Zählen und Messen, einbezogen. Das allgemeine Prinzip zeigt **Bild 16**. Darin ist links die Realität zur Vermeidung konkreter Vorstellungen durch das komplexe grüne Gebilde symbolisiert.

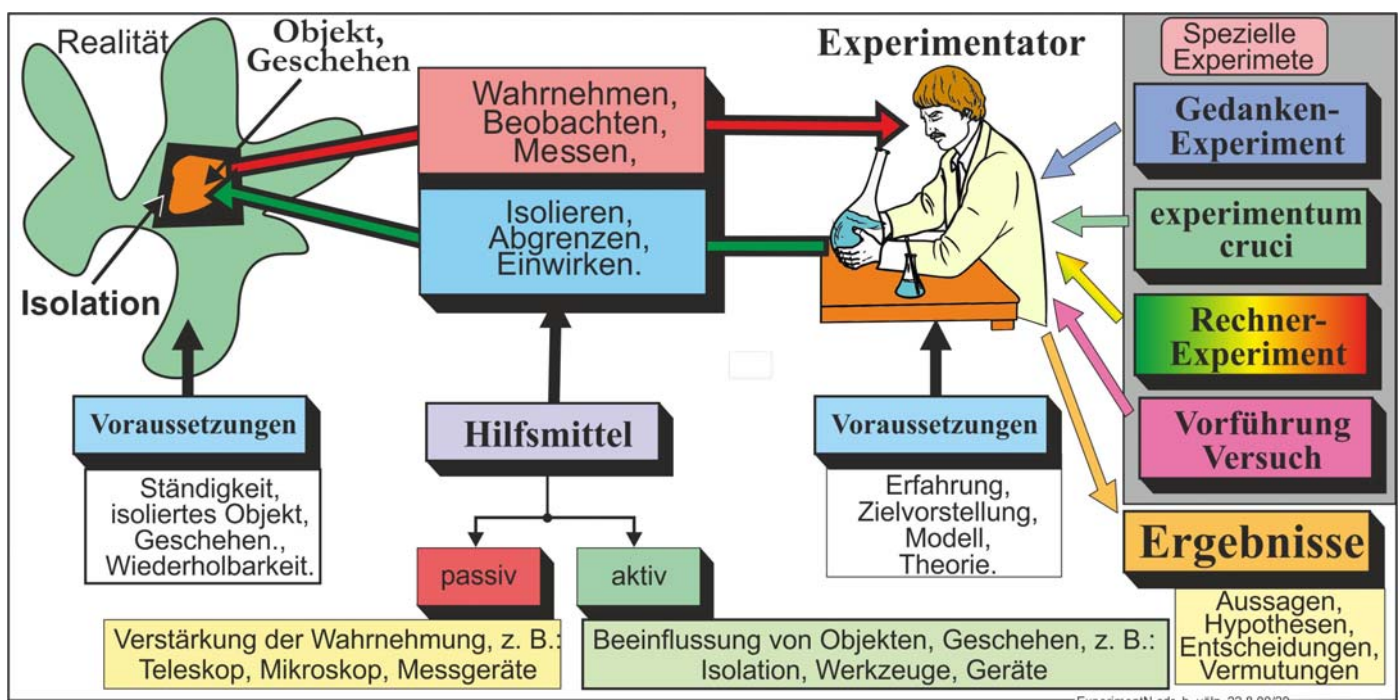


Bild 16. Die wesentlichen Zusammenhänge beim klassischen Experiment.

Häufig wird mit einem Experiment quasi auf der Grundlage einer *Hypothese*¹⁴ eine Frage an die Realität gestellt. Carl Friedrich von **Weizsäcker** (1912 – 2007) sprach daher sogar von einem „Verhör“ der Natur [Wiki4]. In Sonderfällen kann auch versucht werden, eine bis dahin nicht beobachtete Situation herbeizuführen, um sich dann vom Ergebnis „überraschen zu lassen“. In den meisten Fällen werden nur ausgewählte Größen beeinflusst und/oder beobachtet. Andere werden dagegen besonders gut konstant gehalten. Dazu werden einzelne Bereiche der Realität isoliert. So ist eine höhere Genauigkeit durch Wiederholungen erreichbar. Teilweise kann auch ein unerwünschter, persönlicher Einfluss des Experimentators auftreten. Jedoch bei Experimenten mit Quantenobjekten lässt sich solch ein Einfluss der Beobachtung grundsätzlich nicht vermeiden. Die Ergebnisse der Experimente können mittels Schlussfolgerungen zu Entdeckungen oder zu einem Modell führen und sogar Grundlage einer Theorie sein. In der Medizin können einige Experimente aus ethischer Sicht oder wegen nicht genügend berücksichtigter Gefahren unzulässig oder zumindest umstritten sein. Das gilt besonders für Menschen- und Tierversuche sowie für Kernwaffentests und die Gentechnik.

¹⁴ Griechisch hypothesis Unterstellung; hypotithenai darunterstellen

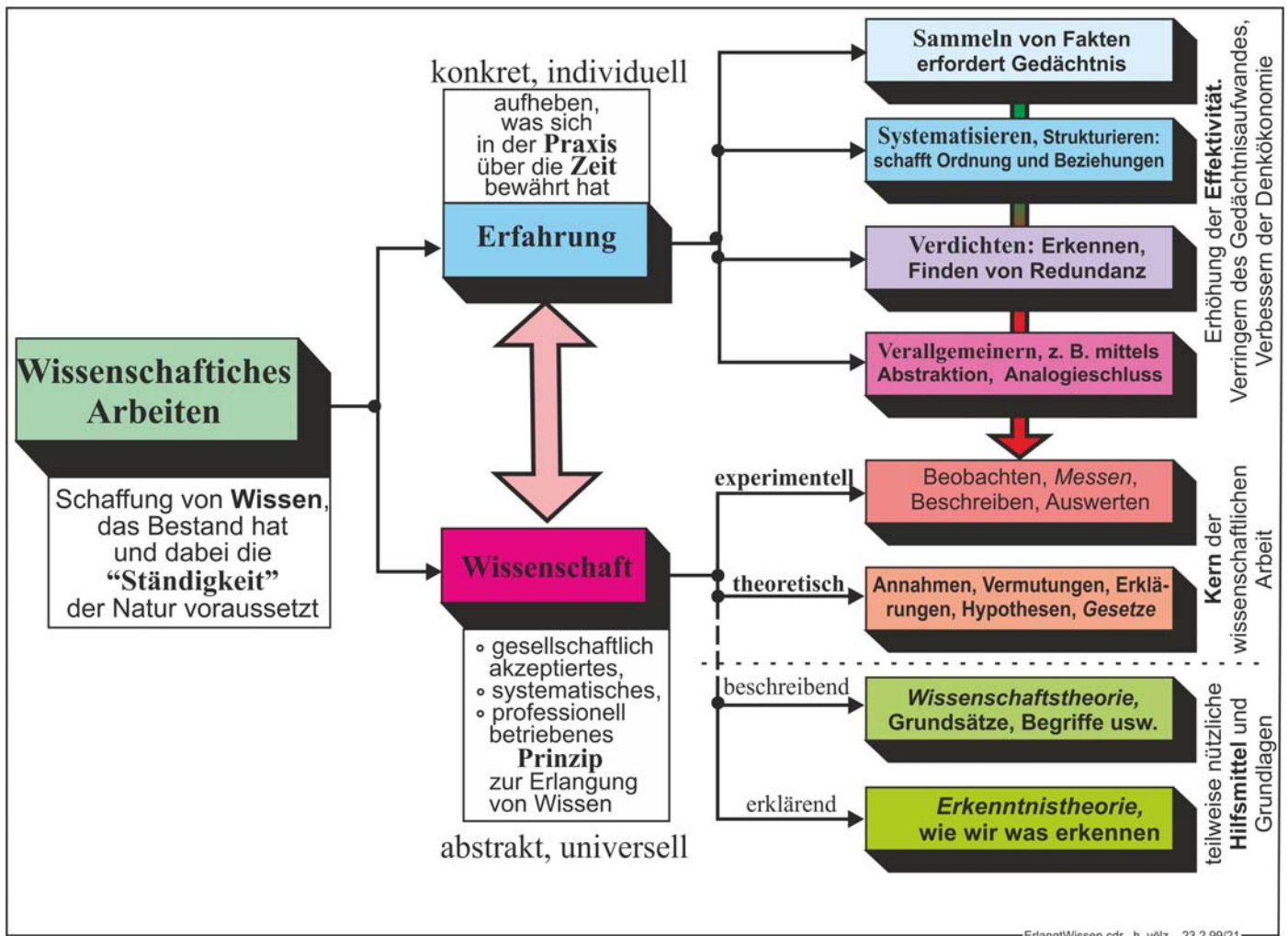
Ein Experiment liefert primär nur Aussagen, die mit der Versuchsanordnung und deren Ergebnissen unmittelbar zusammenhängen. Sie können nur teilweise bezüglich ihrer Widerspruchsfreiheit und theoretischen Aussagen überprüft werden. Es sind aber Ergebnisse möglich, die prinzipiell Unbeobachtbares betreffen, wie sie etwa in der Theoretischen Physik und der Kosmologie auftreten. Da ein Experiment nur über den jeweiligen Spezialfall Auskunft gibt, ist es zuweilen umstritten, ob es in der Realität überhaupt Naturgesetze als allgültige Verallgemeinerungen gibt. Aber meist wird eine Unstimmigkeit schnell bemerkt.

Es gibt auch **spezielle „Experimente“** (rosa, rechts oben), die auf (etwas) andere Art betrieben werden oder in besonderen Zusammenhängen wichtig sind. Das *experimentum crucis* geht auf Francis Bacon (1561 – 1626) zurück und wird so angelegt, dass die Realität bezüglich einer Theorie oder Vermutung nur entsprechend einer Entscheidung mit „Ja“ oder „Nein“ antworten soll. Es setzt daher bereits viel Wissen über das Problem voraus. Deshalb sind hierzu nur wenige Beispiele bekannt. Im Gegensatz zu James Clerk **Maxwell** (1831 – 1879) wusste Heinrich **Hertz** (1857 – 1894) von der Strahlung der elektromagnetischen Wellen und konnte sie so durch besondere Versuche nachweisen und dann nutzbar machen. Noch mehr bekannt ist der Michelson-Morley-Versuch von 1887. Er bewies, dass die elektromagnetischen Wellen im Gegensatz zu anderen – wie den Schallwellen – keinen materiellen Träger – also den Äther benötigen. Beim **Gedanken-Experiment** wird etwas ohne direkten Kontakt zur Wirklichkeit rein geistig abgeleitet. Das Musterbeispiel hierfür ist Einsteins Fahrstuhlexperiment bezüglich des Zusammenhangs von schwerer und träger Masse. Zumindest teilweise kann hier auch der **Analogschluss** eingeordnet werden (s. S. 21, ###). Mit der breiten Anwendung der Rechentechnik hat sich auch der Begriff **Computer-Experiment** durchgesetzt. Hier werden jedoch keine Fragen an die Natur gestellt, sondern auf Grundlage von Modellen und Theorien, vorwiegend mittels mathematischer Ableitungen, sehr schnelle und/oder hochkomplexe Rechnungen durchgeführt. Daher können sie teilweise als „erweiterte“ Gedankenexperimente betrachtet werden. Jedoch nicht alle Experimente dienen dem Gewinn von neuen Erkenntnissen über die Realität. Sie werden quasi als Wiederholung und vor allem zur **Demonstration** von bereits Bekanntem für Lernende in Schule, Hochschule und Berufsausbildung vorgeführt. Meist sind sie dabei deutlich vereinfacht. Im **Praktikum** werden Experimente zum tieferen Verständnis und der praktischen Anwendung von Methoden und Verfahren von den Lernenden selbst durchgeführt und ausgewertet. Ziemlich ungewöhnlich ist der Begriff Experiment in der **Kunst**, wie Literatur, Musik, Film und Malen: Hier versucht der Künstler eine neue Methode für sein Gebiet einzuführen. Schließlich gibt es sogar **überflüssige Experimente**. Sie sind aber meist schwierig zu erkennen. So hatten die Chemiker recht früh die Atomtheorie akzeptiert und wandten daher große Mühe zur Bestimmung der Molekulargewichte auf. Hätten sie aber damals um die Existenz von Isotopen gewusst, wären viele dieser Experimente nicht notwendig gewesen. Mit der einfachen Atomtheorie konnten sie aber nur Mittelwerte bestimmen. In [Wiki4] sind fast 30 berühmte Experimente zusammengefasst.

2.3. Wissenschaft und Theorien

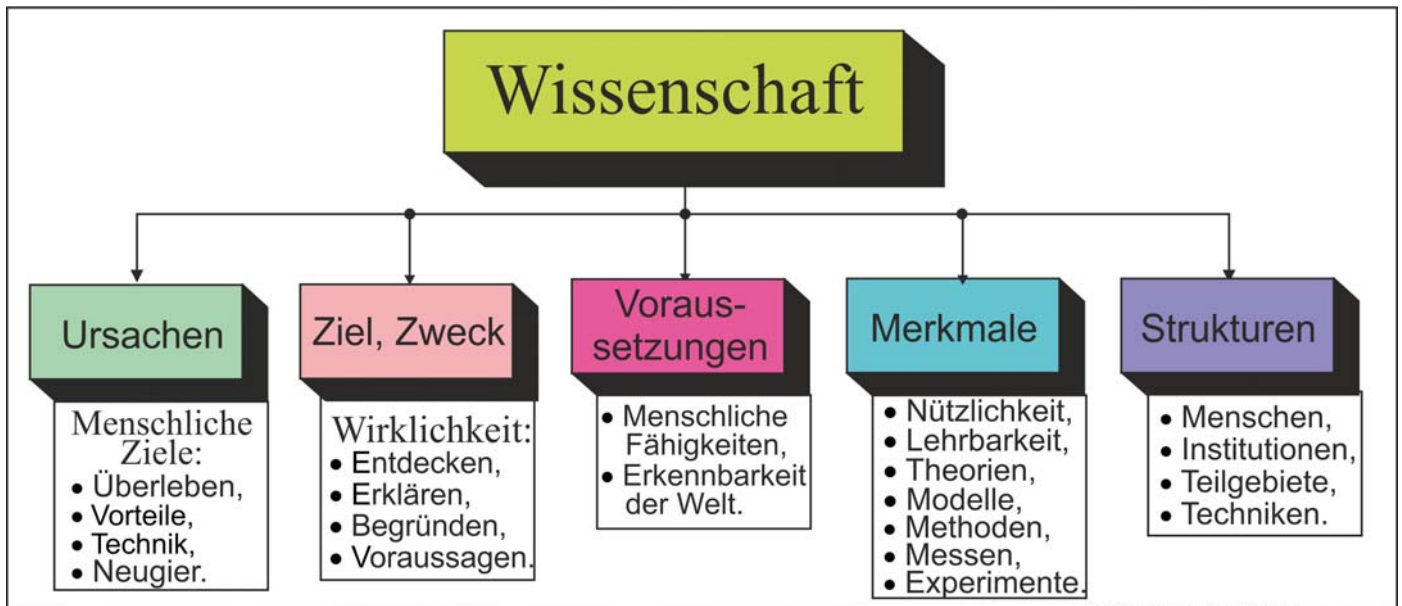
Die bisher behandelten Wege und Methoden zum Erkennen der Realität sind vor allem das Wahrnehmen, Messen und Experimentieren. Deutlich mehr ermöglichen systematische und gut geplante Methoden sowie spezielle Betrachtungen (s. u.) und technische Einrichtungen. Das alles und vieles mehr wird häufig unter dem Begriff Wissenschaft zusammengefasst und beschrieben. Insgesamt wird sie zusammen mit Erfahrung betrieben. So ergibt sich für das wissenschaftliche Arbeiten das Spektrum von **Bild 17**. Neben dem experimentellen Arbeiten kommt dabei auch ein theoretisches hinzu. Außerdem werden die Wissenschafts- und die Erkenntnistheorie einbezogen.

Für das Entstehen der Wissenschaft gibt es mehrere Ursachen, Gründe und Merkmale. Sie sind mit weiteren Aspekten – wie Zielen, Voraussetzungen und Strukturen sowie einigen wichtigen ergänzenden Begriffen – in **Bild 18** ausgewiesen.



ErlangtWissen.cdr h. völk 23.2.99/21

Bild 17. Zusammensetzung der wissenschaftlichen Arbeit.



Ziel-Inhalt.cdr h. völk 14.8.00/21

Bild 18. Wichtige unterschiedliche Gebiete der Wissenschaft.

Im Laufe der Zeit entstanden – und sie bestehen teilweise immer noch heute – zwei völlig gegensätzliche Wege für ein Gewinnen von Erkenntnissen über die existierende bzw. zu gewinnende Beschreibung der Realität. Sie betreffen entweder die Möglichkeiten des „reinen Denkens“ oder der Ableitung von Ergebnissen aus Erfahrungen und Experimenten. Die wichtigsten dazugehörenden unterschiedlichen Fakten und Eigenschaften weist die folgende Tabelle aus.

Geisteswissenschaft	Naturwissenschaft
reines Denken und Hermeneutik ¹⁵	Erfahrung und Experiment
• Befasst sich mit dem menschlichen Geist und seinen Produkten in Technik, Sprache, Kunst, Literatur, Religion, Moral, Philosophie usw. • Durch reines Denken können wir die Wahrheit über die Realität finden. • Stellt nicht abstrahierend das Allgemeine, sondern gerade das Besondere im Einzelereignis heraus. • Ergänzt kausales Vorgehen durch Wertbestimmung • Bedeutungen sollen bereits aus geheimnisvollen, aber entschlüsselbaren (biblischen) Texten und durch Beziehungen zu Übernatürlichem gewonnen werden.	• Befasst sich mit der systematischen Erfassung der Realität. • Nutzt Erfahrungen, Beobachtungen, Messungen und Experimente. • Wir befragen die Realität und verdichten die Ergebnisse zu Gesetzen usw. • Aus Einzelercheinungen werden abstrahierend hypothetischen Modelle, Gesetzmäßigkeiten und Theorien¹⁶ gewonnen. • Die Fakten¹⁷, Erscheinungen und Theorien werden beschrieben und erklärt. • Die gewonnenen Erkenntnisse werden für andere, praxisorientierte Bereiche, wie Medizin, Landwirtschaft und Technik bereitgestellt und dort genutzt.
Die metaphysische Behandlung verlangt das Aufsuchen einer schon längst vorhandenen, wahren Realität (Planck).	Die positivistische Konstruktion eines Systems ermöglicht Sätze, welche die Welt der Erlebnisse ordnet (Planck)

In diesem Sinn unterschied Immanuel **Kant** (1724 - 1804) auch zwischen

- allgemeinen Denkgesetzen, wie der Logik¹⁸,
- Gesetzen der Dinge, wie in der Physik und
- Gesetzen des Bewusstseins, wie der Ethik¹⁹.

Im weiteren Text werden fast nur noch die Naturwissenschaften berücksichtigt. Dabei arbeiten meist mehrere Wissenschaftler gleichzeitig und gut abgestimmt zusammen (**Bild 19**). Hierbei entstehen u. a. Theorien und Modelle zur Realität, die zusätzlich durch neue Begriffe und Gesetze gekennzeichnet sind. Um die recht vielen und meist auch hoch komplexen Modelle und Theorien anzuwenden, müssen sie erst mühsam von anderen Wissenschaftlern erlernt und dann inhaltlich verstanden werden. Da die Modelle und Theorien zusätzlich zuweilen verbessert oder gar durch neue und bessere ersetzt werden (s. u.), ist für viele Wissenschaftler ein ständiges Lernen notwendig.

¹⁵ Griechisch **hermeneuein** deuten, interpretieren und wird heute auch als Lehre vom Verstehen bzw. als Auslegungskunst bezeichnet.

¹⁶ Griechisch **theoria** Betrachtung, Anschauung

¹⁷ Lateinisch **faktum** das Getane, Geschehene.

¹⁸ Griechisch **logos** Vernunft, Lateinische Vorsilbe **ana** wieder, aufwärts, nach oben: Lateinisch **analogia** mit der Vernunft übereinstimmend, Gleichmäßigkeit. Heute auch angeglichen, angepasst, vergleichbar, bei Signalen oft falsch statt kontinuierlich benutzt.

¹⁹ Griechisch **ethikos** sittlich

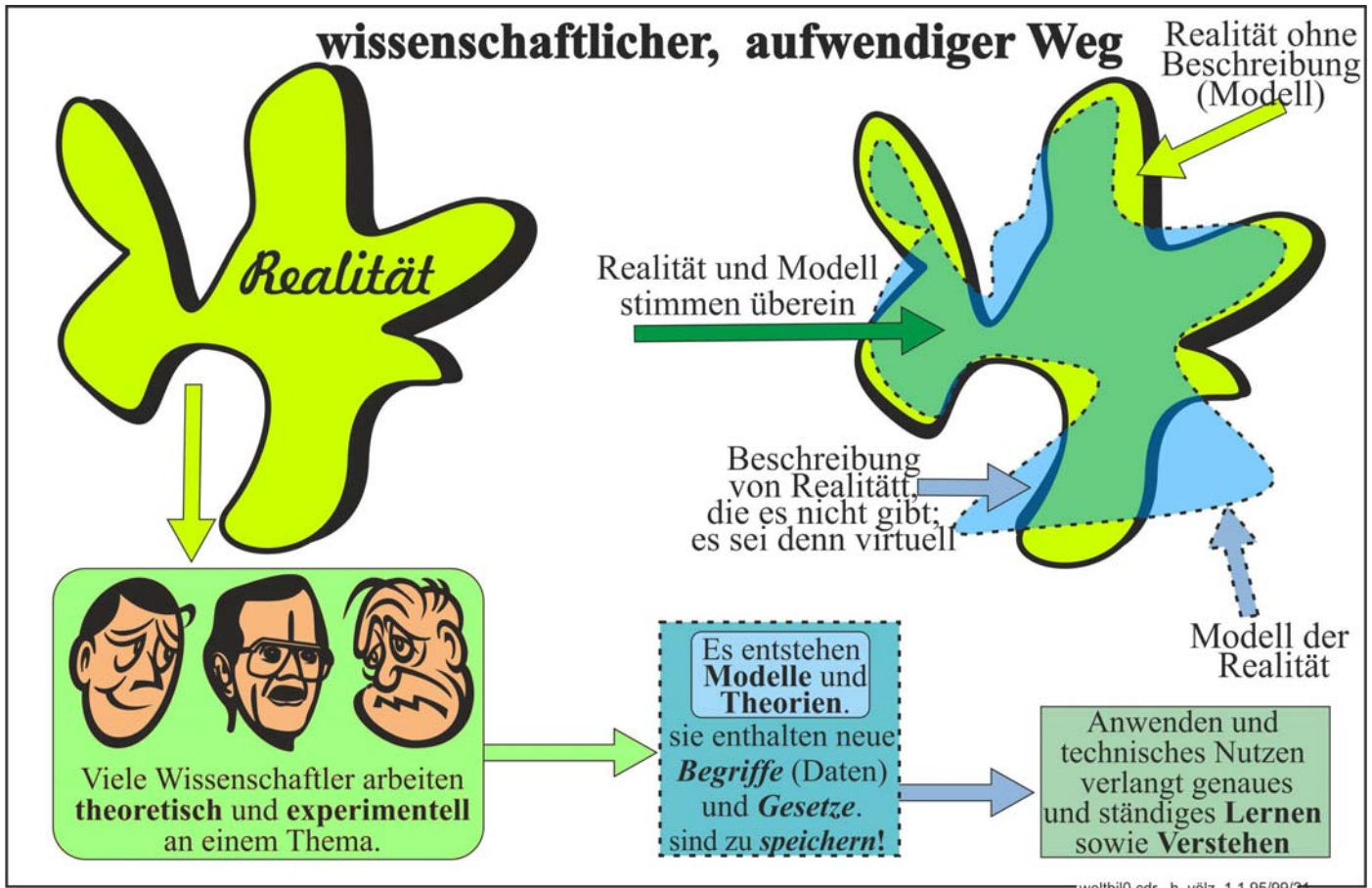


Bild 18. Vom Wahrnehmen, Messen und Experiment zum Modell und zur Theorie der Realität.

Bezüglich der Aussagekraft und umfassenden Gültigkeit werden die betont exakten Wissenschaften, wie Physik, Chemie, Geologie und Astronomie, von anderen, wie Biologie, Genetik, Anthropologie und Physiologie, unterschieden. Bei den exakten Wissenschaften wurde bis zur Entstehung der Quantentheorie die vollständige Rationalität²⁰ bis hin zum totalen Determinismus²¹ angenommen. Dafür wurde vorausgesetzt:

1. **Determinismus, Kausalität**²²: Jede Erscheinung und Wirkung hat eine (einzige) Ursache. Es ist daher möglich, durch konsequente und eventuell iterative Vereinfachung selbst höchst komplex erscheinende Zusammenhänge übersichtlich zu gestalten. Der Begriff Reduktionismus kann dann als eine spezielle Form angesehen werden, bei der die Vereinfachungen (Ockham'sches Rasiermesser) später nicht mehr zurücknehmbar sind.
2. **Stabilität**: Geringe Änderungen in der Ursache rufen auch nur geringe Änderungen in der Wirkung hervor. Sie wird auch als Kontinuumshypothese eingeführt. Sprünge und Zufälligkeiten sind ausgeschlossen.
3. **Experimentelle Wiederholbarkeit**: Gleiche Anfangsbedingungen ergeben immer gleiche Abläufe, Ergebnisse. Das setzt eine *Beständigkeit* der Welt voraus und entspricht etwa der Unveränderlichkeit (kein Zeiteinfluss) der betrachteten Aspekte der Wirklichkeit.
4. Es existieren **ewige Naturgesetze**. Die Mathematik entspricht dem wirklichen Zusammenhang der durch sie beschriebenen Größen. Vielfach wird auch angenommen, dass die Gesetze von Gott stammen (Gott ist Mathematiker) und damit selbst die Welt sind.

²⁰ Lateinisch **ratio** Rechnung, Berechnung, Rechenschaft, Denken, Vernunft, Grund, Maß, gesetzmäßig, Ordnung, Methode, Prinzip. Weiter gilt **rationalis**: vernünftig, vernunftgemäß, mit Vernunft begabt, schließend, folgernd, berechenbar und **rational** von der Vernunft.

²¹ Lateinisch **determinare** begrenzen, vollständig bestimmen

²² Lateinisch **causalitas** ursächlich.

Deshalb entwickelte Pierre Laplace (1749 – 1827) seinen erdachten Dämon. Er sollte aus den Daten eines Zeitpunktes das gesamte Weltgeschehen vollständig und exakt berechnen können. Besonders deutlich formuliert er diesen Zusammenhang in der Einleitung zu seiner Wahrscheinlichkeitsrechnung, die auf eine Vorlesung von 1795 zurückgeht. Diese hielt er, als er zusammen mit Lagrange vom Nationalkonvent zum Professor der Mathematik an der école normale ernannt wurde:

„Eine Intelligenz, der in einem gegebenen Zeitpunkt alle in der Natur wirkenden Kräfte bekannt wären und ebenso die entsprechenden Lagen aller Dinge, aus denen die Welt besteht, könnte, wenn sie umfassend genug wäre, alle diese Daten der Analyse zu unterwerfen, in einer und derselben Formel die Bewegungen der größten Körper des Weltalls und die der leichtesten Atome zusammenfassen; nichts wäre für sie ungewiß, und die Zukunft wie die Vergangenheit wäre ihren Augen gegenwärtig.

Der menschliche Geist liefert in der Vollkommenheit, die er der Astronomie zu geben wußte, eine schwache Skizze dieser Intelligenz. Alle seine Anstrengungen in dem Suchen nach Wahrheit zielen dahin, ihn unaufhörlich jener Intelligenz zu nähern, die wir geschildert haben, aber er wird immer unendlich weit von ihr entfernt bleiben.“

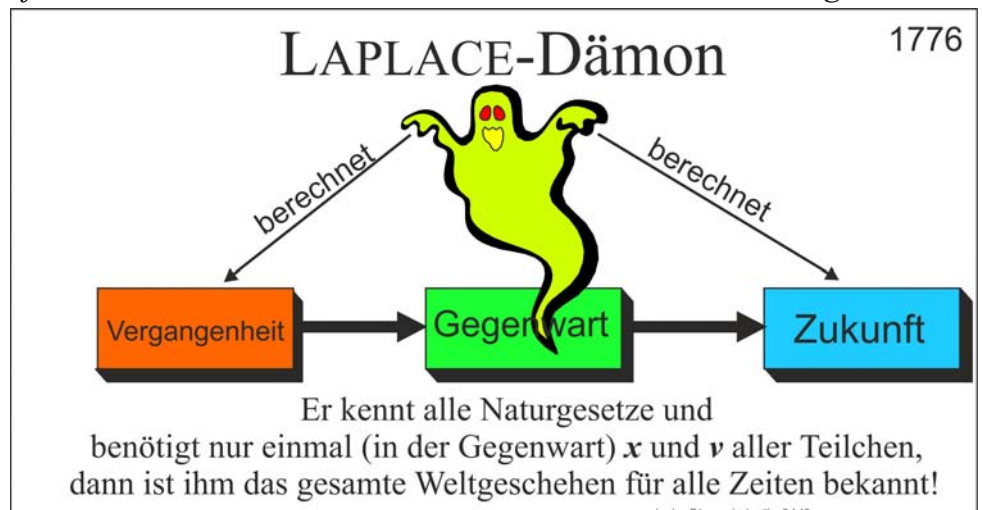


Bild 19. Für einen Laplace'schen Dämon ist der vollständige Weltablauf vollständig durchsichtig.

Jedoch würde der **Laplace'sche** Dämon nur dann gelten, wenn in der Realität die folgenden Gesichtspunkte vollständig und exakt erfüllt wären.

Wenn die Realität	und wenn der Dämon	Dann könnte er
- deterministisch ist und Ständigkeit besitzt, - nur wechselwirkende Teilchen enthielte, - die Newtonschen Bewegungsgleichungen uneingeschränkt gültig sind.	- alle Naturgesetze kennen würde, - alle Rand- und Anfangsbedingungen zu irgend einem Zeitpunkt mit einer absoluter Genauigkeit kennen würde - und alle diese Daten speichern könnte, - mathematisch leistungsfähig und schnell genug wäre, um alle Gleichungen exakt lösen zu können.	- das Geschehen der Realität in allen Einzelheiten eindeutig bestimmen (gleiche Ursachen erzeugen gleiche Wirkungen), - alle Ereignisse der Vergangenheit und der Zukunft korrekt errechnen.

Das stellte sich dann aber immer mehr als unzulässig heraus und als Folge wurde auch nicht mehr auf eine Weltformel gehofft. So formulierte schließlich auch Umberto **Eco** (*1932):

„Ich bin zur Überzeugung gekommen, dass die ganze Welt ein Rätsel ist, ein harmloses Rätsel, das schrecklich wird durch unseren eigenen verrückten Versuch, sie zu deuten, als ob ihr eine tiefe Wahrheit zugrunde liege ...“.

In diesem Sinne sind in Bild 18 auch zwei Grenzen für die Erkenntnisse der Realität dargestellt. So gibt es einmal Fakten und Geschehnisse, die nicht korrekt beschrieben werden, und zweitens gewonnene Ergebnisse, die in der Realität nicht existieren. Beide sind im Bild 18 schematisch durch

den Vergleich mit links oben und im rechten Teil durch unterschiedliche Farben deutlich hervorheben.

Die Realität enthält sehr viele Objekte, die häufig nicht einfach zugänglich sind. Durch unser Denken kommen außerdem noch abstrakte Quasiobjekte, wie Ideen, Klassenbildungen usw. hinzu. Deshalb sind Methoden zur Vereinfachung und Komprimierung entstanden. So werden oft **Zusammenfassungen**, wie Obst aus Birnen, Kirschen, Äpfeln usw. gebildet. Ähnlich entstehen **Klassen**²³ als Gemüse, Gesang, Musik, Lebewesen, Gewässer usw. Dabei ist jedoch die Rückkehr zu einem Einzelstück recht schwierig. Zuweilen genügt es auch, den **Artikel wegzulassen**. So entspricht „Haus“ ohne Artikel etwa der Klasse (aller) „Häuser“ und zwar ganz im Gegensatz zu „ein“ oder „das Haus“. Teilweise ist hier auch die wissenschaftliche **Klassifikation** als geordnete Einteilung und Gliederung eines größeren Gebietes in genau gegeneinander abgegrenzte Teilgebiete einzuordnen, wofür auch besondere Begriffe, wie Thesaurus, Ontologie, Verzeichnis, Systematik, Taxonomie oder Typologie benutzt werden (Beispiele s. S. 22.). Eine **Reduktion**²⁴ senkt die Komplexität durch Weglassen von Unwesentlichem. Dabei ist die Auswahl meist schwierig. Dennoch hat bereits im Mittelalter hierfür Ockham sein **Ockham'sches Rasiermesser** eingeführt. Es schneidet quasi das „Unwesentliche“ ab. Dabei besteht eine gewisse Ähnlichkeit zur verlustbehafteten technischen Komprimierung. Deutlich umfangreicher wirkt sich eine **Abstraktion**²⁵ aus, die zwar auch Unwesentliches weglässt, jedoch zugleich Typisches hervorhebt und so Übergeordnetes bildet. So ist es beim Stuhl unwesentlich, wie viele Beine er besitzt und ob er aus Holz oder Metall besteht. Wesentlich ist dagegen, dass er zum Sitzen geeignet ist. Sehr Verschiedenes kann ein **Analogschluss** zusammenfassen. Dabei genügt es, wenn verschiedene Vorgänge nur einen formal ähnlichen Verlauf aufweisen, sich z. B. nur im Kreis bewegen. Eine weitaus stärkere Spezialisierung ist **Axiomatik**²⁶. Sie geht von zwei Grundannahmen aus, mit denen viele Möglichkeiten und Aussagen abgeleitet werden (**Bild 20a**):

1. Die Axiome „□“ sind statische Festlegungen und müssen unmittelbar einleuchtend sein, so dass kein Hinterfragen oder Beweisen notwendig scheint. Außerdem müssen sie logisch unabhängig sein.
2. Die Regeln „→“ sind dagegen dynamisch, sollen möglichst einfach sein und dürfen zu keinem Widerspruch führen.
3. Gewünscht ist **Minimalität**: Es sollen möglichst wenige Ausgangsdaten genügen und es soll eine geringe Komplexität existieren. Ferner soll sich eine **Vollständigkeit** für alle bekannten und wahrscheinlich auch gültigen, wahren Folgerungen ergeben. Das Axiomensystem muss insgesamt **widerspruchsfrei** und **unabhängig** sein.

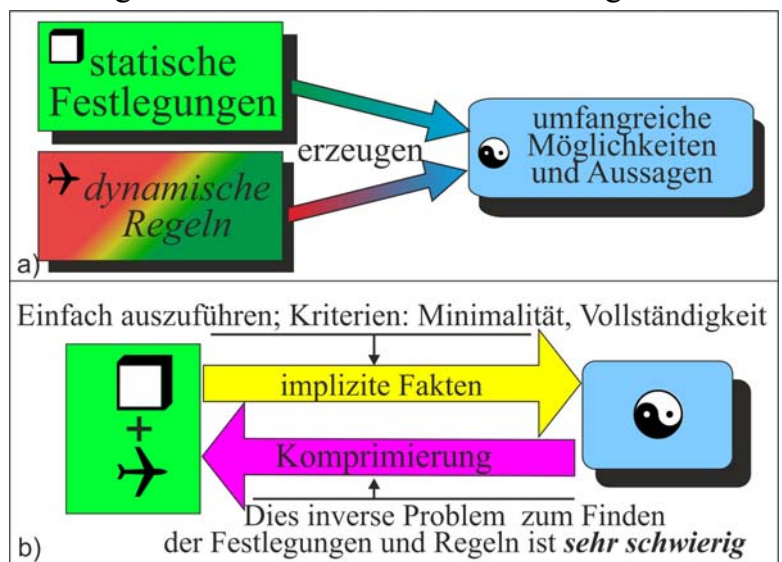


Bild 20. Struktur und Anwendung der Axiomatik.

Infolge der oft sehr hohen Verdichtung und der komplexen Ableitungen wird mit der Axiomatik sehr viel erfasst und beschrieben. Daher kann ein Mensch oft nicht alle Möglichkeiten eines Axiom-

²³ Lateinisch *classis* Klasse und *facere* machen. Sie wurde um 500 v. Chr. Von Tullies eingeführt. Entsprechend ihrem Besitz teilte er die römischen Bürger in sechs Klassen ein. Von Marx wurde der Begriff wesentlich vertieft.

²⁴ Lateinisch *reductio* Zurückführung.

²⁵ Lateinisch *abstractus* abgezogen.

²⁶ Griechisch *axioma*; zu *axioun* für Recht halten, Forderung. Nach Archimedes (um 285–212 v. Chr.) Lateinisch *axioma* Wertschätzung Würdigung; Würde, Ansehen, Forderung.

System „☉“ vollständig erkennen. Es muss alles erst „ausgewickelt“ werden. Dennoch ist die Anwendung der Axiomatik meist relativ einfach. Dagegen ist es sehr schwierig neue Axiome und Regeln zu finden und gilt daher dann als große wissenschaftliche Leistung. Als Beispiele hierfür seien nur die **Euklidische Geometrie** und Einsteins **Relativitätstheorie** genannt. Heute wird allgemein anerkannt, dass jene Persönlichkeiten sehr *hohen wissenschaftlichen Rang* erhalten, die neue Systeme mit fundamentalen Begriffen entwarfen und damit vorher unverbundene Wissensgebiete vereinigten. Das gilt auch dann, wenn sie keine großen Experimentatoren waren, wie z. B. Isaac Newton (1643 – 1727), James Clerk Maxwell (1831 – 1879) und Charles Robert Darwin (1809 – 1882). Die folgende Tabelle zeigt die beachtliche Universalität der Axiomatik

Statische Festlegung □	Dynamische Festlegung →	Gefolgertes ☉
Axiome	Gesetze, Regeln	Theorie, Fachgebiete
Personen, Wesen	zulässige Handlungen	Erzählungen
Schachfiguren	Schachregeln	Partien
Urgründe	zulässiges Geschehen	Ablauf, Entwicklung
Alphabet	Regeln, Syntax	Sprache
Daten	Methoden	Wissen, Modell
Eingaben	Algorithmen	Ergebnisse

Beispiele für wissenschaftliche Klassifikationen (Systeme):

400 v.Chr.	Aristoteles stellt ein System zur Einordnung der Tiere auf.
1735	Carl von Linné (1707 - 1778) Systema naturae (Biologie).
1834	A. M. Ampère (1775 - 1836): Essai sur la philosophie des sciences.
1876	M. Dewey : Decimal classification and relativ index (DK).
1879	Ch. A. Cutter : Expansive classification.
1901	Library of Congress Classification.
1905	P. Otlet ; H. Lafontaine : Universal decimal classification.
1926	P. Oppenheim : Die natürliche Ordnung der Wissenschaften.
1933	S. R. Ranganathan : Colon classification.
1935	H. E. Bliss : A bibliographic classification.
1938	L. N. Tropovskij : Tablicy bibliotenoj klasifikacii.
1965	B. M. Kedrov : Klasifikacija nauk (topographisch).
1966	H. G. Frank : Riemannsche Flächen für topologische Anordnung.

Fragen an die Realität sind nicht nur bezüglich Fakten und Geschehen der Realität erforderlich (vgl. Verhör S. 15). Wenn dazu Antworten gefunden sind, werden erneut und andere **Fragen** erforderlich. Sie betreffen die Universalität, Gültigkeit bzw. Wahrheit sowie die Beschreibung, Erklärung und Begründung der Ergebnisse. Dabei ergeben sich die folgenden drei Fragearten.

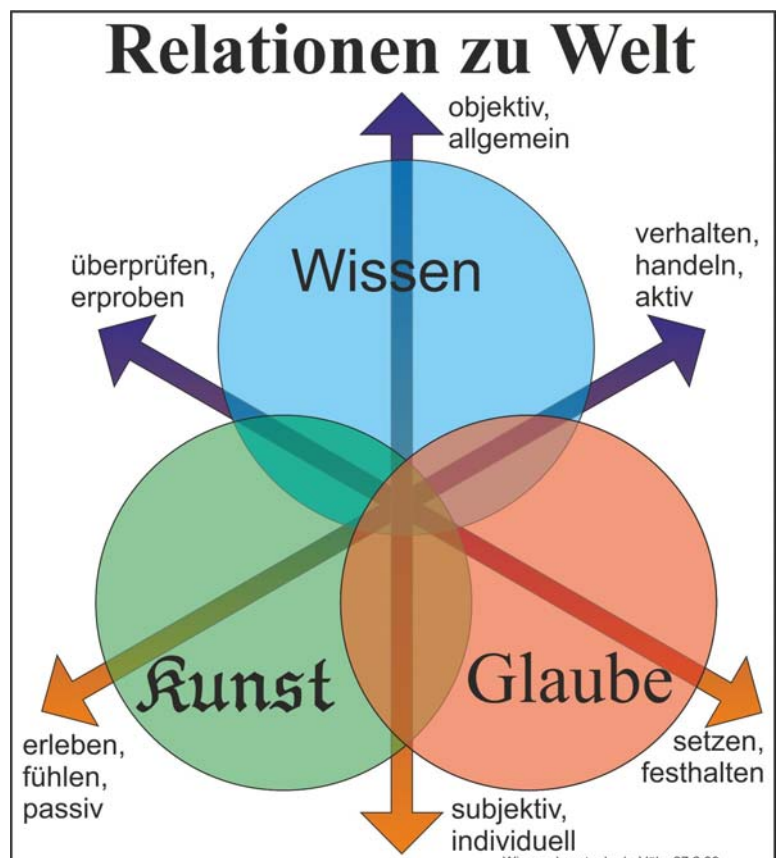
Betreff	Entscheidung	Ergänzung	Beschreibung, Erklärung, Begründung
Fragentyp	Ist es wahr, richtig, gültig, verlässlich?	Was, wann, wer, wo, welche, wie viele?	Warum, weshalb, wieso, wofür?
Beispielfragen	Ist $2 \cdot 2 = 4$ richtig? Ist Schnee weiß? Viren Lebewesen? überabzählbar?	Farbe der Tulpe? Wer hat das getan? Wo liegt Dresden? Wann erfolgte Urknall?	Warum ist Schnee weiß? Weshalb lebt der Mensch? Wieso gibt es ein Sein? Wozu nutzt es?
Probleme	Entscheidbarkeit	Vollständigkeit der Tabelle	Keine allgemeine Methode bekannt
Ergebnis, Antwort	Ja/Nein, weder-noch, sowohl-als auch.	Ja/Nein, ist Teil von, gehört zu, Klassifikation.	Nutzen, Schaden, Axiomatik, Ursache → Wirkung, Verlauf.

Die Fragen sollen immer möglichst zu einem rationalen Erkenntnisgewinn führen, der sich deutlich von bloßer Meinung, von Glauben, Erfahrung, Weisheit, Sinnlichkeit, Fühlen usw. abgrenzen lässt. Daher sollen die Antworten auf *Ja/Nein-Fragen* möglichst gut der binären Logik genügen. Aber Schnee kann auch *schmutzig* weiß sein und Viren sind keine *selbständigen* Lebewesen. So erfordern derartige Fragen zuweilen zusätzlich Adjektive zur Präzisierung der Antwort. Selbst wenn das bei der *Tabelle* der *Ergänzungsfragen* nicht notwendig sein sollte, kann immer noch ihre Vollständigkeit ungenügend sein. Noch erheblich schwieriger sind teilweise *Fragen der dritten Art* zu beantworten, denn sie setzen ein beachtliches inhaltliches Verständnis voraus. Bezüglich der notwendigen inhaltlichen Kenntnis besteht eine Rangfolge des Aufwandes von der Beschreibung über die Erklärung bis zur Begründung. Das nutzen oft unbewusst Kinder bei ihrem ständigen Fragen. Eine **Beschreibung** entspricht annähernd einem Bild oder Film. Sie zeigt einfach, wie die Sache aussieht oder abläuft. Etwas böseartig ließe sich daher sagen, dass ein Ferkel, das vom Stalldach kullert, ein Hinweis dafür sein könnte, dass „Schweine fliegen können“. Eine **Erklärung** sollte einsichtig sein, also anthropologisches Verstehen bewirken. Das verlangt zusätzliche Zusammenhänge. Sie erfordert aber dennoch oft keine Experimente und wird daher häufig erst im Nachhinein erreicht, teilweise soll sie auch in die Zukunft weisen. Für den Regenbogen kann so sein Aussehen aus Brechung und Streuung erklärt werden. Die **Begründung** geht hauptsächlich auf die Ursachen der Fakten oder des Geschehens zurück. Beim Regenbogen gehört dazu dann auch, wann, wo und warum er auftreten kann. So werden Hypothesen, Gesetze oder gar Theorien angestrebt, die letztlich das wissenschaftlich höchste Ziel sind.

2.4. Nachweis von Wahrheit

Gewonnenes Wissen (s. Abschnitt ##) soll „erkanntes Gültiges“ sein, muss also wahr sein oder der Wahrheit entsprechen. Im Deutschen existiert „wahr“ seit dem 8. Jh. in mehreren Varianten. Das alte *wär* bedeutete: der Wahrheit entsprechend, wirklich, gewiss, echt und recht. *Wäre* war der Vertrag, die Sicherheit und die Gewährleistung. Damit verwandt ist *wahrhaft* als aufrichtig sein. In anderen Sprachen werden für wahr andere Stämme benutzt. Im griechischen *aletheia*; im Lateinischen *veritas*, im Französischen *vérité* und im Englischen *truth*. Entsprechend **Bild 21** sind Glauben und Kunst weitgehend gegensätzlich zur Wahrheit. Jedoch in allen vorhergehenden Bildern fehlen Hinweise zur Wahrheit, denn sie tritt meist übergeordnet auf und wird daher oft stillschweigend vorausgesetzt.

Bild 21, Zum Verhältnis von Wissen, Glauben und Kunst.



Streng genommen muss die Wahrheit und Gültigkeit von Erkenntnissen bewiesen werden. Denn nur dann sind richtige Schlussfolgerungen zur Realität möglich. Aber auch bereits für die Planung und Auswertung von Experimenten sowie als Grundlage für Theorien usw. ist sie wesentlich.. So ergibt sich leicht ein Zirkelschluss (circulus fitiosus s. S. 1). Bereits *Aristoteles* (384 – 322 v. Chr.) entwickelte deshalb eine **Korrespondenztheorie**, welche die Relation zwischen der Wahrnehmung und den Ideen betrifft. Er trennte dabei deutlich zwischen Bezeichnungen, Begriffen und Gegen-

ständen. Wahr können nur Aussagen sein, die sprachlich in Form von Sätzen auftreten. Einzelne Ausdrücke können weder wahr noch falsch sein. Eine wichtige Weiterentwicklung entstand durch *Francis Bacon* (1561 – 1626). Er schuf die Methode des Empirismus in Richtung der **Verifikation**²⁷. Eine Hypothese geht davon aus, dass die gewonnenen Erkenntnisse ausschließlich bestätigt werden. Wenn das immer wieder erfolgt, dann wird schließlich aus Annahmen, Folgerungen und Begründungen eine verbindliche Theorie. Doch recht bald zeichnete sich ab, dass eine wissenschaftliche Theorie weder aus der Erfahrung logisch ableitbar noch durch Erfahrung verifizierbar ist. Deshalb zeigte 1934 Sir *Karl Raimund Popper* (1902 – 1994), dass unser gesamtes Wissen aus Hypothesen besteht, deren Wahrheit nie sicher ist [Pop34]. Wissen besteht nämlich vorwiegend aus All-Sätzen, die immer und überall gelten sollen. Das ist aber mit dem stets nur endlich vielen Beobachtungen nicht zu gewährleisten. Deshalb führte er neben der Bewährung und strengen Prüfung die **Falsifikation**²⁸ ein. Gemäß dieser Methode genügt ein Gegenbeispiel, um die entsprechenden Inhalte für ungültig zu erklären. Die übliche Praxis zeigt jedoch, dass zuweilen Hypothesen dennoch weiter benutzt werden. Einstein behauptete sogar, dass es immer Experimente geben wird, die auch Abweichendes von der Theorie aussagen und trotzdem der Theorie nicht zu widersprechen brauchen. 1962 führte dann Thomas *Samuel Kuhn* (1922 - 1996) den Begriff des **Paradigmas**²⁹ ein [Kuh67]. Hierunter fasste er die in der aktuellen Wissenschaft vorherrschenden Hypothesen und Theorien zusammen, denen – von Außenseitern abgesehen – die Wissenschaftsgemeinde so lange folgt, bis sich die widersprechenden Aussagen so stark ansammeln, dass eine Änderung erzwungen wird. Der Umbruch erfolgt meist „gewaltsam“ und ist folgeschwer. Deshalb nannte ihn Kuhn wissenschaftliche Revolution. Derartige Probleme trieben Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) bezüglich seiner immer noch voll gültigen statistischen Thermodynamik schließlich in den Freitod. Max Planck (1848 – 1947) stellte hierzu später fest, dass sich eine neue wissenschaftliche Wahrheit normalerweise

„nicht in der Weise durchzusetzen pflegt, daß ihre Gegner überzeugt werden und sich, als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht wird“.

Zuweilen wird der Umbruch gemäß Darwins Evolutionstheorie als das Überleben der „tüchtigsten“ Hypothese bzw. Theorie aufgefasst. Bei einigen Außenseitern existierte nämlich das „neue“ Paradigma bereits vor dem Umbruch, sozusagen in einer Nische. Daher erfolgt ein Paradigmenwechsel von einem Ausgangspunkt, hat aber kein Ziel. Das geschieht nicht zum neuen Paradigma, sondern vom alten weg. Eine Ausnahme von dieser Entwicklung ist das *experimentum crucis* (s. o.). Letztlich gehen nämlich in alle Experimente auch gesellschaftliche Interessen ein. Das betrifft sowohl die anerkannten Theorien als auch das, was gerade gefördert, finanziert wird. Durch Machtinteressen usw. wird dieser Übergang seit jeher und immer noch vielfältig erschwert. Als Beispiel dafür sei nur die Abschwörung von Galilei kurz erwähnt. Bertold **Brecht** (1898 – 1956) lässt ihn hierzu in seinem „Leben des Galilei“ am Ende der 14. Szene selbstkritisch sagen:

„Ich hatte als Wissenschaftler eine einzigartige Möglichkeit. In meiner Zeit erreichte die Astronomie die Marktplätze. Unter diesen ganz besonderen Umständen hätte die Standhaftigkeit eines Mannes große Erschütterungen hervorrufen können. Hätte ich widerstanden, hätten die Naturwissenschaftler etwas wie den hippokratischen Eid der Ärzte entwickeln können, das Gelöbnis, ihr Wissen einzig zum Wohle der Menschheit anzuwenden!“

In der 13. Szene ergänzt er dann im Gespräch zwischen Galilei und seinem Schüler Andrea:

²⁷ Lateinisch *veritas* Wahrheit.

²⁸ Lateinisch *falsus* unbegründet, grundlos, irrig, falsch zurück.

²⁹ Griechisch *paradigma* Beispiel, Vorbild, Verweis, Beweis, Urbild, Modell, Muster, mustergültiges Beispiel.

Im Speicher befindet sich der Speicherzustand, der möglichst lange und unveränderlich das zu speichernde Objekt, aber zumindest dessen Eigenschaften aufrechterhält. Er entspricht daher quasi dem ursprünglichen Objekt. Die entsprechende Aufzeichnung erfolgt zu einer wählbaren Zeit t . Zu einer späteren Zeit $t + \Delta T$ erfolgt die Wiedergabe und erzeugt dabei möglichst genau die Eigenschaften des ursprünglichen Objekts am Ausgang (als Signal). Er entspricht also dem Zustand bei der Aufzeichnung. Meist ist die Wiedergabe mehrfach und zu verschiedenen Zeiten ΔT wiederholbar. Zur Aufzeichnung neuer (anderer) Objekte kann vorher eine Löschung des alten Speicherzustandes nützlich sein. Auch ein einfaches Überschreiben ist zuweilen – besonders bei digitalen Werten – möglich. Alle Prozesse erfordern meist entsprechende Energie.

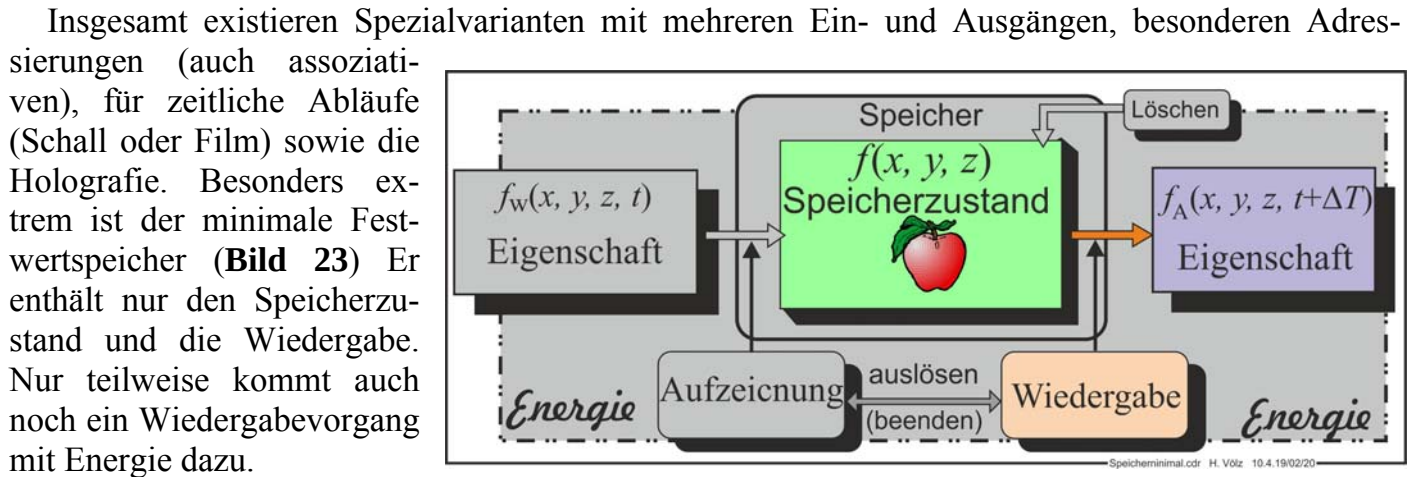


Bild 23. Beim MinimalSpeicher fehlen im Vergleich zu Bild 22b die grau gezeichneten Bauteile.

Es gibt eine sehr große Anzahl von Speicher-Technologien und -Anwendungen. Einen nahezu vollständigen und detaillierten Überblick fasst **Bild 24** zusammen. Er basiert auf den drei Bänden mit etwa 2 500 Seiten in [Völ03] bis [Völ05].

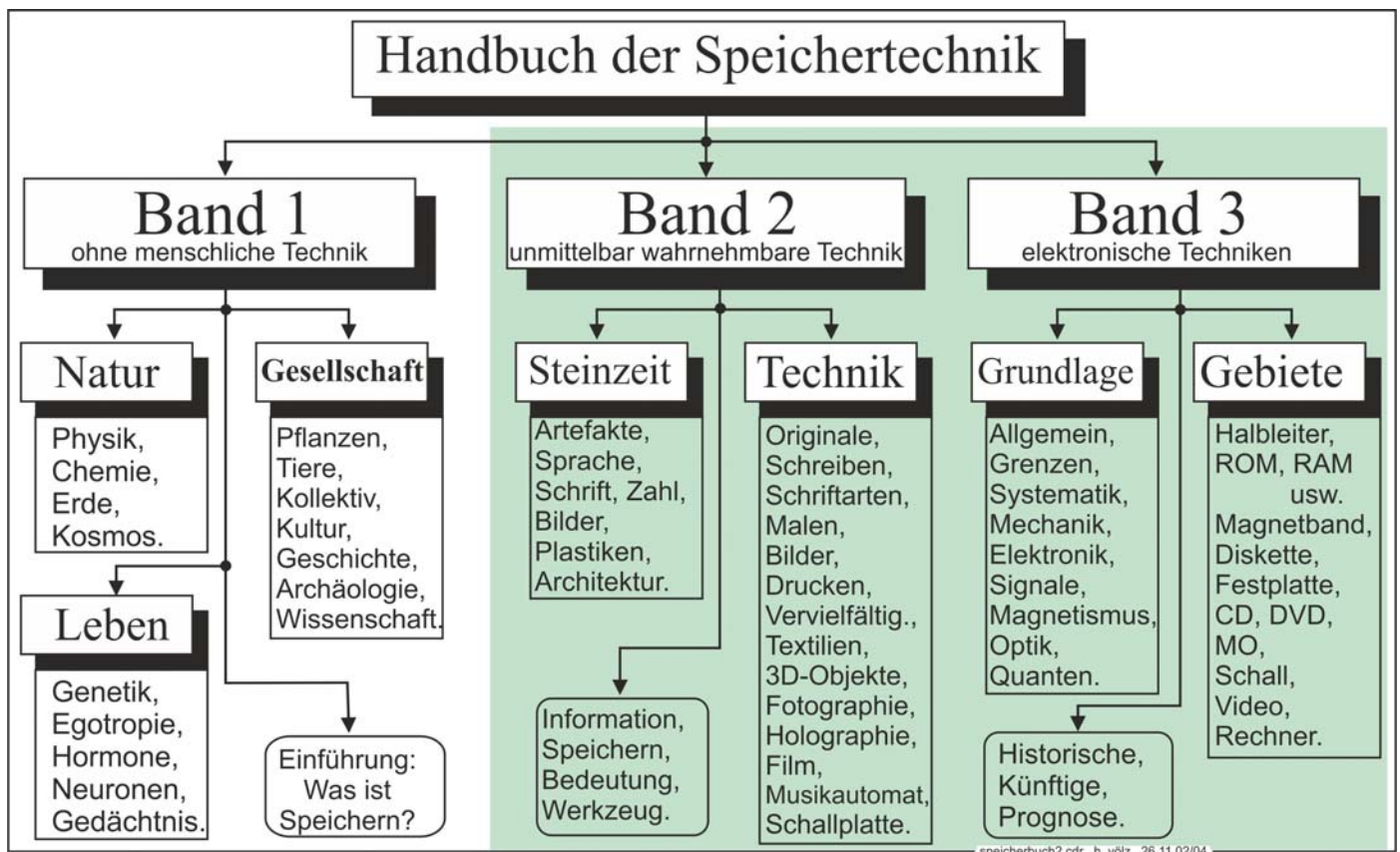


Bild 24. Überblick zur gesamten Speichertechnik mit ca. 2500 Seiten

Aus der Sicht der heute üblich angenommenen Evolution der Realität lassen sich acht Speicheretappen unterscheiden. Sie sind in [Völ19] abgeleitet und genauer beschrieben. Das Ergebnis weist die folgende Tabelle aus.

Art, Etappe	Wo fixiert	anthropomorpher ³⁰ Zweck, Ziel	Alter/a
Ständigkeit	Realität.	Gültigkeit der Gesetze und Konstanten.	$\rightarrow \infty?$
physikalisch, chemisch	Stoff (Welle und Felder), Kosmos, Erde, Objekte usw.	geschehen einfach, Weltentwicklung, komplexe Systeme, viele Funktionen.	$1,5 \cdot 10^{10}$
egotrop	Eigentlich noch unbekannt, Immunsystem, Knochenmark.	Unterscheidung von Ich und Fremd, Nutzen und Schaden (Schutz).	$> 3 \cdot 10^9$
genetisch	DNS, Chromosomen.	Erhaltung von Art, individuellem Leben.	$3 \cdot 10^9$
neuronal	Gedächtnis (Neuronen)	anpassendes Verhalten, Lernen.	$5 \cdot 10^8$
gesellschaftlich	Verteilt über Individuen (Meme?).	Gemeinsame Arbeit, Kultur, Zivilisation.	$5 \cdot 10^7$
technisch	Speichermaterial, Werkzeug.	Langer Erhalt außerhalb des Menschen.	$5 \cdot 10^4$
vernetzt	Internet, Expertensystem, KI	Alles Wissen sofort verfügbar.	ab 1960

Leider ist es üblich, nur auf die Vorteile jeder neuen Etappe hinzuweisen. Die Evolution erfolgt jedoch ohne Ziel und ergibt sich so aus dem Abgleich der Vor- und Nachteile der jeweiligen Etappe. Deshalb weist die folgende Tabelle zusätzlich wesentliche Nachteile aus.

Art, Etappe	Vorteile	Mögliche Probleme, Nachteile
physikalisch-chemisch	Veränderungen, Entstehung physikalisch-chemischer Teilchen	Unsicherheiten und Vernichtung
egotrop	Unterschied: innen $\leftrightarrow$ außen, nützlich $\leftrightarrow$ schädlich; (Viren?)	Verbrauch (Zerstörung) von Objekten
genetisch	Entstehung von Leben	Tod: Alles Leben lebt vom Lebendigen
neuronal	Wahrnehmung, Gedächtnis, Sprache	Planmäßig: Lügen und Betrug
gesellschaftlich	Kultur, Zivilisation, Nation, Bildung	Zerstörungen und Kriege
technisch	Verbesserung des Lebens (Technik)	Massenvernichtungen, z. B. Atombombe
vernetzt	Sofortiger Zugriff auf alle Daten	Vergleich von allem bereits Vorhandenen

3.1 Möglichkeiten und Grenzen des Gedächtnisses

Für die Erkundung der Realität bieten die ersten vier Speicheretappen nur wenig Möglichkeiten. Die fünfte, neuronale ist dagegen sowohl für unsere Wahrnehmungen als auch für unser Bewusstsein und Wissen entscheidend. Deshalb sei unser Gedächtnis etwas ausführlicher mittels **Bild 25** betrachtet. Funktionell sind drei Stufen wesentlich: Das Gegenwartsgedächtnis GG (auch Arbeitsgedächtnis genannt), das Kurzzeitgedächtnis KZG und das Langzeitgedächtnis LZG (auch Dauergedächtnis genannt). In einigen Arbeiten werden manchmal KZG und LZG zu einem Dauergedächtnis zusammengefasst. Seit den Arbeiten von Ebbinghaus 1885 sind wesentliche Kenndaten der Gedächtnisse bestimmt worden [Ebb85]. Da sie aus dem Lernen und Vergessen sinnloser Silben oder Zufallszahlen bestimmt werden, gelten sie eigentlich nur für verbal Bezeichnetes. Die drei Stufen beruhen auf unterschiedlichen neuronalen Effekten (gelb). Sie können auch auf spezifische Art gestört werden (rot) und sind näherungsweise durch technische Modelle beschreibbar (blau). Bei einer Speicherung ändern sich dabei vor allem die einbezogenen Synapsen zunächst funktionell im GG und KZG sowie strukturell im LZG (unten gelb). Im Gegensatz zu fast allen technischen Speichern – mit Ausnahme der Holografie – existieren jedoch für die gespeicherten Inhalte nirgends eigene Speicherorte. Denn bei Gehirnschädigungen sind noch nie einzelne Begriffe verloren

³⁰ Anthropomorph von *griechisch* anthropos Mensch und morphein bilden, formen: etwa aus betont menschlicher Sicht, Vorstellung, die aber nicht der Realität entsprechen muss.

gegangen. Daher ist wahrscheinlich, dass jeder einzelne Begriff (Inhalt) komplex auf Millionen zufällig ausgewählter Neuronen verteilt abgelegt ist.

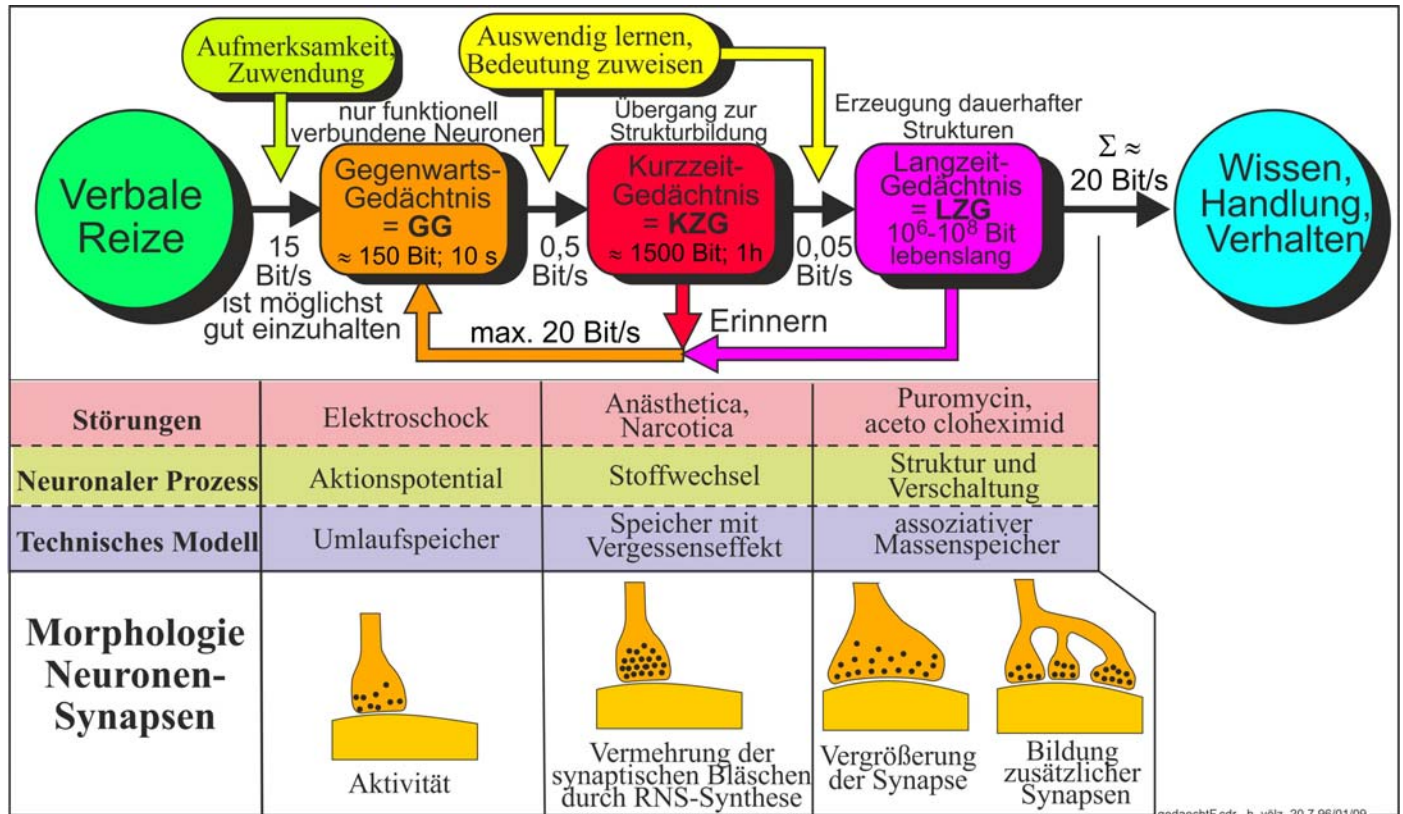


Bild 25. Strukturen und einige Funktionen unseres Gedächtnisses u. a. [Dri72], [Völ03].

Von der Wahrnehmung bis zur endgültigen Speicherung geschehen mehrere Prozesse: Mit der Wahrnehmung strömt auf uns meist eine große Menge Fakten usw. ein (s. Bild 3). Durch Aufmerksamkeit und Interesse wird davon nur ein kleiner Teil ausgefiltert, denn unser GG und damit auch unser Bewusstsein kann nur 15 Bit/s übernehmen. Durch weitere Filterungen gelangen dann nur noch 0,5 Bit/s ins KZG und sogar nur noch 0,05 Bit/s dauerhaft ins LZG.

Umfangreiche Untersuchungen wiesen zusätzlich nach, dass unser GG und Bewusstsein immer möglichst genau die 15 Bit/s anstrebt. Dabei bleibt unser Interesse erhalten und teilweise empfinden wir Genuss. Bei geringerem Angebot langweilen wir uns und suchen aufwändig nach Neuem. Bei zu großer Menge sind wir überfordert (Verwirrung) und suchen nach Details (**Bild 26**).

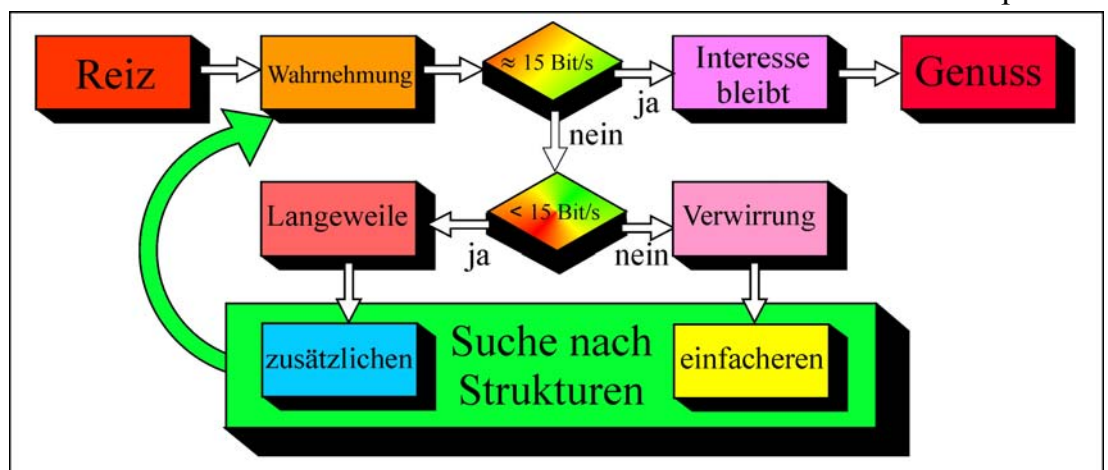


Bild 26. Optimierung unserer Wahrnehmung auf 15 Bit/s.

Ein in Klassik geübter Hörer kann daher auch alle derartigen Musikstücke problemlos mit Genuss hören. Meist dürfte er aber Probleme bei der Rezeption von Musik aus einem ihm unbekannten Kulturkreis, z. B. einer indischen Raga, haben. Denn in ihr kann er zunächst keine bekannten Strukturen, wie Themen, Motive oder Rhythmen, finden. Sie wird ihn daher überfordern oder gar langweilen. Ähnliche Situationen treten immer dann auf, wenn uns nahezu Unbekanntes oder völlig

Neues entgegentritt. Dabei gelingt meist keine „sinnvolle“ Auswahl und Interpretation. Der Datenfluss überfordert uns.. Das ist die typische Ausgangs-Phase (der Verwirrung) beim Lernen von Neuartigem. Bei mehrfacher, aufmerksamer Wiederholung wird jedoch bald Typisches erkannt und danach auch wiedererkannt. Das kann bald zum Genuss führen und ist als Phase des Wiedererkennens bekannt. Nach weiterer Übung werden dann sogar Varianten und deren spezifische Eigenschaften deutlich. Das ist die dritte Phase des Lernens und entspricht den Fähigkeiten eines Musikkenners. Sie wurde von Adorno als analytische Phase bezeichnet. Zusammengefasst entsteht die folgende Tabelle.

Phase	Wirkung	Beispiel
Verwirrung	Informationsflut ist so groß, dass keine spürbare Rezeption erfolgt	Musik aus unbekanntem Kulturkreis
Wiedererkennung	Einige Strukturen werden erkannt und mit Genuss wiedererkannt	Klassikgewohnter Hörer rezipiert total fremdes Werk
Strukturierung	Strukturen und Verknüpfungen sind erkannt, gespeichert. Neues und Ähnliches ist gut rezipierbar. Vergleich von aktuell Ablaufendem und Gespeichertem	Rezeption eines Musikkenners (analytisches Hören)!

Ergänzend hierzu erfolgten in der Komponistenklasse der Musikhochschule Hanns Eisler unter Leitung von Wolfram Heicking experimentelle Untersuchungen [Völ75]. Dazu wurden 35 Kompositionen von 24 Komponisten verschiedener Epochen ausgewählt (s. folgende Seite): Die Zeitmessungen für das Auftreten der Motive realisierte dann Manfred Nitschke. Eine Auswahl der Ergebnisse zeigt **Bild 27**. In a) sind vier einzelne Beispiele und in b) die Mittelwerte über alle Werke dargestellt. Einmal wurden sie nur als Häufigkeiten gezählt und dann umgerechnet auf ihre Zeitdauern. Ziemlich überraschend war damals der mittlere Wert von 5 Sekunden statt der erwarteten 10 Sekunden. Doch bald wurde deutlich, dass im GG immer fünf aktuell ablaufende Sekunden mit fünf bereits gespeicherten Sekunden zum Vergleich benötigt werden. Daher sind üblicherweise in den 10 Sekunden des GG etwa 7 Chunks (englisch Klotz, Stück ähnlich einem Begriff) unterscheidbar ($2^7 = 128$ Bit). Für ein Wiedererkennen ist jedoch nur die Hälfte, also drei möglich ($2^3 = 8$ Bit). [Völ98].

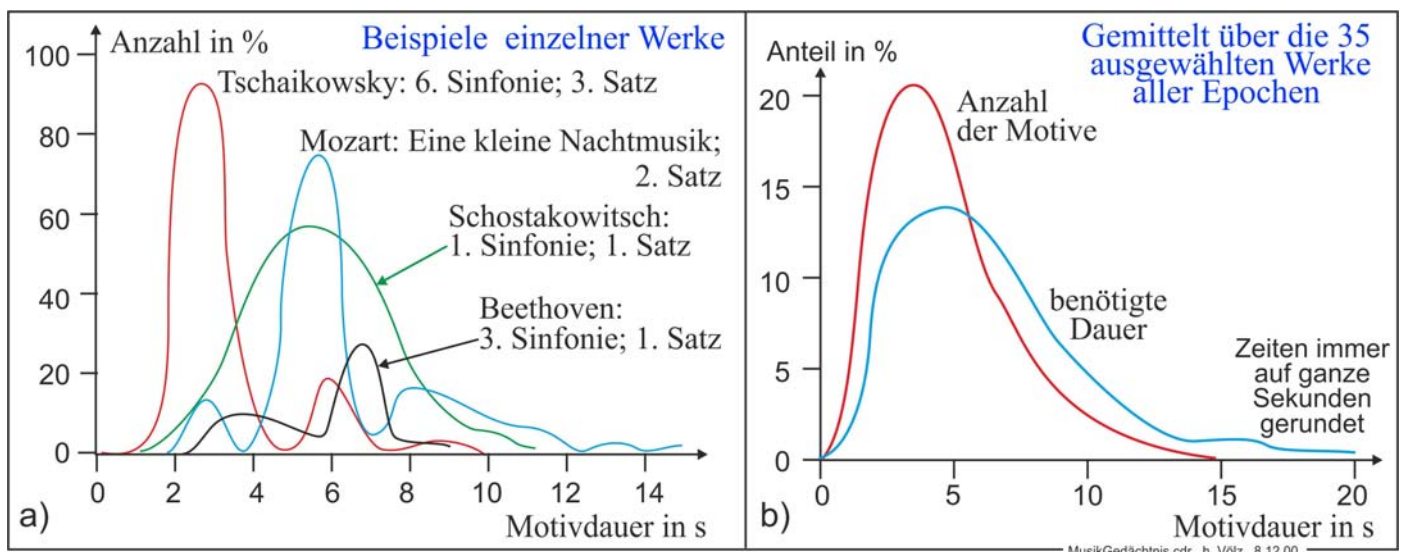


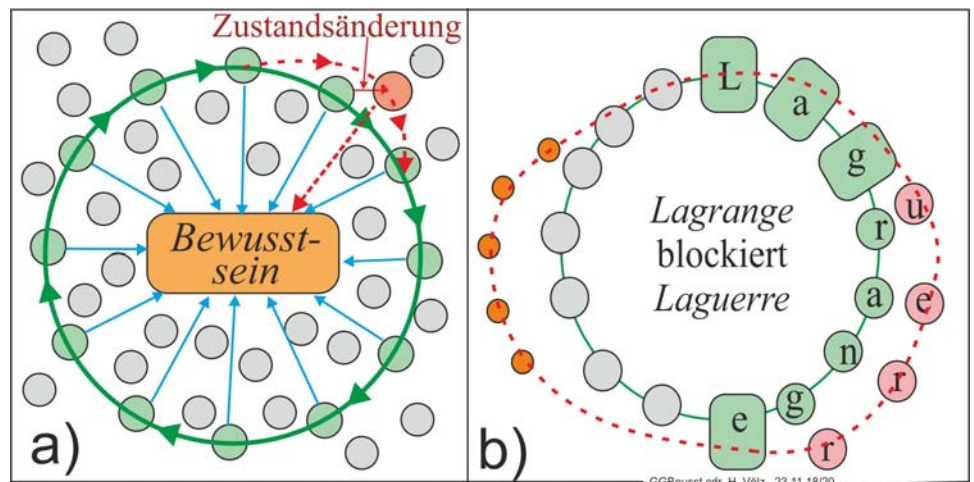
Bild 27. Zu den Zeitdauern musikalischer Motive.

Für unser GG und unser Bewusstsein legen es diese und weitere ähnliche Kenntnisse nahe, dass es wie ein ziemlich komplexer Umlaufspeicher arbeitet. So ergibt sich das Modell von **Bild 28a**. Für einen Begriff oder Inhalt werden dabei im GG Millionen Neuronen zufällig ausgewählt und zu einem Kreis zusammengeschlossen. An einem beliebigen Eingang wird der Begriff zugeführt und rotiert dann fortlaufend im Neuronenkreis. Dabei greift das Bewusstsein auf alle Neuronen parallel

zu (blau) und übernimmt so den vollständigen Inhalt. Für einen **Vergleich** von Begriffen, Objekten usw. wird nur die Hälfte des Kreises für den unbekannten Begriff benutzt und der zu vergleichende aus dem KZG oder LZG in die andere Hälfte eingefügt. Dann kann das Bewusstsein den Vergleich vornehmen. So ergeben sich die o.g. 5 statt der sonst üblichen 10 Sekunden. Bei nur wenig verschiedenen Namen, Begriffen sind oft nur ein oder wenige Neuronen (rot) auszutauschen.

Werden unterschiedliche Begriffe oder Inhalte zum GG zusammengefügt, so ist zeitweilig eine **Blockierung** für die Übernahme von Begriffen aus dem KZG oder LZG möglich (b). Zunächst sei der Name „Lagrange“ zyklisch in den grünen Neuronen gespeichert. Wenn nun zusätzlich „Laguerre“ eingefügt werden soll, so ist dieser Name für einen Rückruf aus dem LZG infolge der vergrößert gezeichneten Neuronen blockiert. Dennoch können wir aber all unser Wissen über Laguerre mühelos mitteilen. Wir können auch erwähnen, dass er uns nur im Moment der Name leider nicht einfällt, dass er jedoch zweisilbig sei und seine erste Silbe „Lag“ lautet (das „e“ am Ende ist ja stumm!). Sind ca. zehn Sekunden vergangen, so ist inzwischen Lagrange gelöscht oder durch anderes ersetzt und unvermittelt, ja unerwartet gelangt Laguerre entsprechend den rot und eckig gezeichneten Neuronen aus dem LZG in unser Bewusstsein.

Bild 28. Modell des GG und des damit gekoppelten Bewusstseins mit Blockierung.



J. S. Bach 1685 - 1750 D-Dur-Suite, Air
Ch. W. Gluck 1714 - 1787 Ballettmusik „Reigen seliger Geister“
1. Thema „Orpheus und Eurydike“
W. A. Mozart 1756 - 1791 Ouvertüre „Die Hochzeit des Figaro“
Ouvertüre „Don Giovanni“
Eine kleine Nachtmusik, 1. Satz
Eine kleine Nachtmusik, 2. Satz
L. v. Beethoven 1770 - 1827 Romanze F-Dur für Violine und Orchester
Sinfonie Nr. 3, 1. Satz
Sinfonie Nr. 3, 2. Satz
C., M.v. Weber 1786 - 1826 Ouvertüre „Der Freischütz“
F. Schubert 1797 - 1828 Musik aus Rosamunde
Scherzo B-Dur
H. Berlioz 1803 - 1869 „Faust's Verdammung“, Marsch
R. Schumann 1810 - 1856 Aus den Kinderszenen die „Träumerei“
R. Wagner 1813 - 1883 Vorspiel 3. Akt zur Oper „Lohengrin“
„Tannhäuser-Ouvertüre“
„Die Meistersinger von Nürnberg“, Vorspiel

A. Bruckner 1824 - 1896 Sinfonie Nr. 6, 1. Satz
J. Strauss, Sohn 1825 - 1899 „Kaiserwalzer“
Ouvertüre „Die Fledermaus“
J. Brahms 1833 - 1897 Sinfonie Nr. 1. 4. Satz
M. Mussorgski 1839 - 1881 „Eine Nacht auf dem kahlen Berge“
P. I. Tschaikowski 1840 - 1893 Serenade für Streicher, Walzer
Sinfonie Nr. 5, 1. Satz
Sinfonie Nr. 6, 3. Satz
R. Strauss 1864 - 1949 „Till Eulenspiegels lustige Streiche“
A. Scriabin 1871 - 1915 Prelude Nr. 13a, Opus 11
M. Ravel 1875 - 1937 Bolero
B. Bartok 1881 - 1945 Klavierkonzert Nr. 3, 2. Satz
I. Stravinski 1882 - 1971 Ballett-Suite „Petruschka“, 1. Satz
P. Hindemith 1895 - 1963 „Niblissima Visione“, Marsch u. Pastorale.
Sinfonia Serena, 1. Satz
D. Schostakowitsch 1906 - 1975 Sinfonie Nr. 7, 1. Satz
R. Zechlin 1926 Violinkonzert, 1. Satz
G. Kochan 1930 Klavierkonzert, 2. Satz

Vom Inhalt des GG übernimmt das **KZG** nur 1/30. Deshalb müssen Lernende einen Fakt, Zusammenhang usw. etwa 30-mal wiederholen. Das ist auch bei fast jedem Sinfonie- und Sonatensatz erfüllt. Hier wird ein Thema meist etwa 30-mal in Variationen wiederholt. Dabei wird im KZG mittels Aktivität im Zellkern die Anzahl der Transmittervesikel (RNS-Synthese) in der Synapse erhöht (vgl. Bild 25 unten Mitte). Mit seinen nur 1 500 Bit ist aber das KZG oft zu klein. Dennoch ist es bei der geringen Datenrate von 0,5 Bit/s bereits nach etwa einer Stunde gefüllt. Vieles spricht dafür, dass hier der ursprüngliche Grund für die Festlegung der Stunde liegt. Denn weit vor der Räderuhr war es in den frühen Klöstern Ägyptens üblich, grob nach einer „**Stunde**“ Arbeit eine Pause für Gebete, zur Andacht usw. einzulegen. Ansonsten gibt es nämlich in der Menschheitsgeschichte keine 24er Teilung. Deshalb ist auch die heute leider übliche Doppelstunde bei Vorlesungen usw. recht unglücklich. Daher ist es nach etwa 50 Minuten vorteilhaft, eine kurze Anekdote oder einen passenden Witz zur Erholung einzufügen. Ergänzt sei noch, dass die RNS-

Synthese im Zellkern mit einer Halbwertszeit etwa 20 Minuten abklingt. Auch das führt mittelbar zur Stunde des KZG. In einigen Fällen kann die RNS-Synthese zusätzlich durch eine externe Störung blockiert werden. Dann können bereits vorhandene Inhalte nicht mehr stabilisiert werden und gehen verloren. Dabei treten mehrere Varianten eines Verlustes als Amnesie auf (**Bild 29**). Zusätzlich verzögert sich auch die Möglichkeit der Speicherung von etwas Neuem. Mit einiger Verzögerung können aber noch einige alte Inhalte wiederkehren. Insgesamt bleiben immer Gedächtnislücken.

Bild 29. Amnesien im KZG als Folge von Störungen.



Die Speicherung im **LZG** erfolgt mit 0,05 Bit/s sehr langsam und bewirkt Vergrößerungen und Neubildungen von Synapsen (Bild 25 unten rechts). Dadurch entstehen im Gehirn sehr stabile Strukturänderungen, so genannte Engramme, die quasi eine Verschaltung³¹ des Gehirns bewirken. Ihre Wiedergabe erfolgt jedoch mit grob 20 Bit/s recht schnell. Auch hier können Blockierungen auftreten. Daher tauchen besonders im Alter schon lange vergessen geglaubte Inhalte wieder unvermittelt auf. Besonders häufig betrifft es Erinnerungen aus frühester Jugend. Einige Inhalte des LZG sind auch genetisch determiniert und betreffen vor allem lebenswichtige Funktionen.

Die **Speicherkapazität** unseres Gehirns, eigentlich des LZG, wurden ursprünglich viel zu groß abgeschätzt. John von Neuman (1903 - 1957) ging dafür von einem Neuron mit 14 Bit aus, multiplizierte mit 10^{10} Neuronen und schließlich noch mit den $2 \cdot 10^9$ s eines 60-Jährigen und kam so auf etwa $2,8 \cdot 10^{20}$ Bit ($\approx 10^7$ TByte) [Neu58]. Heinz Zemanek (1920 – 2014) ging dagegen von einem Informationsfluss zu 50 Bit/s aus. Für ein Alter von 50 Jahren mit 16 Stunden Informationsaufnahme je Tag errechnete er $5 \cdot 10^9$ Bit [Zem75]. Nach vielen weiteren Versuchen gilt heute für das verbale Gedächtnis ein Wert von 10^6 bis 10^8 Bit. Eine dafür mögliche Abschätzung folgt aus dem Begriffe-Raten. Selbst die ungewöhnlichsten Inhalte wie Churchills Zigarre oder Chruschtschows Schuh können immer mit 20 gut gewählten Ja/Nein-Fragen bestimmt werden. Das ergibt $2^{20} \approx 10^6$ Bit. Eine andere Abschätzung folgt aus der Zuflussrate um 0,05 Bit/s. Für einen 60-Jährigen ergeben sich dann – selbst bei Tag- und Nacht-Speicherung – nur 10^7 Bit. Hinzuzufügen ist aber, dass wir nicht nur Verbales, sondern auch Verhalten, Geschmack, Geruch, Geräusche, Musik, Bilder, Emotionen, Geschehen usw. speichern. Allgemein sei zu dem Gedächtnis nur noch ergänzt, dass viele weitere Details u. a. [Dri72] und [Völ03] enthalten.

3.2. Der Raum

Im bisherigen Text sind die Begriffe Raum und Zeit absichtlich vermieden. Bereits Einstein (s. Seite 1) hat darauf hingewiesen, dass sie keine physischen Größen, sondern nur Ordnungsparameter sind. Auch für das SI (s. S.11/12) ist zumindest der Raum nicht über Naturkonstanten festzulegen und die Zeiteinheit Sekunde wird nur durch ein Abzählen von Schwingungsperioden einer genau festgelegte Frequenz gewonnen. Hier wird nun versucht, etwas genauer die Inhalte von Raum und Zeit zu beschreiben, erklären und begründen.

Begonnen wird dabei mit der Frage nach der richtigen Anzahl von Raum- und Zeitdimensionen. Eine typisch anthropomorphe (s. Fußnote S. 27) Antwort hierauf gab 1955 Gerald Whitrow gemäß

³¹ Hierauf beruht ein üblicher fragender Witz: „Was nutzt dem Bräutigam das Schaltbild des Gehirns seiner Braut?“ Zur Gleichberechtigung können dabei Braut und Bräutigam auch ihre Rollen vertauschen. Nichts! Doch Einmal ist es für ein Interpretieren viel zu komplex und dann geschehen die Änderungen auch so schnell, dass ein „Änderungsdienst“ nie hinterherkäme.

Bild 30. Er fragte danach, unter welchen Bedingungen intelligentes Leben möglich ist [Bar06] s. S. 209. Dafür setzte er eine physikalische Stabilität für Kreuzungen von Nervenleitungen voraus:

„Wenn wir wollen, dass die Zukunft durch die Vergangenheit bestimmt wird, müssen wir alle Felder auf dem Schachbrett entfernen, in denen „unvorhersagbar“ steht. Wenn wir wollen, dass stabile Atome und Planetenbahnen existieren, fallen alle Felder mit >instabil< weg.“

Scheiden wir dann noch Welten aus, in denen es nur Signale gibt, die sich schneller als das Licht ausbreiten, bleibt allein unsere Welt mit ihren 3+1 Raum- und Zeitdimensionen übrig. Darüber hinaus blieben noch einige allzu einfache Welten mit 2+1, 1+1 und 1+2 Dimensionen, von denen man annimmt, dass in ihnen kein Leben existieren kann. So gibt es beispielsweise in 2+1-Welten keine Schwerkraft, und es sind nur äußerst einfache Strukturen möglich, die jede Herausbildung von Komplexität ausschließen.“

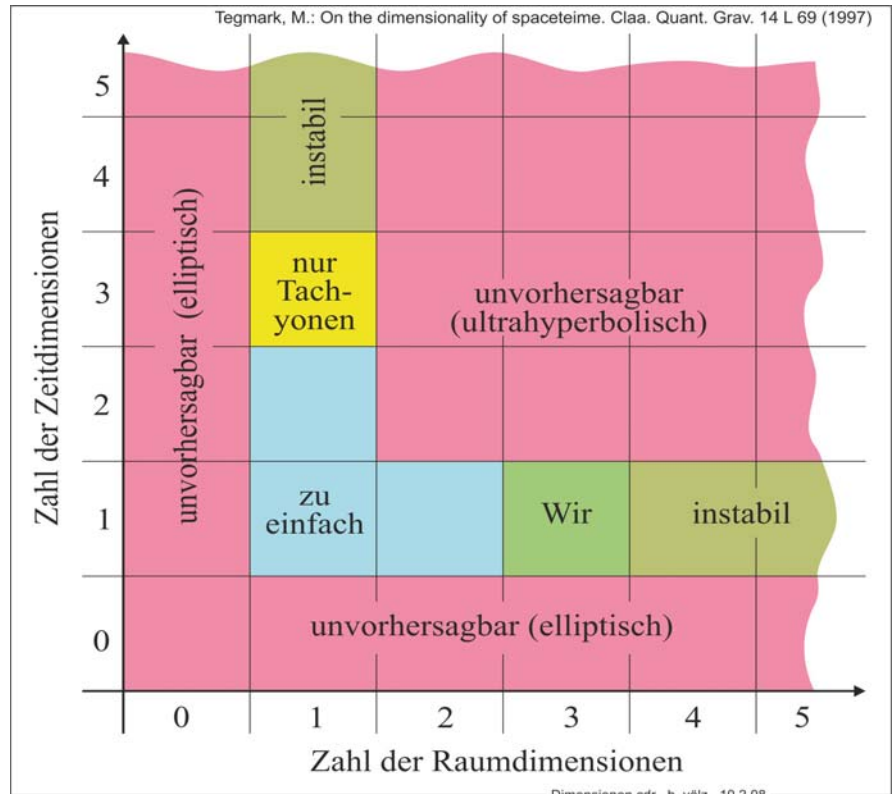
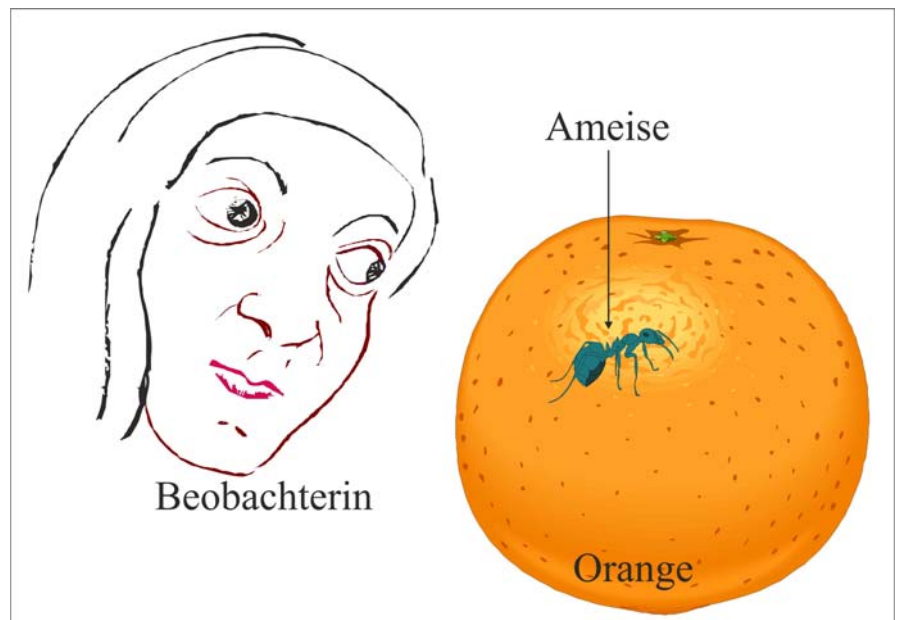


Bild 30. Zusammenstellung aller möglichen Raum- und Zeitdimensionen

Damit dürfte nur die 3+1-Welt möglich sein. Jedoch **Bild 31** demonstriert, dass sie nicht von jedem Lebewesen wahrgenommen werden kann. So erscheint einer Ameise, die auf einer Apfelsine läuft, deren Oberfläche sie nicht verlassen kann und die auch Unebenheiten noch nicht bemerkt, ihre „Welt“ nur 2-dimensional, und das sogar obwohl es im Inneren der Frucht noch weitere Oberflächen gibt, welche die Ameise aber ebenfalls weder wahrnehmen noch erreichen kann.

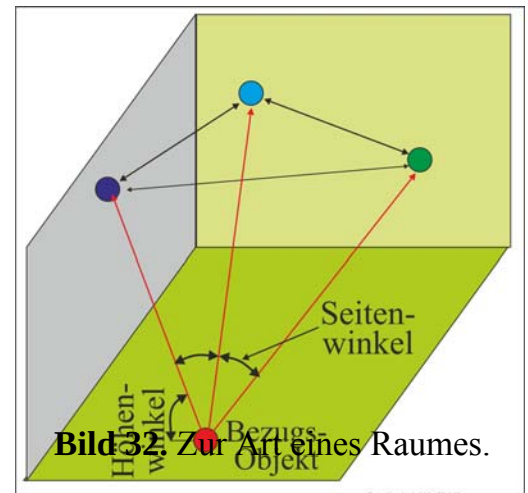
Bild 31. Wahrnehmen von Dimensionen.



Die externe Beobachterin im Bild erkennt aber sehr wahrscheinlich die drei Raumdimensionen. Zu beachten ist jedoch, dass unser Auge ähnlich wie ein Fotoapparat funktioniert: Ein Ausschnitt der Welt wird als 2D-Projektion von Objekten, Gegenständen, Körpern usw. auf der Netzhaut flächig abgebildet. Subjektiv sind wir dennoch davon überzeugt, mit beiden Augen räumlich zu sehen. Das gilt aber stark eingeschränkt. Einmal sind beide Bilder vom nahezu gleichen Ort aus gesehen, besitzen also die gleiche Perspektive und erfassen den nahezu gleichen Ausschnitt der 3D-Welt. Zwi-

schen den Abbildungen auf beiden Agen gibt es nur bis zu einer Entfernung von maximal etwa 50 m erkennbare Unterschiede. Im Gehirn ergänzen wir fehlende, verdeckte Oberflächen. Dabei greifen wir auf ehemalige Tasterfahrungen (Begreifen) und vielfaches Umhergehen – auch hinter die Objekte – zurück. Schließlich ist experimentell nachgewiesen, dass nur etwa 20 % der Bevölkerung wirklich räumlich, also stereoskopisch sehen [Hen97]. Daher gibt es auch erst bei Giotto rein intuitiv gemalte Bilder mit annähernd richtiger Zentralperspektive. Die Gesetze dafür wurden dann 1420 von Alberti aufgeschrieben. Aber selbst Albrecht Dürer (1471 – 1528) hatte auch danach noch beachtliche Probleme mit der Perspektive. Sogar seine zweite Reise nach Oberitalien 1505 brachte keinen Erfolg. Schlecht informiert fuhr er nach Venedig und Bologna, statt an die Quelle nach Florenz. Schließlich fand er selbst Lösungen mit einem Raster vor der Landschaft. Weiter gibt es viele Beispiele dafür, wie leicht wir 3D-Bilder im Bewusstsein ergänzen. Teilweise sehen wir bei speziellen Bildern von Mauritius Cornelius Escher (1898 – 1972) und anderen sogar (absichtlich geplante) räumlich unmögliche Bilder.

Bei den Räumen können unterschiedliche Gesetze für die Anordnung ihrer Objekte existieren. Sie unterscheiden sich in den Zusammenhängen bezüglich ihrer Abstände und Winkel. Dabei ist ein Objekt als Bezugspunkt auszuwählen. Im **Bild 32** wurde das rote Objekt festgelegt. Für die anderen Objekte sind die Richtungen, die seitlichen Abstände und ihre Höhe zu benutzen. Aus den ermittelten Zusammenhängen folgt schließlich die Raumart. U. a. gibt es abstrakte, Hilbert-, Riemann-, euklidische, lineare, metrische und topologische „Räume“. Für den euklidischen Raum ist typisch, dass die Winkelsumme in jedem Dreieck immer genau 180° beträgt.



In diesem Zusammenhang kann auch die in **Bild 33** gezeigte Oberfläche aufschlussreich sein. Durch sie wird ein einfaches Lebewesen entsprechend den Linien A, B oder C gezogen. Es erlebt dementsprechend die rechts stehenden Abläufe. Nur wenn es mit einem Bewusstsein entscheiden kann, ob es gezogen wird oder den Weg selbst bestimmt hat, kann es so etwas wie Zeit empfinden, was zum nächsten Abschnitt überleitet.

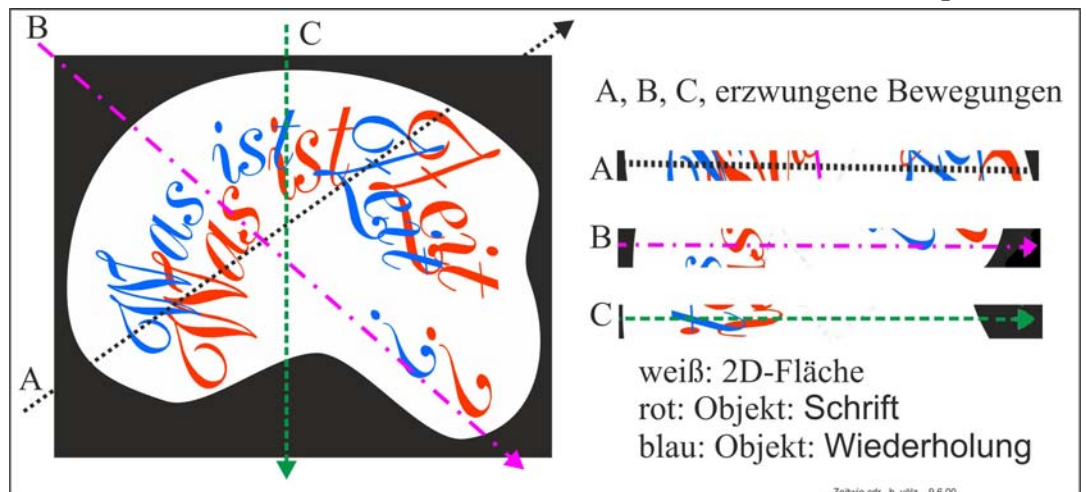


Bild 33. Was Zeit sein könnte.

3.3. Die Vielfalt der Zeit

Der Raum lässt sich relativ einfach über die Orte von Objekten bestimmen. Bei der Zeit sind dagegen mindestens vier Arten zu unterscheiden: Gezählte (gemessene), subjektive, systembezogene und radioaktive Zeit. Sie werden nacheinander getrennt behandelt.

3.3.1. Die Zählung der Zeit

Für die Zählung (Messung) der Zeit sind Änderungen bezüglich der Objekte entscheidend. Auch hierzu bewährt sich das Modell des Umlaufspeichers von Bild 28a. Gemäß **Bild 34** ist aber zusätz-

lich eine hochfrequente und streng periodische Schwingung erforderlich (braun). Mit einem Startsignal wird vom Objekt ein Vergleichswert unveränderlich gespeichert. Durch eine wahrgenommene oder festgestellte Änderung wird ein Stoppsignal ausgelöst. Zwischen Start und Stopp wurde dabei die Anzahl der Maxima der hochfrequenten Schwingung gezählt. Sie entspricht der inzwischen verstrichenen Zeit. Genauso ist auch im „System International“ (SI) die „Zeitmessung“ durch die Zählung bei einer gesetzlich festgelegten Frequenz definiert [Völ96]:

Die Basiseinheit 1 Sekunde (1 s) ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung ($\approx 9,2$ GHz; H. V.), die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Cäsium 133 entspricht“.

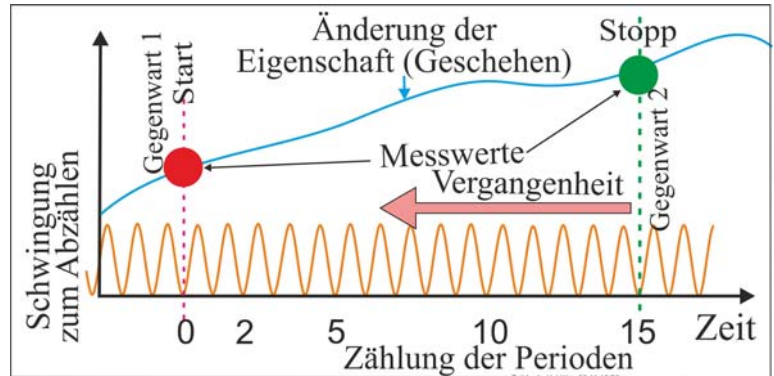


Bild 34. Das Prinzip der Zeitmessung

Folglich ist die „Messung“ (Zählung) der Zeit deutlich komplexer als das Wiedererkennen von Objekten. Zusätzlich muss nämlich während einer anderen (zweiten) Aktualität eine Änderung erfolgt und vom GG oder einem Messgerät erkannt sein. Nur dann kann auch ein Zeitempfinden entstehen. Um identische Werte an verschiedenen Orten zu sichern, muss überall die exakt gleiche hochfrequente Schwingung erzeugt oder fehlerfrei dorthin transportiert werden. Deshalb wurde der definierte Quantenübergang festgelegt. Hierbei ist es von wesentlichem Vorteil, dass die Lichtgeschwindigkeit c unabhängig von Objektbewegungen ist. Von keinem Einfluss ist sogar die Änderung der Phasengeschwindigkeit c_{med} einer monochromatischen Welle in einem Material durch deren Permittivität ε und Permeabilität μ

$$c_{mrd} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}.$$

Die Frequenz bleibt nämlich dennoch unverändert erhalten. Erst bei sehr hoher gegenseitiger Geschwindigkeit v kann infolge der Relativitätstheorie ein Zeitfehler auftreten:

$$\Delta t^* = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Er dürfte aber in fast allen irdischen Messungen zu vernachlässigen sein. Dennoch wurde dieser Einfluss inzwischen durch zahlreiche Experimente als **Zwillingsparadoxon** bestätigt. Erstmalig erfolgte das 1971 mit zwei gleichen, sehr genauen Cs-Atomuhren. Eine blieb auf der Erde, die andere flog 15 Stunden im Flugzeug mit $278 \text{ m/s} \approx 10^{-6} c$. Bei der Rückkehr ergab sich die theoretisch erwartete Zeitdifferenz von $\Delta t^* = 47 \text{ ns}$. 1972 wurde der Einfluss der **Erdrotation** mit einem Düsenjet bestimmt. Flog er nach Osten, gingen 59 ns verloren, flog er nach Westen, so wurden 273 ns gewonnen. Um hiermit nur wenige Jahre gegenüber den zuhause gebliebenen Erdbewohnern zu gewinnen, müsste man viele Jahre mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fliegen. Deutlich nachweisbar ist der Einfluss aber bei der kosmischen Strahlung. Die Myonen fliegen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit und können so trotz ihrer extrem kurzen Lebenszeit die Erde erreichen. Masselose Photonen bewegen sich exakt mit der Lichtgeschwindigkeit und „altern“ daher nicht.

Ergänzt sei noch dass für längere Zeiten die Zählung der Zeit von der Erdrotation (Tage) und der Erdumläufe um die Sonne (Jahre) benutzt werden.

3.3.2. Die subjektive Zeit

Für die subjektive Zeit verfügt der Mensch, wie **Bild 35** ausweist, über kein hinreichend hochfrequentes Vergleichssignal [Ebe96]. Entsprechend **Bild 36** ist sogar die kleinste wahrnehmbare

Trennung von zwei Signalen meist viel zu lang. Da hierfür außerdem kaum Schallsignale in Betracht kommen, wird das sogar noch weiter eingeschränkt. Ergänzend sei noch auf die Datenrate von 15 Bit/s entsprechend Bild 26 verwiesen.

Nicht selten lässt aber eine Änderung so lange auf sich warten, dass eine Langeweile (österreich. Fadesse) auftritt. Der Begriff wurde 1893 von Gaston La Touche eingeführt. Er entspricht dem Gegensatz von Muße. Aber Müßiggang ist dagegen nur vorübergehendes Handeln. Nach Erich Fromm (1900 - 1980) ist der Mensch das einzige Lebewesen, das sich langweilt, unzufrieden sein kann und sich aus dem Paradies ausgeschlossen glaubt [Fro76]. Viele weitere Details enthält [Fun99]. Max Frisch (1922 – 1991) schrieb ähnlich, dass Geist die Voraussetzung für Langeweile ist. So können sich z. B. Molche nicht langweilen, obwohl sie fast immer träge auf dem Bauch liegen und verdauen.

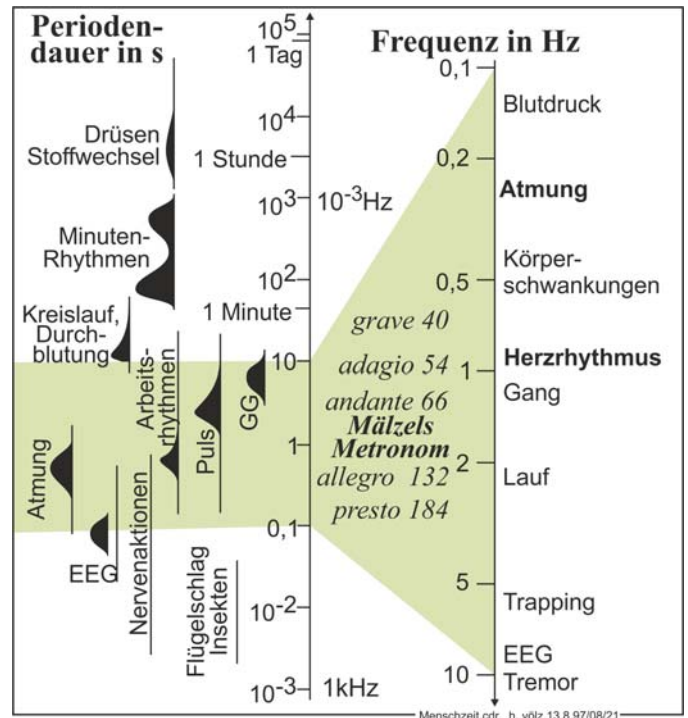


Bild 35. Zusammenstellung der beim Menschen auftretenden periodischen Vorgänge.

Auch die griechischen Götter kannten Langeweile und stifteten daher Morde und Kriege an. Wegen ihrer Unsterblichkeit suchten sie nach Ereignissen, um ihre unendliche Lebenszeit damit zu füllen. Doch leider kommt zuweilen Ähnliches auch bei Menschen vor.

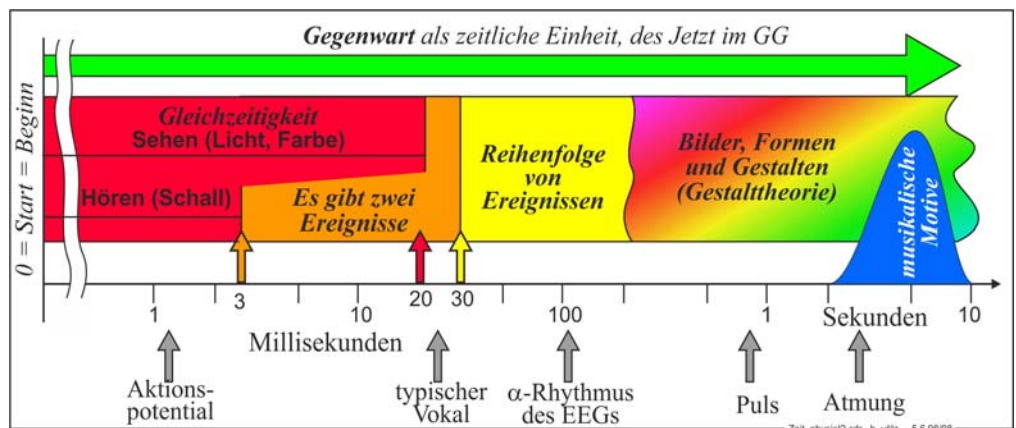


Bild 36. Unsere wahrnehmbaren Zeitschranken [Völ99].

Nach Jean Piaget (1896 – 1980) nehmen Kinder zunächst Objekte, dann Räumliches und später Zeit-Abläufe wahr (vgl. auch [Oer98] und Bild 5). Vereinfacht gilt [Pia74]:

- ≈ 1 Monat. Es werden mehrfach vorgespielte Töne wiedererkannt.
- $\approx \frac{1}{2}$ Jahr: Es werden komplexe Takte auseinandergehalten.
- ≈ 10 Monate: Kommendes (Zukunft; Essen usw.) wird etwa 10 Sekunden im Voraus erwartet. Das entspricht dem 1897 von Iwan Petrowitsch Pawlow (1849 – 1936) gefundenen bedingten Reflex.
- $< \frac{1}{2}$ Jahre: Es werden nur Dinge der Umgebung im Wortsinn begriffen, es gibt erste bewusste Erinnerungen.
- $\approx \frac{1}{2}$ Jahre: Es wird ein Gefühl dafür gewonnen, dass ein Objekt auch dann dasselbe bleibt, wenn es sich an einen anderen Ort bewegt oder nach gewisser Zeit wieder sichtbar wird.
- $> \frac{1}{2}$ Jahre: Es bleiben Dinge – unabhängig davon, was die Kinder mit ihnen anfangen – existent. Alle Autos, Kuscheltiere usw. werden zu einer Gruppe (Klasse) zusammengefasst. Zählen ist jedoch nur eine auswendig gelernte linguistische Fähigkeit. Erst ab 4 - 5 Jahren entsteht eine Verbindung zwischen den gelernten Zahlen und der Menge von Dingen.

- >3 Jahre: Es werden sinnvolle Reihen von Vorgängen und Handlungsabläufen erkannt. Vorstellungen über Zeitdauern sind noch nicht entwickelt.
- 3 - 7 Jahre. Es entsteht ein anschaulicher Zeitbegriff: Größere Steine müssen älter sein, weil größere Menschen auch älter sind. Trotz möglichem Uhrablesen existiert noch keine Vorstellung über Minute oder Stunde.
- >7 Jahre. Es entsteht ein operativer Zeitbegriff. Zeit hat an allen Orten die gleiche Gültigkeit, Zeitdauer setzt sich aus gleichen Zeiteinheiten zusammen.
- >9 Jahre: Es entsteht ein metrischer Zeitbegriff. Dauer von Handlungen wird einschätzbar.
- >13 Jahre: Mit Beginn der Pubertät gehen Kinder völlig fehlerfrei mit den Begriffen »früher« und »später«, »längere und kürzere Dauer« um.

„Zeit“ existiert also nicht angeboren! Langeweile können Kinder nämlich erst ungefähr ab dem fünften Lebensjahr empfinden. Von da ab besitzen sie auch persönliche Erinnerungen.

In der Philosophie, im Film, Theater usw. wird Langeweile oft recht ausführlich behandelt. In der Literatur ist u. a. Charles Baudelaire (1821 – 1867) wichtig. Zitiert wird aber meist der „Zauberberg“ von Thomas Mann: (1875 – 1955): Dort kommt Hans Castorp nach Davos, um seinen kranken Vetter zu besuchen. Ein Schnupfen führt zum Fiebermessen, das geschieht viermal am Tage und führt schließlich zur Depression: „Minuten werden zu Stunden“ und „Tage verfliegen“. In allen diesen Arbeiten erfolgt aber kein Bezug zum Gedächtnis oder gar zum GG. Zusätzlich sei hier noch auf die konstante Informationsrate von 15 Bit/s entsprechend Bild 26 verwiesen. Weiter ist zu beachten, dass mit dem Zeitgefühl auch immer etwas von der Vergangenheit gespeichert wird und mittelbar so auch eine mögliche Zukunft bewusst wird.

Generell weicht also die wahrgenommene (subjektive) Zeit von der gemessenen ab. Darauf wies u. a. bereits Orwell hin: Wir haben es heute nur immer eiliger als früher. Für eine genauere Betrachtung der subjektiven Zeitwahrnehmung gibt es zwei Extreme: Subjektiv wichtige Ereignisse erleben wir intensiv und bemerken dabei nicht, dass Zeit vergeht. Findet dagegen nichts Interessantes statt, so erleben wir Langeweile und spüren deutlich den Ablauf der Zeit und zwar sowohl durch Warten als auch durch Suchen nach Erlebnissen. Ein Erlebnis muss daher durch seine Zeitdauer Δt und entsprechend seiner individuellen Wichtigkeit durch ein Gewicht G bewertet werden (**Bild 37**). Bei Langeweile geschieht nichts, daher ist $G=0$ (a). Wir nehmen dabei ein sehr langsam dahinschleichendes Zeitgefühl ohne irgendeinen anderen Inhalt wahr. Ereignisse erleben wir dagegen je nach ihrer Bedeutung unterschiedlich intensiv. Das wird mit einem entsprechenden Gewicht G bewertet und auch so im KZG, LZG als Informationsmenge $I = G \cdot \Delta t$ gespeichert. Wird ein Ereignis wiederholt, so sinkt sein Gewicht etwa auf die Hälfte und sinkt bei der n -ten Wiederholung auf G/n . Dabei merken wir nichts von Zeit. Viele weitere Details mit Beispielen sind in [Völ01] S. 122ff. enthalten. Wie später die o. g. Speicherung im LZG vorliegt, zeigt (b) und wie dabei die gespeicherte Menge anwächst (c). Wird später auf das Vergangene zurückgeblickt, so befindet sich dort eine zusammengefasste Speicherung (d). Erstaunlich ist, dass dennoch im Rückblick bei jeder Erinnerung auch alles wieder in der ursprünglichen Richtung nachempfunden wird, jedoch immer deutlich verkürzt. [Völ07a].

Nach den vorangegangenen Betrachtungen – und speziell gemäß der frühkindlichen Entwicklungen – ist das menschliche Gedächtnis, vor allem aber sein GG eine extrem hoch entwickelte Stufe von natürlichen Gedächtnissen (Speichern). Ihre Evolution kann teilweise über den Vergleich zu anderen Lebewesen verstanden werden. Hierzu kann die biologische Grundregel von Ernst Haeckel (1834 – 1919) herangezogen werden, auch wenn sie heute oft als eine erhebliche Vereinfachung gilt. Bereits 1926 hatte Karl Ernst von Baer erkannt, dass frühe Entwicklungsstadien verwandter Organismen einander ähnlicher sind als die ausgewachsenen Individuen. Dabei sind stammesgeschichtliche Entwicklung einer Art als Phylogenese und individuelle Entwicklung eines Lebewesens Ontogenese zu unterscheiden.

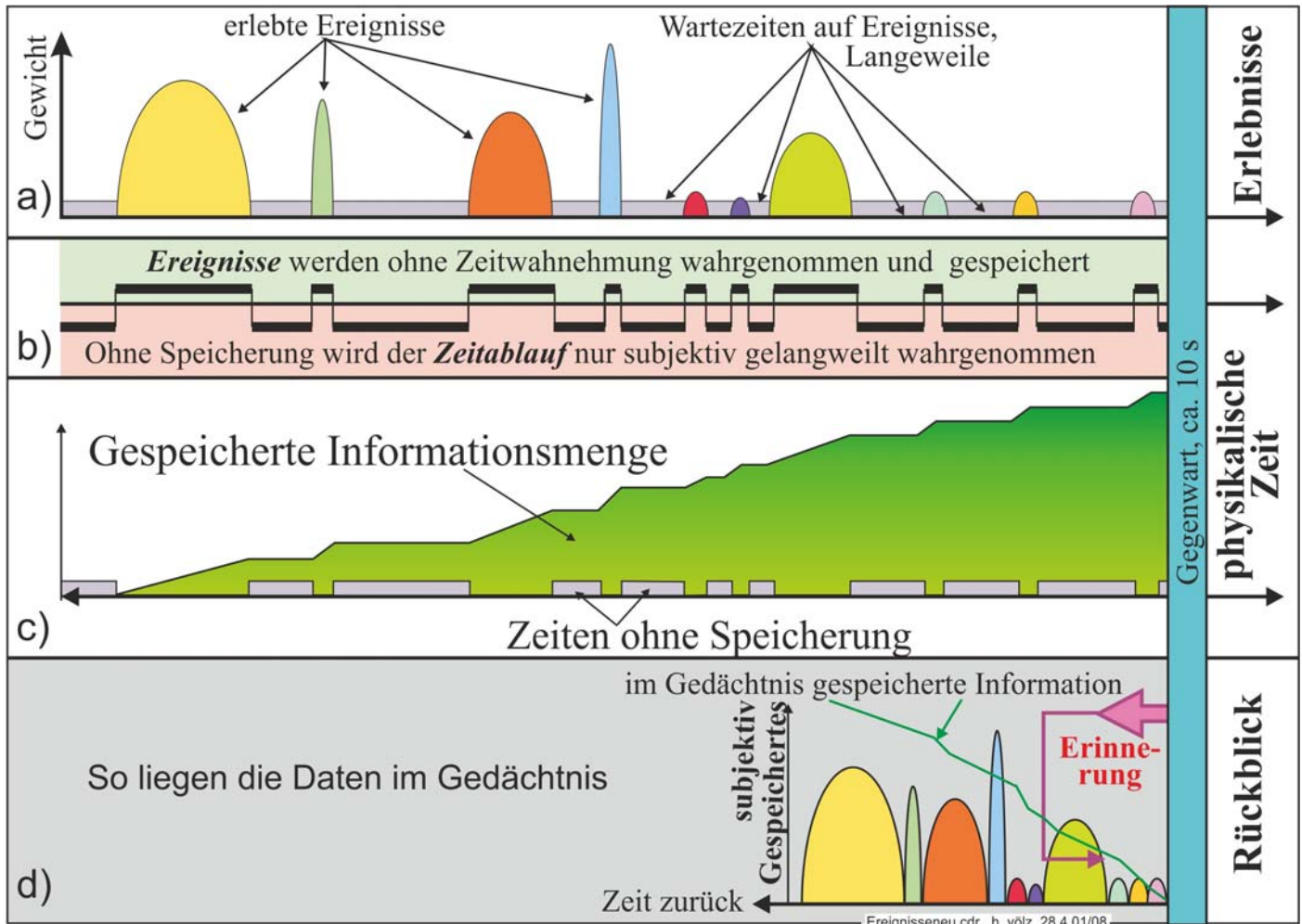


Bild 37. Zur Bildung unseres Gedächtnisinhaltes über die Vergangenheit.

Die **Ontogenese**³² beginnt mit Keimentwicklung, schreitet mit verschiedenen Entwicklungsstadien voran und endet mit dem adulten Lebewesen. Dabei sind auch Rückbildungen eingeschlossen. Wiederholt werden nicht die Adultstadien, sondern die frühen Embryonalstadien der jeweiligen Vorformen einer Art. Das erklärt die **Phylognese**³³ dadurch, dass evolutionäre Neuentwicklungen immer auf bestehende Arten und damit auf bestehende Organsysteme aufbauen. Daher schließt die individuelle Entwicklung des Individuums einer Art auch die vorher jeweils bereits vorhandenen Schritte mit ein. Beispiele einer solchen Wiederholung sind das Auftreten eines Kiemendarms und von Kiemenspalten bei allen Wirbeltierembryonen. Das belegt, dass alle heutigen Wirbeltiere von Fischen abstammen. Bartenwalembryonen bilden Zahnanlagen, während die adulten Individuen keine Zähne mehr haben, was darauf hinweist, dass sich die Bartenwale aus Zahnwalen entwickelt haben. Haeckel war sogar davon überzeugt, dass sein Gesetz nicht nur auf Pflanzen und Tiere, sondern auch auf den Menschen und das menschliche Seelenleben übertragbar seien. Freud hat ähnlich für die individuelle Entwicklung jedes Menschen vier charakteristische Phasen herausgearbeitet. Allgemeiner leitet Darwin 1871 die Evolution des menschlichen Denkens und der Kognition von den Vorfahren der heutigen Menschenaffen über die Frühmenschen ab. Er betont dabei die graduellen, aber nicht prinzipiellen Unterschiede zwischen den intellektuellen Fähigkeiten von Mensch und Tier. Dazu ist heute u. a. nachgewiesen, dass nicht nur Menschenaffen, sondern auch viele Säugetiere, Rabenvögel, Oktopusse und sogar Bienen hoch komplex „denkend“ handeln können. Das gilt sogar trotz der sehr unterschiedlichen und meist viel kleineren Gehirne [Win89]. In diesem Sinne müssen die einfachsten Lebewesen zumindest die für sie geeignete Nahrung, günstige Umgebungen

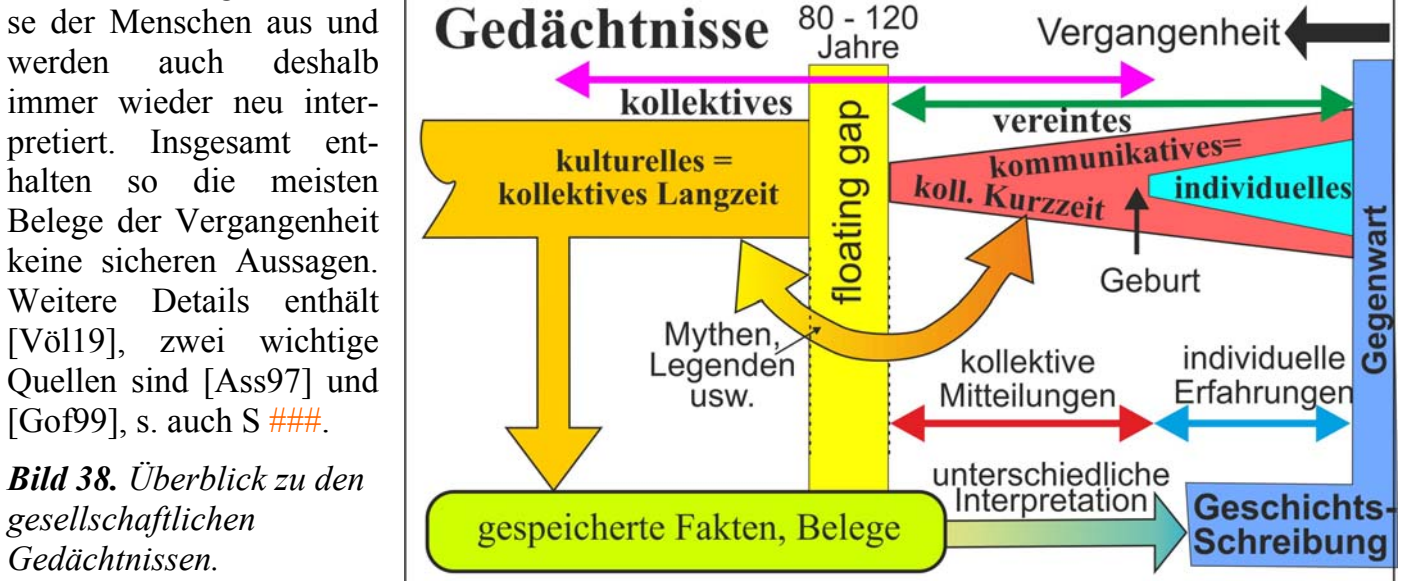
³² Ontogenese altgriechisch *on* das Seiende und *genesis* Geburt, Entstehung.

³³ Phylognese altgriechisch *phylon* Stamm und *genesis* Ursprung. Hierzu gehört meist der Baum der Verwandtschaften in der biologischen Systematik.

und Feinde erkennen. Aber bereits für Bisexuelle muss das Geschlecht und später der individuelle Partner sicher wiedererkannt werden. Eine wichtige nächste Stufe ist es, den Zusammenhang von Ursache und Wirkung, also was auf was folgt, zu erkennen. Deutlich gründlicher ist bereits der bedingte Reflex untersucht. Ihn fand Pawlow 1890 zuerst bei den Hunden. Das Bewusstwerden solcher Fakten und sogar das Sichselbst-Erkennen erfordert jedoch bereits ein recht umfangreiches Gedächtnis. Einige Tiere, wie Schimpansen, Orang-Utans, Rhesusaffen, Elefanten, Delfine und Rabenvögel, können sich sogar bereits im Spiegel erkennen. Das verlangt aber immer noch kein Zeitgefühl. Das erfordert schon alle o. g. Leistungen und führte deshalb zu dem besonderen GG des Menschen, das wahrscheinlich nur bei ihm existiert.

Eine Folge dieser Aussagen bewirkt, dass Platons Auffassung von den „Ideen“, die bereits vor der Geburt in uns vorhanden sein sollen, nicht gültig sein kann. Zum anderen liegt es nahe, dass alle Lebewesen deutlich andere „Realitäten“ wahrnehmen können. Daher könnte auch unser Erleben erheblich weit von der Realität entfernt sein. Doch die Menschheit hat sich zusätzlich hochkomplexe technische Messmethoden und Experimente und die Wissenschaft erschaffen und dürfte damit den Eigenschaften und Gesetzen der Realität sehr nahegekommen sein. So können auch die vielfältigen Techniken als eine Fortsetzung der natürlichen Evolution angesehen werden. Die Summe der so gewonnenen Fakten und Zusammenhänge ist dabei so umfangreich und komplex geworden, dass für ihre Darstellung besondere Methoden, z. B. mathematische, benutzt werden mussten.

Die Entwicklung der Kommunikation zwischen den Menschen schuf mehrere **gesellschaftliche Speicher** mit verschiedenen Inhalten. Einen stark verdichteten Überblick hierzu zeigt **Bild 38**. Jedes individuelle Gedächtnis enthält Aussagen etwa vom fünften Lebensjahr an bis kurz vor dem Tod. Werden die Inhalte der anderen lebenden Menschen hinzugenommen, so entsteht das kommunikative Gedächtnis, auch kollektives Kurzzeit-Gedächtnis genannt. Zusammen bilden sie das vereinte Gedächtnis. Entsprechend den lebenden Augenzeugen reicht es vor der Gegenwart etwa 80 bis 120 Jahre zurück. Der dann vorhandene floating gap wird seit langem weitgehend durch schriftliche Aufzeichnungen, Bilder, Denkmale usw. überbrückt. Noch älter sind Mythen, Legenden usw., die vor allem durch immer wieder aktiv wiederholte Riten usw. lebendig erhalten werden. Dadurch entsteht das kulturelle Gedächtnis bzw. kollektive Langzeitgedächtnis. Mit gespeicherten Dokumenten aus der Vergangenheit beschäftigt sich die Geschichtswissenschaft. Doch die darin enthaltenen Aussagen gehen fast nur auf Aufzeichnungen der herrschenden Klasse zurück, sagen daher kaum etwas über die große Masse der Menschen aus und werden auch deshalb immer wieder neu interpretiert. Insgesamt enthalten so die meisten Belege der Vergangenheit keine sicheren Aussagen. Weitere Details enthält [Völ19], zwei wichtige Quellen sind [Ass97] und [Gof99], s. auch S ###.



3.3.3. Die Eigen- bzw. Systemzeit

Zeit kann unterschiedlich erscheinen. Die **zählbare Zeit** liegt dann vor, wenn – wie im Bild 34 – Änderungen durch die Abzählung einer hochfrequenten Schwingung bestimmt werden. Die

subjektive Zeit ist dagegen von unserer Wahrnehmung im individuellen Bewusstsein bestimmt. Dadurch hängt sie erheblich von anderen Erlebnissen und Umständen ab (s. o.). Als dritte Variante tritt eine **Eigen-** bzw. **Systemzeit** auf. Sie erfasst spezifische Änderungen von Eigenschaften innerhalb abgeschlossener Systeme, die dann von der Systemtemperatur T_s abhängen. Allgemein bekannt ist das beim Kühlschrank. Das dort eingelagerte Gut ist je nach der Temperatur des Faches unterschiedlich lange haltbar **Bild 39**.

★★★ - Fach oder Tiefkühltruhe (bei minus 18° C) mindestens haltbar bis Ende:	siehe Prägung auf der Schmalseite
★★ - Fach	2 Wochen
★ - Fach	1-3 Tage

Bild 39. Haltbarkeit eines Fleischproduktes in den verschiedenen Kühlschrankfächern.

Über viele Erfahrungen hat sich ähnliches Verhalten, vor allem bei mechanischen und elektronischen Bauelementen und -gruppen, ergeben: Ihre Lebensdauer wird meist auf die Hälfte verkürzt, wenn die Temperatur um jeweils 8° erhöht wird. Diese 8°-Regel gilt nur näherungsweise, genügt aber dennoch für viele Anwendungen. Doch schon lange sind die Auswirkungen der Temperatur viel detaillierter untersucht. Das weist beispielhaft **Bild 40** für die Datensicherheit bei USB-Sticks und SD-Karten aus. Die folgende Tabelle gilt entsprechend für den Motorola Mikrokontroller MPC 555. Da seit etwa 1995 mehr als genügend Speicherkapazität verfügbar ist, werden des Umsatzes wegen solche Daten kaum noch mitgeteilt.

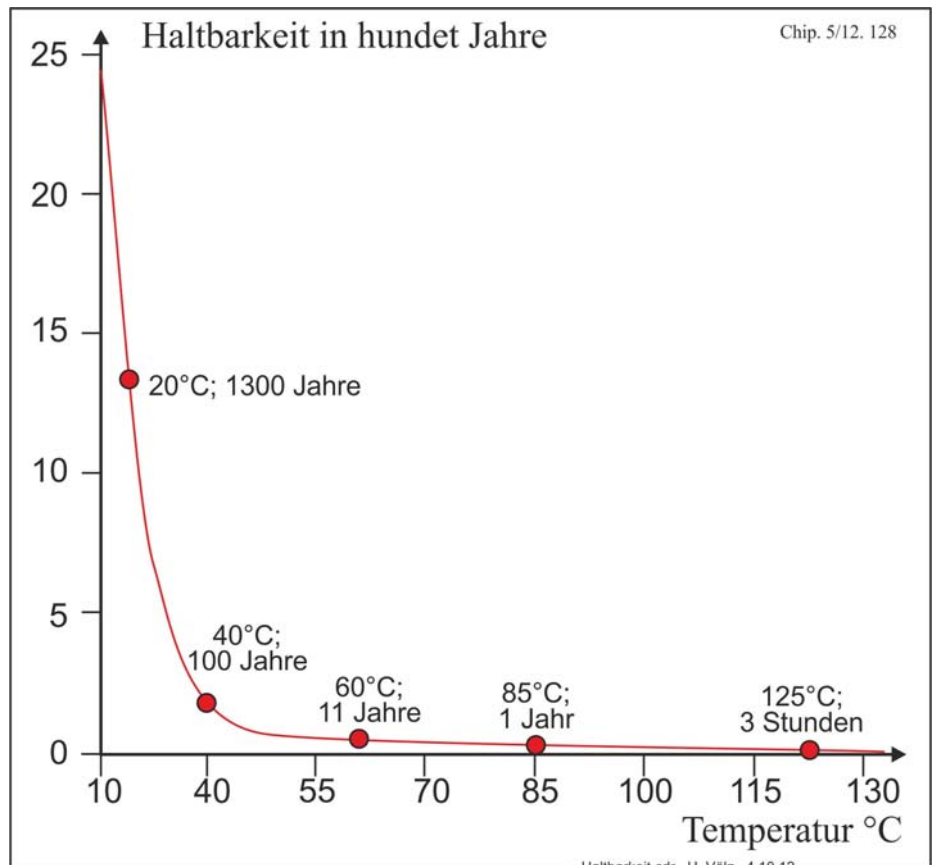


Bild 40. Haltbarkeit der Speicherdaten in USB-Sticks bzw. SD-Karten.

Temperatur/°C	Jahre
20	54 430
40	7 243
55	1 768
60	1 137
80	220
100	51
120	14
125	10

Aus Elektronik 23, 2000, S. 138

Experimentell fand van't Hoff für viele **chemische Reaktionen**, dass sie etwa 2- bis 3-mal so schnell ablaufen, wenn die Temperatur um 10°C erhöht wird. Mit der Boltzmann-Konstante k , der Aktivierungsenergie E_A in J/mol und einer Konstante A gilt für die molare Geschwindigkeitskonstante

$$k_g = A \cdot e^{\frac{-E_A}{k \cdot T}} = A \cdot B^{1/T} \quad \text{mit} \quad B = e^{-E_A/k}.$$

Sie sinkt mit steigender absoluter Temperatur T und kann daher für eine Systemzeit benutzt werden. Leider ist aber die Konstante A etwas temperaturabhängig. Mit einem Faktor u^* gilt oft als brauchbare Näherung

$$A = u^* \cdot \sqrt{T}.$$

Leider sind meist A und B schwer zu bestimmen. Jedoch in Fortführung der Untersuchungen fand 1896 **Arrhenius** das nach ihm benannte Gesetz für die Halbwertszeit t_H chemischer Reaktionen (50 % der Stoffe sind umgesetzt):

$$t_H = t_0 \cdot e^{\frac{E_A}{k \cdot T}}.$$

Darin ist E_A (zuweilen auch ΔE genannt) die Energieschwelle des Stoffes. Statt A ist die Zeitkonstante t_0 eingeführt. In brauchbarer Näherung beträgt sie für Elektronenbahnen $\approx 3 \cdot 10^{-15}$ s und für Gitterschwingungen $\approx 10^{-4}$ s. Ihr Wert hängt auch etwas von weiteren Parametern ab, u. a. von der jeweiligen Umweltisolierung. Mittels nicht an der Reaktion direkt beteiligten Enzymen oder Katalysatoren sind zusätzliche Beschleunigungen zu erreichen. Es gibt auch Hemmstoffe, welche die Reaktion verlangsamen.

Erste experimentelle Untersuchungen für die **Zuverlässigkeit von Bauelementen** unternahm 1930 Montsinger. Für die Lebensdauer (Nutzbarkeit) t_L isolierender Kabelpapiere fand er dabei die Arrhenius-ähnliche Gleichung:

$$t_L = t_0 \cdot e^{-A \cdot T}.$$

Darin sind t_0 und A experimentelle, materialabhängige Konstanten. Mit steigender Temperatur verkürzt sich also die nutzbare Lebensdauer. Für die Nutzer (von Geräten usw.) wird jedoch eine statistisch gesicherte Garantiezeit t_g bei der üblichen Betriebstemperatur T_A verlangt. Zu deren Bestimmung wären umfangreiche Messungen an vielen Ausführungen notwendig, die bei der Betriebstemperatur mehrere Jahre dauern müssten. Dann wäre aber bereits eine neue (verbesserte) Variante produziert und der bestimmte Wert sinnlos geworden. Folglich wird zur Bestimmung von t_g der Verschleiß absichtlich durch eine höhere Messtemperatur T_M vergrößert und dann der gewonnene Wert umgerechnet. Dieses Prinzip ist als **beschleunigte Alterung** bekannt. Zu ihrer Bestimmung wird eine geringfügig veränderte Arrhenius-Gleichung benutzt:

$$t_g = t_M \cdot e^{\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_M} \right)}.$$

Darin bedeuten R die Gaskonstante und E_A die Aktivierungsenergie bei der Alterungstemperatur. E_A ist überwiegend eine Materialkonstante oder betrifft die Paarung der miteinander reagierenden Stoffe. Soll die beschleunigte thermische Alterung für ein (elektrotechnisches) Gerät berechnet werden, welches mehrere verschiedene Polymere usw. enthält, so ist vorher das thermisch instabilste Material zu bestimmen und seine Werte werden in der Gleichung benutzt.

Ganz analog wurden die auf S. 39 angegebenen Werte so bestimmt. Bei Flashspeichern ist für den Datenerhalt die Aktivierungsenergie wesentlich. Sie liegt zwischen 0,83 eV und 1,1 eV und ist für den Verlust von gespeicherten Elektronen zuständig. Mittels einer sehr dünnen isolierenden Oxidschicht ist der Verlust von gespeicherten Elektronen festgelegt. Durch eine Lagerung im Kühlschrank wird er zusätzlich gesenkt. Gemäß der Arrhenius-Gleichung können sie die Speicherschicht nur gemäß der Diffusionsrate D verlassen:

$$D = A(T) \cdot e^{\frac{-E_a}{k \cdot T}}.$$

Darin bedeuten: A einen Materialfaktor, E_a die Aktivierungsenergie der Diffusion, k die Boltzmann-Konstante = $8,6 \cdot 10^{-5}$ eV/K und T die absolute Temperatur. Damit folgt der Zeitfaktor

$$B = t_L(T_1) \cdot e^{\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}.$$

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass die QuBit der Quantenelektronik nur bei den extrem tiefen Temperaturen von mK und μ K auch lediglich recht kurzfristig erhalten werden können.

3.3.4. Die radioaktive Zeit

Recht ähnlich wie bei der Systemzeit altern viele Materialien. Für den radioaktiven Zerfall gilt dann die Wilski-Gleichung. Aus der Einsatzdosisleistung DL_E folgt die typische Lebensdauer bzw. die Zeit für die radiologische **Alterung mit Gammastrahlung**

$$t_e = t_Q \cdot \left(\frac{DL_E}{DL_Q} \right)^{psi-1}$$

Darin bedeuten t_Q die Zeit für die Prüfdosisleistung DL_Q und psi den Dosierungseffektexponenten (der Alterungsreaktion). Er ist eine Materialkonstante bzw. eine Konstante für die Paarung der miteinander reagierenden Stoffe. Ohne Kenntnis der Ursachen (Quantenphysik) gilt auch für die Radioaktivität ein ähnlicher Zusammenhang. Bei der Zerfallskonstante λ zerfallen je Zeiteinheit von n Atomen

$$dn = -\lambda \cdot n \cdot dt.$$

Während der mittleren Lebensdauer eines Atoms $\tau = 1/\lambda$ hat daher die Anzahl der Atome auf $1/e \approx 36,9\%$ abgenommen. Bei der Halbwertszeit t_H existiert nur noch die Hälfte der Atome

$$t_H = \ln(2)/\lambda = \ln(2) \cdot \tau \approx 0,693 \cdot \tau.$$

Die Halbwertszeiten der vielen Materialien reichen von $7 \cdot 10^{-9}$ s beim ^{216}Ra bis zu $1,5 \cdot 10^{24}$ Jahre beim ^{128}Te . Weitere Beispiele zeigt die nebenstehende Tabelle. Auch Elementarteilchen sind nicht stabil. Für ein freies (isoliertes) Neutron beträgt $t_H \approx 10,7$ Minuten, für ein Proton $\approx 10^{32}$ Jahre. Stabile Atome zeigen keine beobachtbare Radioaktivität.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass über den radioaktiven Zerfall u. a. das Alter von Gesteinschichten bestimmt werden kann.

$^{241}_{94}\text{Pu}$	β	13 a
$^{241}_{95}\text{Am}$	α	460 a
$^{237}_{93}\text{Np}$	α	$2,2 \cdot 10^6$ a
$^{233}_{91}\text{Pa}$	β	27,4 d
$^{233}_{92}\text{U}$	α	$1,62 \cdot 10^5$ a
$^{229}_{90}\text{Th}$	α	$7,3 \cdot 10^3$ a
$^{225}_{88}\text{Ra}$	β	14,8 a
$^{225}_{89}\text{Ac}$	α	10 d
$^{221}_{87}\text{Fr}$	α	4,8 min
$^{217}_{85}\text{At}$	α	21 ms
$^{213}_{83}\text{Bi}$	β	47 min
oder	α	47 min
$^{213}_{84}\text{Po}$	α	4,2 ms
$^{209}_{81}\text{Tl}$	β	2,2 min
$^{209}_{82}\text{Pb}$	β	3,3 h
$^{209}_{83}\text{Bi}$	stabil	∞

3.3.5. Gibt es eine universelle Zeit?

Die vier voranstehenden Bestimmungen von Zeit ergeben sich durch unterschiedliche Bezüge und Einflüsse. Lediglich bei der radioaktiven Zeit fehlen sie völlig. Dafür wird ihr Maßstab nur durch die Zerfallsgeschwindigkeit des ausgewählten radioaktiven Materials (s. Tabelle oben) bestimmt. Bei der gezählten Zeit dient die Frequenz eines Quantenüberganges von ^{32}Cs als universelles Bezugsnormale. Damit berücksichtigt sie aber nichts von den Eigenschaften des Mediums (Materials), in dem sich die elektromagnetische Welle bewegt. Bei der subjektiven Zeit ist dagegen von großem Einfluss, was wir wie erleben. Daher ist sie kaum irgendwie allgemeingültig festzulegen oder genauer zu bestimmen. Die Eigen- bzw. Systemzeit ergibt sich dagegen dadurch, wie schnell in einem abgegrenzten Bereich (System) die Änderungen erfolgen und wie sie durch die Temperatur beeinflusst werden können. Zuweilen wird dabei die gezählte Zeit als übergreifender Bezug benutzt. So hat jede dieser Zeiten ihre spezifischen Vor- und Nachteile, und es ergibt sich die Frage nach einer übergeordneten, allgemeingültigen Zeit. Der sehr spezielle Ablauf der Urknalltheorie steigerte diesen Wunsch besonders intensiv. Ganz im Gegensatz zu allen sonstigen Zeitabläufen geschichtlicher Entwicklungen zeigt sie eine total andere Zeitskala. (**Bild 41**), Recht häufig ist eine lineare Zeitskala, wie am Beispiel der biologischen Entwicklung in (a) gezeigt ist. Am häufigsten tritt aber die logarithmische Einteilung auf, wie z. B. für die Entwicklung zur Menschheit gemäß (b) gilt. Bei der Urknalltheorie erfolgen im Gegensatz zu beiden Varianten vor allem zu Beginn sehr schnelle Änderungen, die dann ständig langsamer werden. Dabei fallen nach der Inflation die Temperatur T und die Stoffdichte ρ unterschiedlich schnell und recht steil aber gleichbleibend ab:

$$T = \frac{10^{16}}{\sqrt{t_w}} \quad \text{und} \quad \rho = \frac{10^5}{t_w^2}$$

Beides lässt sich vielleicht mit einer Systemzeit besser erfassen. Doch ich fand dazu keine geeignete Lösung. Bei den sehr hohen Temperaturen erscheint nämlich nicht die bei der Berechnung verwendete, übliche gezählte Temperatur mittels des Cs-Atoms – das aber noch nicht existiert – angebracht zu sein. Ich konnte aber keine passende Lösung finden.

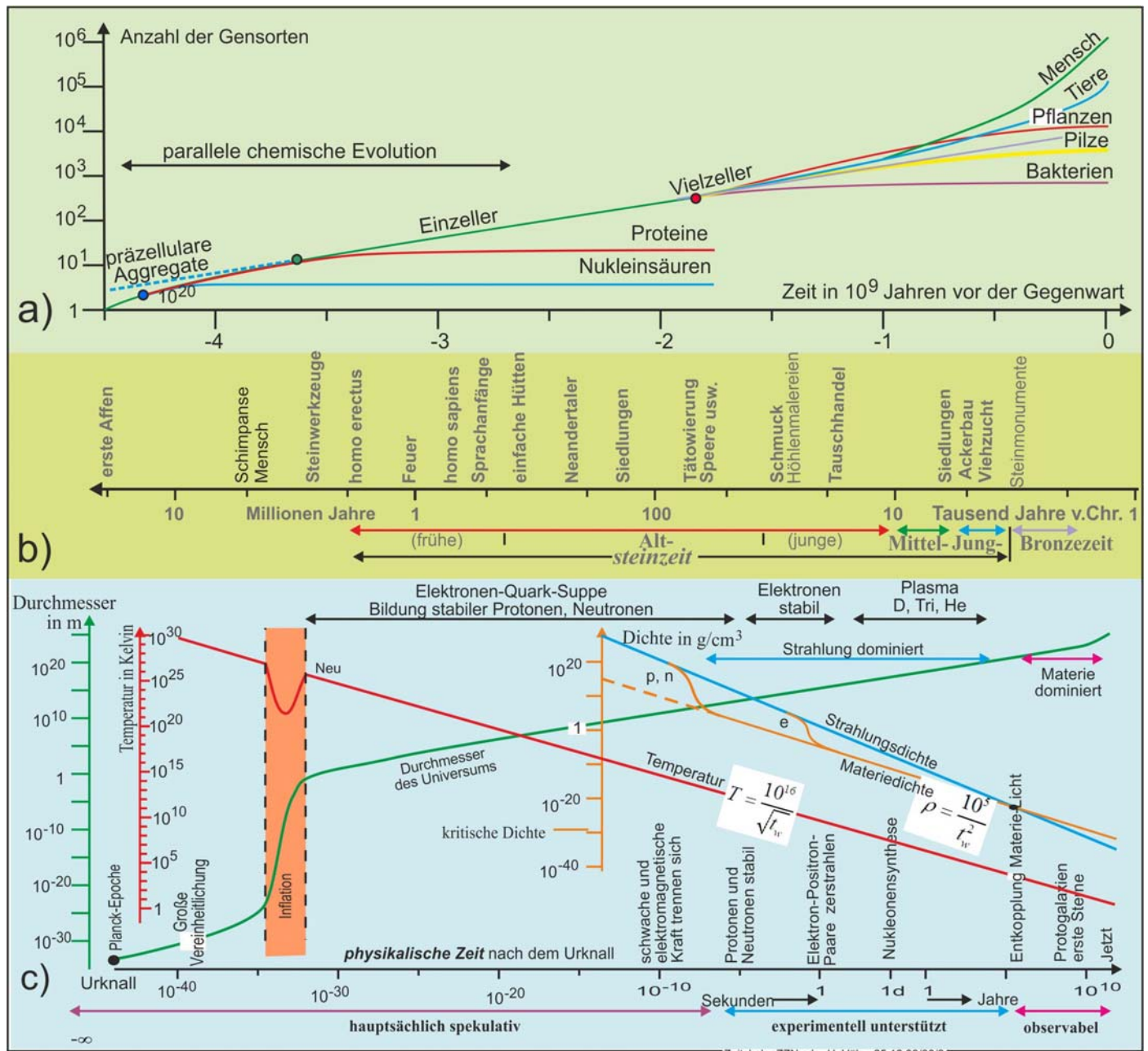


Bild 41. Beispiele für Zeitskalen; a) linear, b) logarithmisch, c) reziprok logarithmisch bei der Urknalltheorie.

Einen anderen ersten Anfang hierzu könnte vielleicht eine Analogie zum *Gewicht* mit Abhängigkeit von der Beschleunigung und zur *Masse* als streng physikalische Größe bringen. Auch das habe ich erfolglos in [Völ15] mit zwei neuen Begriffen versucht (**Bild 42**).

Bild 42. Bestimmung von Gewicht und Masse.



- **Temporata** (wie Gewicht): relativ; innerhalb eines Systems mit Einfluss von der Temperatur, Eine der Näherungen ist die Systemzeit.
- **Chronusta** (wie Masse): absolut außerhalb und unabhängig vom jedem System. Eine Näherung ist die gezählte Zeit.

3.4. Voraussagen und Prognosen

Entsprechend den Betrachtungen der subjektiven Zeit (Abschnitt 3.3.2) bemüht sich der Mensch seine Zukunft optimal zu gestalten. Er will so vorteilhafter und sicherer leben. Mittels Analysen, Theorien, physikalischen Gesetzen, welche die Zeit als Parameter enthalten, lassen sich Prognosen³⁴ erstellen, die als wissenschaftliche Voraussagen „berechnet“ werden. Sie treten aber nur mehr oder weniger wahrscheinlich ein. Denn während die Vergangenheit unabänderlich feststeht – selbst dann, wenn sie nicht bekannt ist – ist die Zukunft immer irgendwie offen. Denn es können Ereignisse eintreten, die nicht vorauszubestimmen waren. Im Altertum wurden hierfür Weissagungen z. B. mittels Orakel, Gestirnen und Kartenlesen, benutzt. Rein formal war zeitweilig ein Laplace-Dämon (s. Bild 19) oder nur eine Weltformal in der Diskussion. Doch selbst wenn sie möglich wären, könnten seine Voraussagen von Übel sein. Denn voll gültige Aussagen würden den Menschen die so lebenswichtige *Hoffnung* nehmen. Deshalb ist eine gewisse Ungewissheit der Zukunft sogar vorteilhaft. Sie gibt der Gegenwart Würze und bewirkt für die Zukunft ein gespanntes Interesse. Nicht von ungefähr lesen viele Menschen Zukunftsromane mit großer Hingabe. Einige bevorzugen sogar, zumindest zeitweilig, die Gefahr in Form von Erlebnisreisen und Extremsport. Fast alle Menschen sehnen sich immer wieder nach Neuem. Schließlich würde eine vollständige Vorhersage auch die menschliche Freiheit zu einer Illusion machen.

Eine besonders umfangreiche Entwicklung von Prognose- und Vorhersagenmethoden entstand in den 1970er und 1980er Jahren. Ursachen waren die umfangreichen technischen Innovationen, die ersten Ernüchterungen durch globale Folgeschäden des industriellen Fortschritts und die rasante Entwicklung der elektronischen Rechentechnik.

Bei den Methoden müssen die *quantitativen* durch Extrapolation aus vorhandenen Daten und die *qualitativen* mit nur inhaltlichen Aussagen unterschieden werden. Bezüglich der *Wahrscheinlichkeit* der Aussagen ist zu unterscheiden, ob die Ergebnisse – wie bei Wahlprognosen – wiederum und erneut das künftige Geschehen beeinflussen. Das geschieht nicht bei Naturgesetzen. Doch Technologien und Rezepte gehören nicht zu den Vorhersagen. Jede Vorhersage bezieht sich immer auf ein Geschehen, das durch aufeinanderfolgende Fakten gekennzeichnet ist. Deshalb können gültige Vorhersagen zuweilen auch allein durch *Probieren* erreicht werden. Ein inhaltliches Verstehen der Ursachen oder Zusammenhänge ist dazu zwar nicht notwendig, aber stets vorteilhaft. Schon die Babylonier benutzten „*Zeitreihen*“ zur Vorhersage. So sagte **Thales** 585 v.Chr. eine Sonnenfinsternis richtig voraus, konnte sie aber nicht erklären. Daher kann Vorhersagen teilweise auch *Handwerk* sein. So wird es immer Vorhersagetechniken geben, deren Erfolg nahezu unerklärt bleibt. Ein Beispiel ist die zeitliche Entsprechung zwischen Mond- und Menstruationszyklus. Deshalb hat auch eine richtige Vorhersage nur bedingt theoretische Konsequenzen. Sie kann nur einen Teil der *Hypothese* betreffen, die sie bestätigen soll. Dennoch kann die Qualität einer Theorie von der Anzahl richtiger Voraussagen beeinflusst werden. Andererseits gibt es auch starke Theorien, die zu keine verifizierbare Vorhersage geführt haben, z. B. die **Darwin**’sche Theorie.

Für die seit einigen Jahrzehnten üblichen Prognosen sollen hier nur einige Beispiele kurz betrachtet werden. Auf stark fehlerhafte Prognosen und deren Folgen sei dabei verzichtet. Einen recht umfangreichen Überblick zu Prognosen und deren Ergebnissen enthält [Mod94].

Eine Prognosemethode von 1845 mit dazugehöriger Gleichung stammt von Pierre Francois Verhulst (1804 – 1849). Sie wurde 1926 von Vito Volterra (1860 – 1940) verallgemeinert. Er nann-

³⁴ Griechisch *prognosis* das Vorherwissen von *pro* + *gnosis* Erkenntnis, Urteil. Lateinisch *prognosis*, im Voraus erkennen und *prognosticare* ahnen, vorhersagen, erheben. Prognose wird auch für die voraussichtliche Entwicklung einer Krankheit, des Wetters und der Technik benutzt.

te sie **logistische Kurve**. Sie betrifft begrenztes oder **gehemmtes Wachstum** und wird immer noch erfolgreich für Verkaufszahlen (Umsätze) genutzt (**Bild 43a**). Die aktuellen Werte ähneln weitgehend der Gauß'schen Glockenkurve (s. Bild 13). Ihre Aufsummierung führt zu einer S-Kurve, deren Verlauf meist in fünf Etappen eingeteilt ist (b): Geburt, Wachstum, Reife, Rückgang und Tod. Die jeweils vorhandene Anzahl $N(t)$ kann maximal auf M (Ressource) wachsen und mit der Geschwindigkeitskonstanten a gilt die Differentialgleichung

$$\frac{dN(t)}{dt} = a \cdot N(t) \cdot \left(1 - \frac{N(t)}{M}\right).$$

Durch Integration liefert eine glockenähnliche Kurve mit b als Integrationskonstante

$$N(t) = \frac{M}{1 + e^{-(a \cdot t + b)}} \text{ und daraus: } \ln\left(\frac{N(t)}{M - N(t)}\right) = a \cdot t + b.$$

[Mod94] enthält hierfür sehr viele Beispiele (u. a. Wachstum der Sonnenblume und Wortschatz eines Kindes). Die Entwicklung ist dort auch ausführlich diskutiert. Mit ihr ist es sogar möglich, Zurückliegendes zu bestimmen. Das wird für die Expeditionen vor Columbus belegt (d).

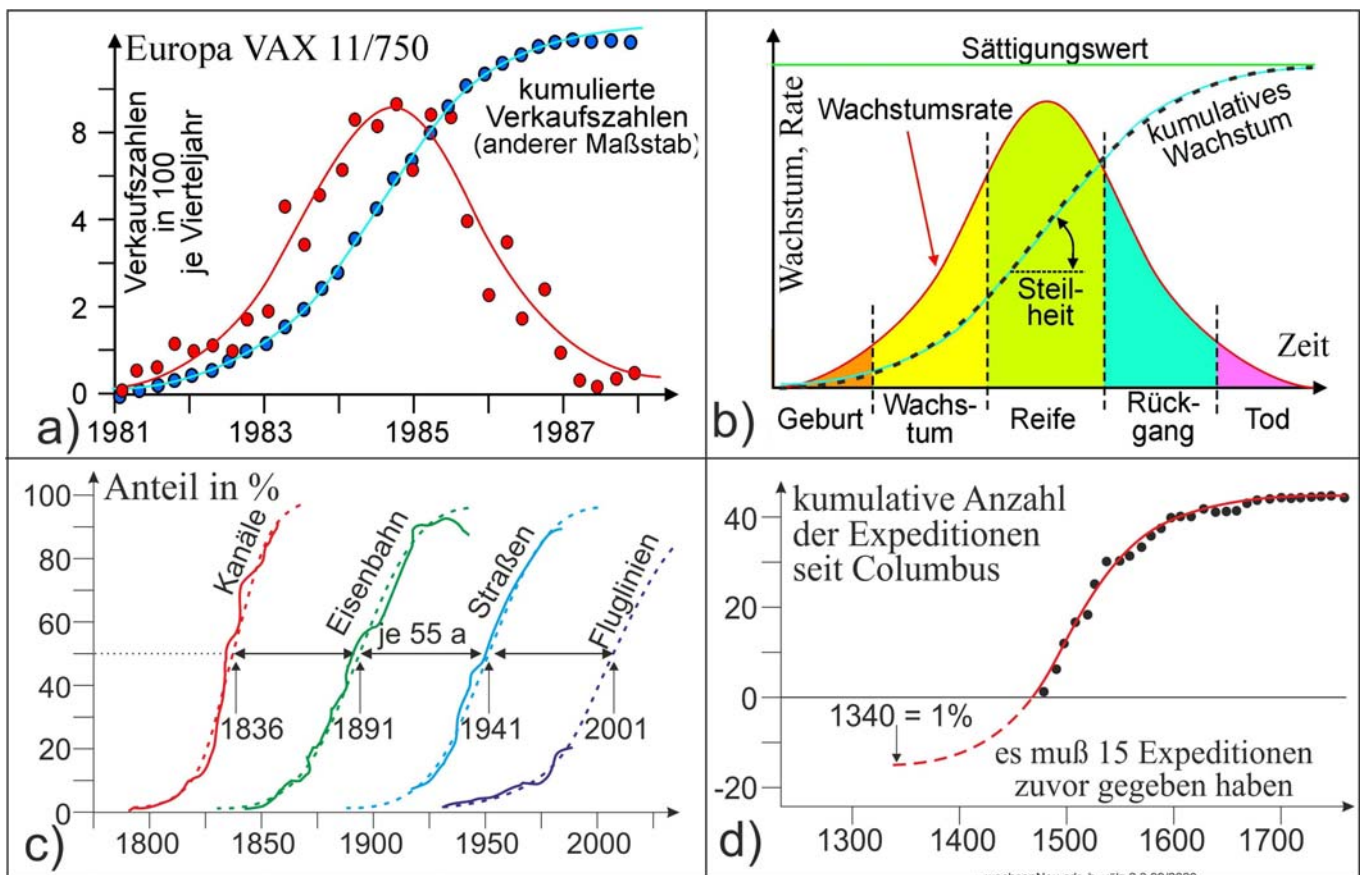


Bild 43. Beispiele für ein begrenztes Wachstum nach [Mod94].

Bei der Weiterentwicklung eines Produktes können unterschiedliche Technologien für den gleichen Zweck entstehen. Bezüglich des Transportes zeigt das (c). Dann gilt fast immer die **85%-Regel**. Das wurde für sehr viele Fälle von H. Schrauber nachgewiesen [Sch78]. In (c) ist das jedoch nur bedingt zu erkennen. Eindeutig ist die Regel dagegen bei den Speicherebenen im Abschnitt ## nachweisbar (s. auch [Völ19]). Trotz vieler Versuche fehlt für diese Regel aber immer noch eine Begründung. Häufig wird aber angenommen, dass bei der Fortentwicklung einer Technik die Ausschöpfung der „letzten“ Reserven immer aufwändiger wird. Bei etwa 85% des prinzipiell erreichbaren Grenzwertes ist es dann einfacher und preiswerter, eine neuartige Technologie zu suchen. Mit geringer Abwandlung der Theorie des begrenzten Wachstums analysierte ab 1970 der „Club of Rome“ die „**Grenzen des Wachstums**“ bezüglich der ständig sinkenden Rohstoff- und Energie-

ressourcen der Welt [Mea72]. Damit wurde wohl erstmalig deutlich auf eine mögliche Klimakatastrophe hingewiesen. Außerdem entstanden eine erhebliche Kritik an der Weltwirtschaft und ein Zweifel an den nicht hinreichend universellen Aussagen der Wissenschaft.

Auf weitere quantitative Prognosemethoden sei nun verzichtet (s. dazu [Völ20], [Völ01], um zu den *qualitativen* Methoden überzugehen. Hierfür wurde 1963 von *Helmer* und *Gordon* die **Delphi-Methode**³⁵ entwickelt und in [Heg66] vorgestellt. Sie benutzt drei Expertenrunden. In der Eröffnungsrunde wird der inhaltliche Rahmen vorgegeben und die Experten nennen für das Rahmenthema mögliche Ereignisse und Entdeckungen, die sie künftig für wichtig halten. Hieraus wird eine Liste zusammengestellt, auf deren Grundlage die Experten in der zweiten Runde angeben, wann sie die Ergebnisse erwarten. Hiervon werden dann statistische Mittel- und Grenzwerte berechnet sowie graphisch dargestellt. In der dritten Runde geben dann die Experten dazu ihre kritischen Einschätzungen. Aus den Antworten entsteht schließlich die Voraussage.

Sind geeignete Fachkenntnisse nicht zu gewinnen, dann hat sich zuweilen eine **Ideenkonferenz** (Brainstorming) bewährt. Dabei wird 5 bis 10 Experten das zu lösende Problem möglichst deutlich erklärt. Die Teilnehmer sollen dann beliebige, selbst die absonderlichsten Varianten vortragen. Dabei gelten vier Regeln:

- Für die *Phantasie* dürfen keine Grenzen gesetzt werden; alle geäußerten Ideen sollen die anderen Teilnehmer anregen,
- *Quantität* geht vor *Qualität*; je mehr Lösungsvorschläge, desto besser, denn unter vielen, ist auch ein geeignetes wahrscheinlicher,
- Es gibt kein *Urheberrecht*,
- Jegliche *Kritik* und ganz besonders Killerphrasen sind verboten.

In den letzten Jahrzehnten entstand auch der **Hype-Zyklus**, der seitdem leider viel zu umfangreich benutzt wird. In verschiedenen Publikationen sind mindestens 20 unterschiedliche Beispiele vorhanden. Eines zum Datenaustausch zeigt **Bild 44**. Viele Begriffe sind hierbei unzureichend definiert. Das gilt z. B. für Technologie-Begeisterung und Sichtbarkeit. Es ist nicht einmal hinreichend genau festgelegt, was zum Thema gehört und wie die einzelnen Zahlenwerte gewonnen wurden. Allgemein wird dieses Prinzip meist dann ausgesucht, wenn das gewählte Thema einen großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand erfordert und beim Abschluss eine umfangreiche Produktion erwartet wird. Dadurch ist diese Methode vorteilhaft um leichter Drittmittel zu erlangen. Was jedoch einfach möglich ist und sehr schnell große Verbreitung findet, verlangt keine derartige Förderung und die Entwicklung verläuft unbeeinflusst nach der o. g. S-Kurve, im Bild der unbeeinflusste Akzeptanzaufbau, z. B. beim GSN (grüner Kurvenbereich). Insgesamt fehlt also für den Hype-Zyklus jegliche Theorie.

Als Vorbild für den Hype-Zyklus kann teilweise die recht alte Methode der Einteilung des Geschehens in Zyklen gelten. Bereits um 1925 entdeckte hierzu Nikolaj Dmitrijewitsch Kondratieff (1892 - 1938), dass es große Wirtschaftszyklen gibt, die in Wellen von 40 bis 50 Jahren ablaufen, Diese Entwicklung zeigt sich auch, wenngleich etwas verändert, u. a. in Bild 43c. Doch auch hierbei ist es ziemlich ungewiss, ob so ein Trend in der Zukunft anhält. Das wird bei den später hinzugefügten Fortsetzungen 4 bis 6 recht deutlich. Solange solche Einteilungen aber nur rückwirkend erfolgen, besteht kaum eine Gefahr. Das gilt daher auch für die Speicheretappen gemäß der Tabelle auf Seite 27 und Bild ###.

³⁵ Der Ort Delphi wurde in der Antike als „Nabel der Welt“ (Omphalos) angesehen. Dort war der Sitz des Orakels der Erdgöttin Gaia. Der Sage nach besiegte Apollo die Riesenschlange Python, die Gaia bewachte. Danach teilte er sich die heilige Stätte mit Dionysos. Zentrum des delphischen Orakels war die oberste Priesterin Pythia, deren ekstatische Weissagungen von den Priestern in Verse übersetzt wurden, da sie als Äußerungen Apollos galten. Zu Weissagungen kamen sowohl Herrscher als auch Privatleute nach Delphi.

3.5. Schwierigkeiten für Rückrechnungen

Nach der üblichen Auffassung steht die Vergangenheit unabänderlich fest. Dennoch können wir auf sie nicht irgendwie zugreifen. Dazu muss damals eine Speicherung erfolgt sein und die erfasst meist auch nur einige, damals ausgewählte Details. Da es aber mit Prognosen möglich ist, einiges für die Zukunft zu Erwartendes zu erfahren, wäre zu hoffen, dass mit ähnlichen Methoden, also mittels Rückrechnungen, so etwas auch für die Vergangenheit möglich sein sollte. Doch bereits die Geschichtswissenschaft zeigt, dass hierbei immer beträchtliche Unsicherheiten bestehen (s. S. 38 und Bild 38). Ausführlicher ist das mit Zitaten des führenden Geschichtswissenschaftlers Jacques Le Goff (1924 – 1996) zu belegen [Gof99], S. 142, 145, 160:

Geschichte will objektiv sein und kann es nicht. Sie will wieder zum Leben erwecken und kann nur rekonstruieren. Sie will Dinge gegenwärtig machen, doch muss zugleich ihre Distanz und die Größe der historischen Entfernung wieder herstellen.

Die Vergangenheit ist ein Konstrukt und wird fortwährend neu interpretiert, dabei bildet die Zukunft einen integralen und Bedeutung stiftenden Bestandteil von Geschichte.

Geschichte ähnelt einem Roman. Sie besteht aus Intrigen.

Zusätzlich sei noch mit **Bild 45** gezeigt, dass die Vergangenheit leider fast nie - auch nicht annähernd – rückwärts zu berechnen ist. So kann der Ort des Anstoßes vom Billard (a) nicht aus Daten beim Eintreffen am Loch bestimmt werden. Die Rückrechnung führt ins Unendliche (b). Beim Schachspiel (c) kann kaum bei keiner Stellung der letzte Zug bestimmt werden, oft nicht einmal, ob ihn Schwarz oder Weiß vollzog.

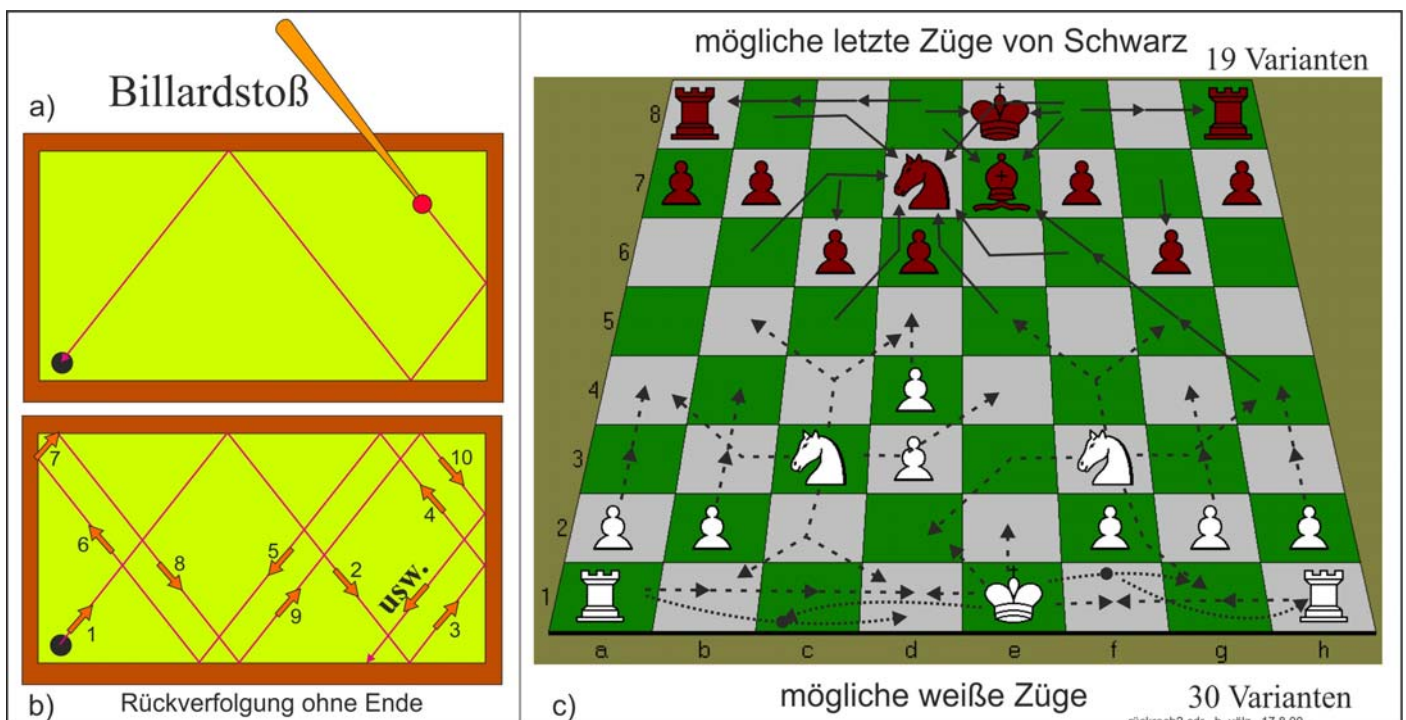


Bild 45. Zwei Beispiele für die Unmöglichkeit von Rückrechnungen.

3.6. Über Anfang und Ende von Zeit

Es gibt mehrere Versuche einen möglichen Anfang und das Ende der Realität (der Welt). Aus den vorangegangenen Betrachtungen folgt rein spekulativ eine recht einfache Variante. Sie geht davon aus, dass insgesamt eine unveränderliche Ressource aus Energie E und Masse m entsprechend $E = m \cdot c^2$ zusammengesetzt ist. Wenn dann irgendwann die gesamte Energie in Masse umgesetzt ist, dann können keine Änderungen mehr auftreten und damit gibt es keine Zeit mehr. Andererseits ist die Masse in Form von Objekten vorhanden, wodurch ein dazugehöriger Raum bestimmbar ist.

Eine Zeit beginnt aber wieder, wenn sich einige Objekte in Energie verwandeln. Die Gesamtheit der Realität aus m und E wäre also ewig und konstant. In den Grenzfällen von „Anfang“ und „Ende“ gäbe es entweder Raum oder Zeit, ansonsten aber beides.

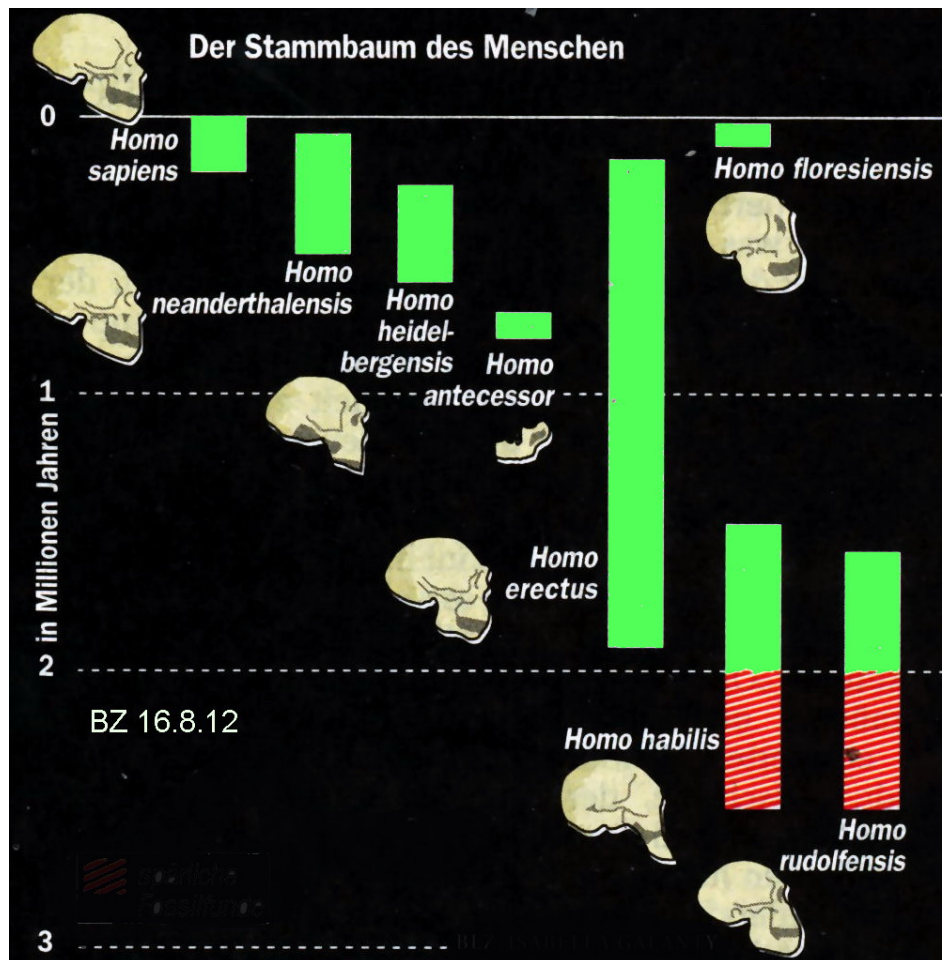
II. Der Mensch entsteht und begreift

4. Der Mensch erlebt die Realität

4.1 Vom Leben zur Hand

Der vorangehende I. Teil zeigt auf, was aus heutiger Sicht die Realität sein könnte. In diesem II. Teil wird nun versucht aufzuzeigen, wie die Menschheit zu den Erkenntnissen über die Realität gelangte. Deren Evolution begann vor etwa 10 Milliarden Jahren ($=10^{10}$, vgl. Bild 41). Das erste Leben entstand vor etwa 3,5-Milliarden. Die ersten Säugetiere gab es dann vor $2 \cdot 10^8$ Jahren und die Entwicklung zum Menschen begann vor ca. 3 Millionen. Sie erfolgte über mehrere Vorstufen und führte schließlich zum heutigen Menschen, dem *Homo sapiens*. Die wichtigsten Etappen dafür zeigt **Bild 46**.

Bild 46. Die Entwicklung der Menschheit.



Mit der Entwicklung des Menschen wurden auch ständig neue Leistungen möglich. Die besonders typischen sind in **Bild 47** bis zum Jahre 2 000 v. Chr. zeitlich eingeordnet.

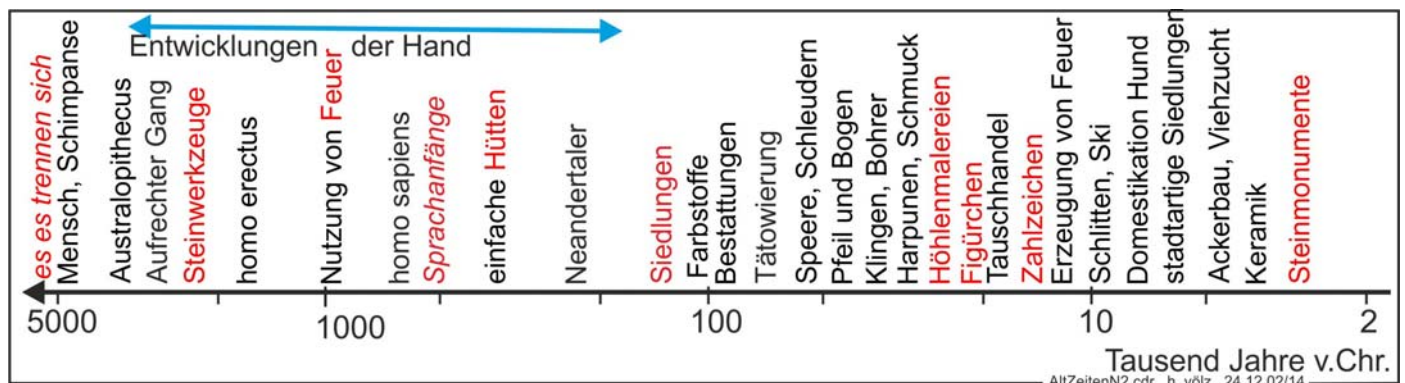


Bild 47. Wesentliche Entwicklungen der frühen Menschheit.

Unsere frühesten Vorfahren lebten noch auf den Bäumen. Bereits hier war die Hand mit einem abgespreizten Daumen zum Greifen und Festhalten auf den Ästen vorteilhaft. Dabei war auch die Orientierung mit den Augen wichtig und so veränderte sich deren Stellung im Kopf. Das war auch als Vorbereitung für den aufrechten Gang wichtig. Der bewirkte aber nur Veränderungen der Arme (Schulter, Vorderarm, Hand) und ermöglichte dadurch den Transport von Nahrung über recht weite Strecken und das Tragen des Nachwuchses. Später kam der Werkzeuggebrauch hinzu. Dabei entwickelte sich die Hand ständig weiter, wurde immer flexibler, bis sie schließlich „Das Werkzeug

aller Werkzeuge“ wurde. Friedrich Engels (1820 – 1895) stellte sogar fest, dass die Hand nicht nur das Organ der Arbeit sei, sondern auch ihr Produkt. Bald schuf sich der Mensch auch eigene Werkzeuge, zunächst nur aus Holz. Vor etwa 2,5 Millionen Jahren entstanden dann auch Steinwerkzeuge. Der immer weiter zunehmende Handgebrauch erforderte eine verfeinerte Steuerung durch das Gehirn und trug so zu dessen Weiterentwicklung bei. Später förderten gemeinsam Hand und Gehirn das Entstehen der Sprache (s. u.). Im gesamten Tierreich gibt es zur Entwicklung der Hand keine Parallele. Zum Erreichen ihrer hohen Flexibilität war insgesamt eine längere Entwicklung erforderlich (blaue Linie im Bild 47). Das belegt auch, dass selbst Schimpansen keine besonders hergestellten Werkzeuge benutzen und lediglich Objekte mit körpereigenen Mitteln verändern, vorrangig mit den Fingernägeln oder Zähnen. Außerdem beherrschen alle Primaten nur eine leidlich entwickelte Gebärdensprache. (**Bild 48**):

- Die Besonderheiten der Hand sind sehr vielfältig. Als erstes wurde bereits vor Millionen Jahren der Daumen frei beweglich sowie länger. Dadurch gelang es, ihn sowohl mit dem kleinen als auch mit dem Ringfinger zusammenzuführen. Besonders wichtig sind drei besondere Griffarten. Sie ermöglichen es dem Menschen, Gegenstände ganz präzise zu ertasten, zu greifen und zu werfen, Der seitliche **Zangengriff**: Die Spitze des Daumens drückt dabei gegen die Seite des Zeigefingers (Bleistift).
- Der 3-Punkte **Feingriff**: Daumen, Zeige- und Mittelfinger umgreifen ein Objekt (Teelöffel).
- Der 5-Punkte **Korbgriff**: Alle fünf Finger halten den Gegenstand und können ihn so auch bewegen (Töpfchen) .

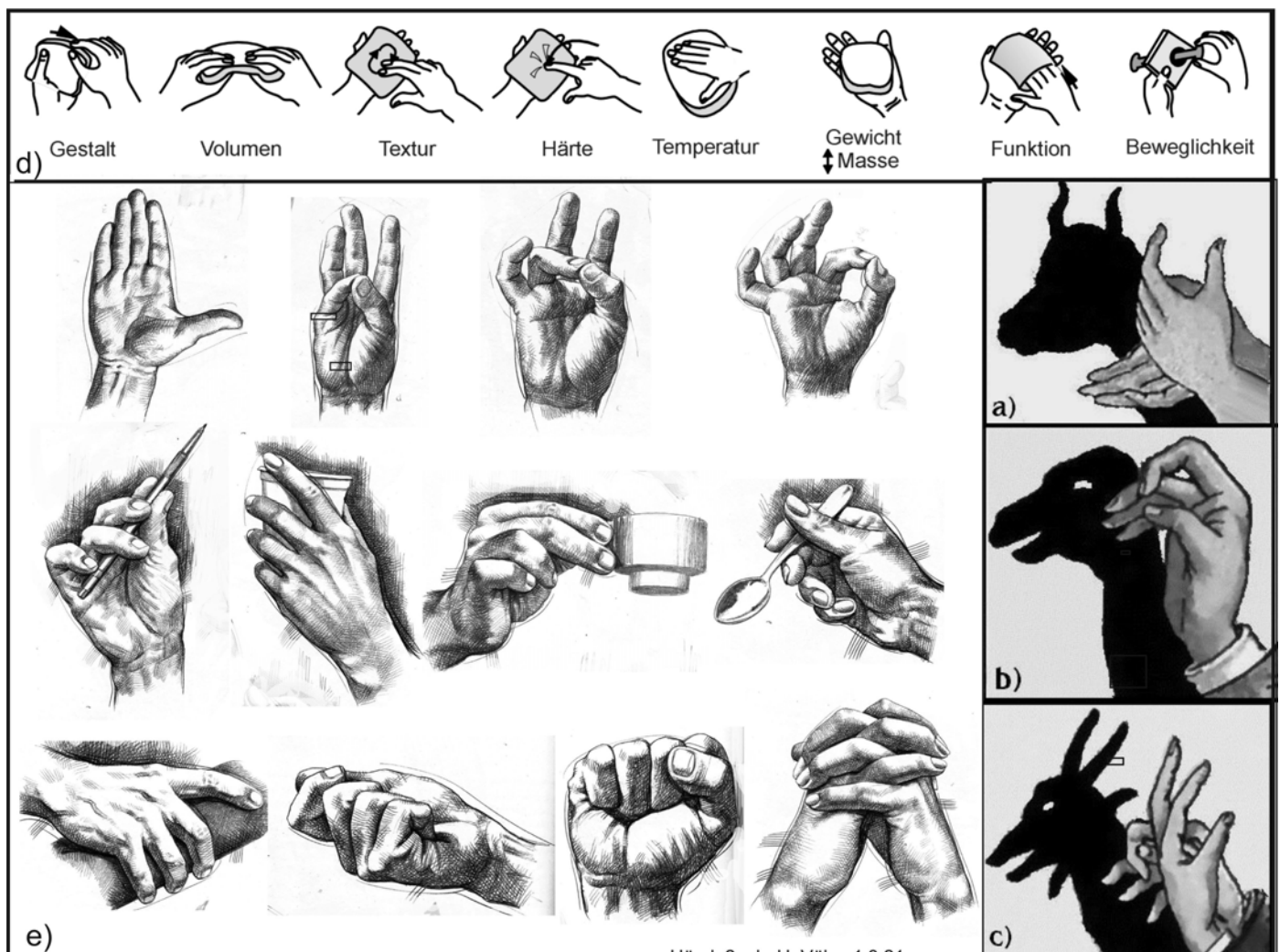


Bild 48. Beispiele für die vielen Möglichkeiten der Hand.

Die Fingerspitzen sind mit Rezeptoren ausgerüstet, wobei es Druck-, Berührungs- und Vibrationsrezeptoren gibt. So können Eigenschaften von Objekten durch „Begreifen“ ertastet werden (d). Daher ist zu verstehen, dass eine Hauptaktivität von Kleinkindern in den ersten Lebensjahren darin besteht, die eigene Bewegung gegenüber der Umwelt zu erforschen.

Die Hand kann in beide Richtungen gedreht werden und lässt sich nach oben und unten beugen. Dadurch kann sie halten, greifen, schieben und fixieren. Werden die Finger der beiden Hände ineinander verflochten, so bilden sie den ersten Korb. Für Schöpfen von Wasser ist es auch das erste Gefäß. Die Hand wird so zum Tast-, Greif-, Kampf- und Pflegeorgan. Sie dient zur Herstellung von Werkzeugen, Waffen und Gütern. Sie ist auch weitgehend zuständig für den Ausdruck von Aussagen mit einer Gebärdensprache. In Kombination mit dem Arm, der Steuerung über Auge und Gehirn ist sogar ein präziser, im Voraus genau „berechneter“ Wurf möglich. Er ermöglicht mehr Beute zu erlangen und bringt mehr Sicherheit fürs Leben. [Hör21]

Auch heute weisen noch symbolhafte Ausdrücke auf die Hand hin. Dazu gehören u. a. „sein Schicksal in die Hand nehmen“, „die Hände in Unschuld waschen“. Die Hand gibt man jemandem, um anzuzeigen, dass man in guter Absicht gekommen ist. Ein Handschlag verkörpert gemeinschaftliche Werte und negativ ist das „Zugreifen“ eines Diebes oder Kriminellen. Die gewaltige Bedeutung der Hand zeigt sich auch dadurch, dass noch heute viele Begriffe auf sie zurückgehen. Einige Beispiele sind: *Hand*: handeln, handlich, behandeln, verhandeln, Handy, Handel, Handlanger, Handwerk, Handgriff, Handstreich ... *Fühlen*: erfühlen, befühlen, fühlbar, Gefühl, Tuchföhlung. ... *Greifen*: begreifen, ergreifen, zugreifen. greifbar. ... *Halten*: behalten, erhalten, haltbar, Haltung, Halterung ... *Werfen*: entwerfen, vorwerfen. ... *Tasten*: abtasten, Tastatur ...

Schließlich erlangte die Hand auch Möglichkeiten für „künstlerische“ Aussagen. Relativ einfach geschieht das noch beim Schattentheater entsprechend (a) bis (c). Weitaus mehr ist für eine künstlerische Aussage von Musik, z. B. beim Klavier- oder Geigenspiel notwendig. Hierfür muss der Künstler täglich mehrere Stunden üben und mühsam ein Gefühl für die gewünschte Interpretation erwerben. Details und Beispiele in [Opi21].

Bezüglich der Evolution der Hand, kann auch die vorgeburtliche Entwicklung (Ontogenese s. S. 3) einige zusätzliche Hinweise geben. Eine übliche Schwangerschaft dauert 266 Tage. In der 6. Woche sind Kopf, Rumpf und Ansätze der Gliedmaßen zu erkennen. Zwei Wochen später beginnen sich Mund, Nase, Augen und die Sinnesorgane zu entwickeln. Aber bereits im „Alter“ von nur etwa 52 Tagen ist die Besonderheit der Hand gegenüber den Füßen deutlich zu erkennen (**Bild 49**). In der 9. bis 10. Woche sind an den Händen schon klar die Finger zu erkennen. In der 11.-12. Woche kann das Fötus sogar schon eine Faust machen.

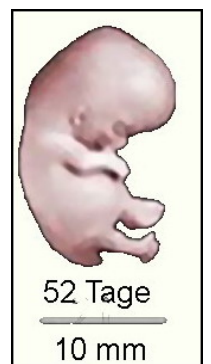


Bild 49. Aussehen eines Fötus von 52 Tagen

Schließlich erfasst Bild 50 auch noch einen Vergleich der im Gehirn erforderlichen Neuronenflächen und hebt so besonders deutlich die große Bedeutung der Hand hervor. Stark zusammengefasst demonstriert dabei ist c) ein umgerechnetes „Männlein“ gemäß dem jeweils vorhandenem Aufwand beim Wahrnehmen. Die unmittelbare Wahrnehmung und Steuerung der Körperoberfläche betreffen die Area 1 bis 4 in b), (violett und rosa b). Welche „wirksamen Flächen dafür erforderlich sind zeigt dann d) für motorische Aktivitäten und e) für die sensorischen Wahrnehmungen. Als linke Gehirnoberfläche zeigt a) und als Mittelschnitt c) weitere Aktivitäten für das Sehen und Hören in zunehmender Intensität von gelb nach rot bzw. von hell- nach dunkelgrün. Das für die Feinmotorik zuständige Kleinhirn ist in a) zusätzlich dunkelviolet dargestellt.

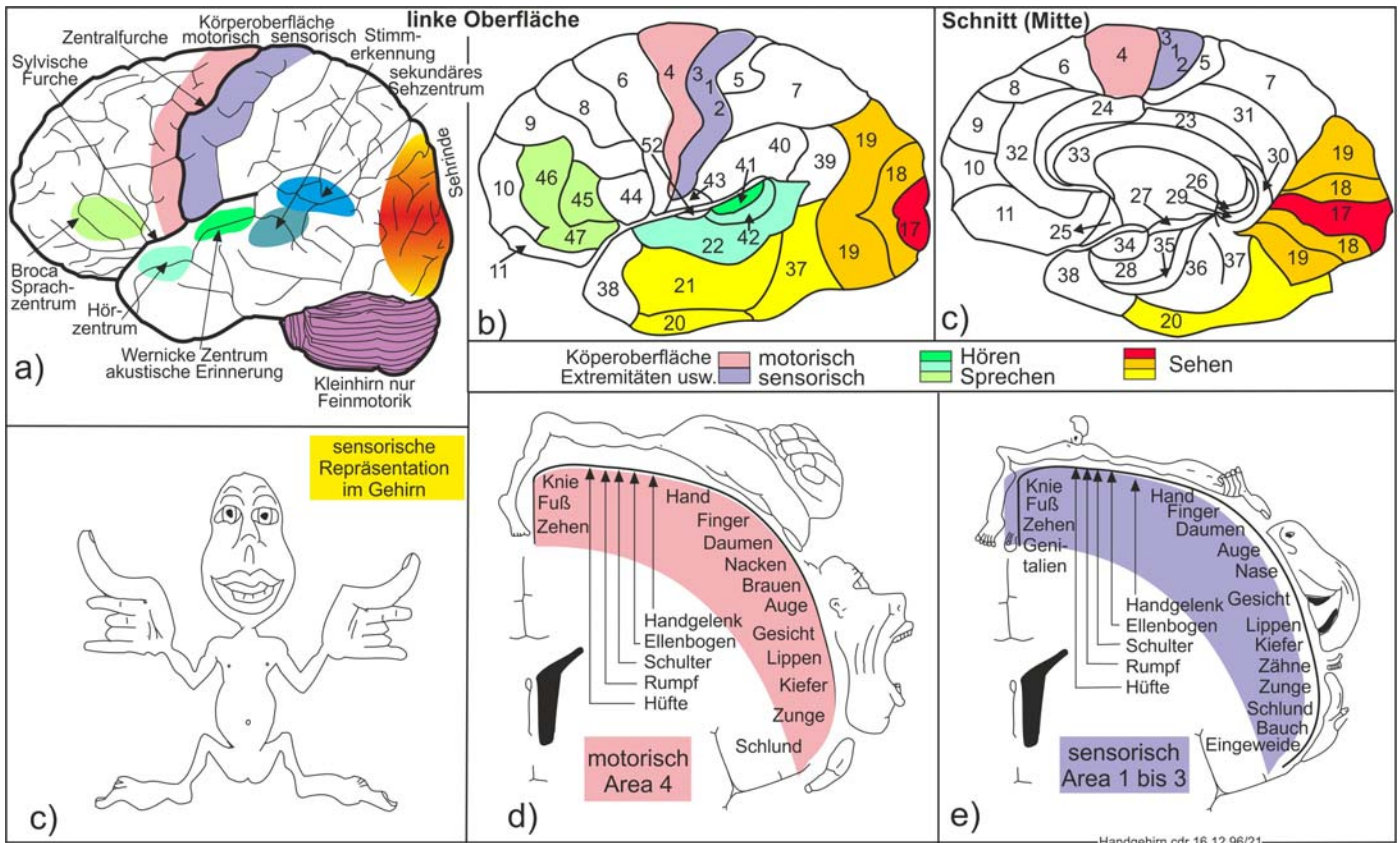


Bild 50. Das Gehirn und die dazugehörigen Flächen für Motorik und Sensorik.

4.2. Entwicklung zum Denken

Selbst sehr einfache Lebewesen reagieren meist zweckmäßig. Mit der Evolution entstehen dabei Taxis und Reflex (**Bild 51**). Später bildet sich so etwas wie ein Instinkt aus. Fast alle so getroffenen Entscheidungen sind genetisch fixiert. Später wird es möglich, einiges vom Geschehen der Realität zu berücksichtigen. Erst etwa ab den Reptilien kommt dafür ein lernfähiges neuronales Gedächtnis hinzu, das auch Lernen ermöglicht.

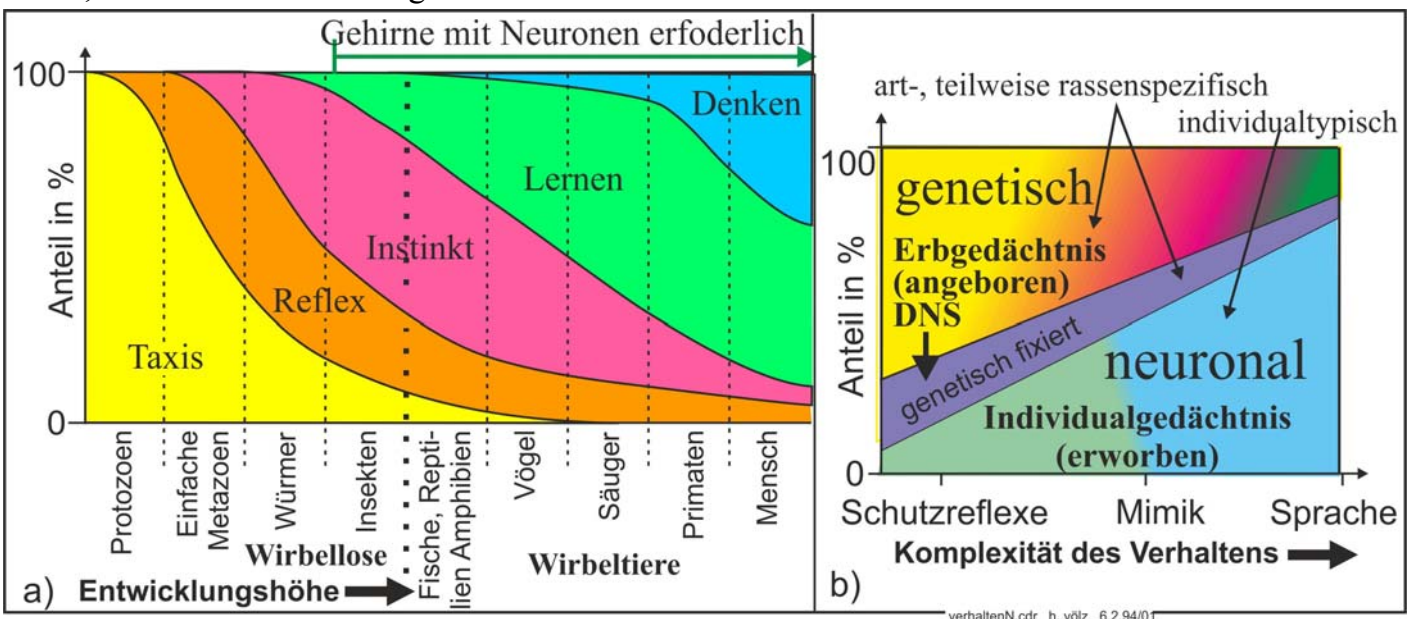


Bild 51. Entwicklung der Möglichkeiten des Verhaltens.

Durch Beobachtungen, Handlungen usw. kann schrittweise im Gedächtnis ein der Realität ähnliches Modell erzeugt und gespeichert werden. Auf dessen Grundlage können dann erdachte Handlungsmöglichkeiten mit jenen in der Realität möglichen verglichen werden. Dabei sind die besten

Varianten zu suchen, wobei die dazugehörenden Emotionen entstehen (**Bild 52**). Das ermöglicht Hinweise auf die Qualität der betrachteten Varianten. Derartige Abläufe entsprechen ganz grob einem Denken bezüglich der Entscheidungen, also typischem Problemlösen.

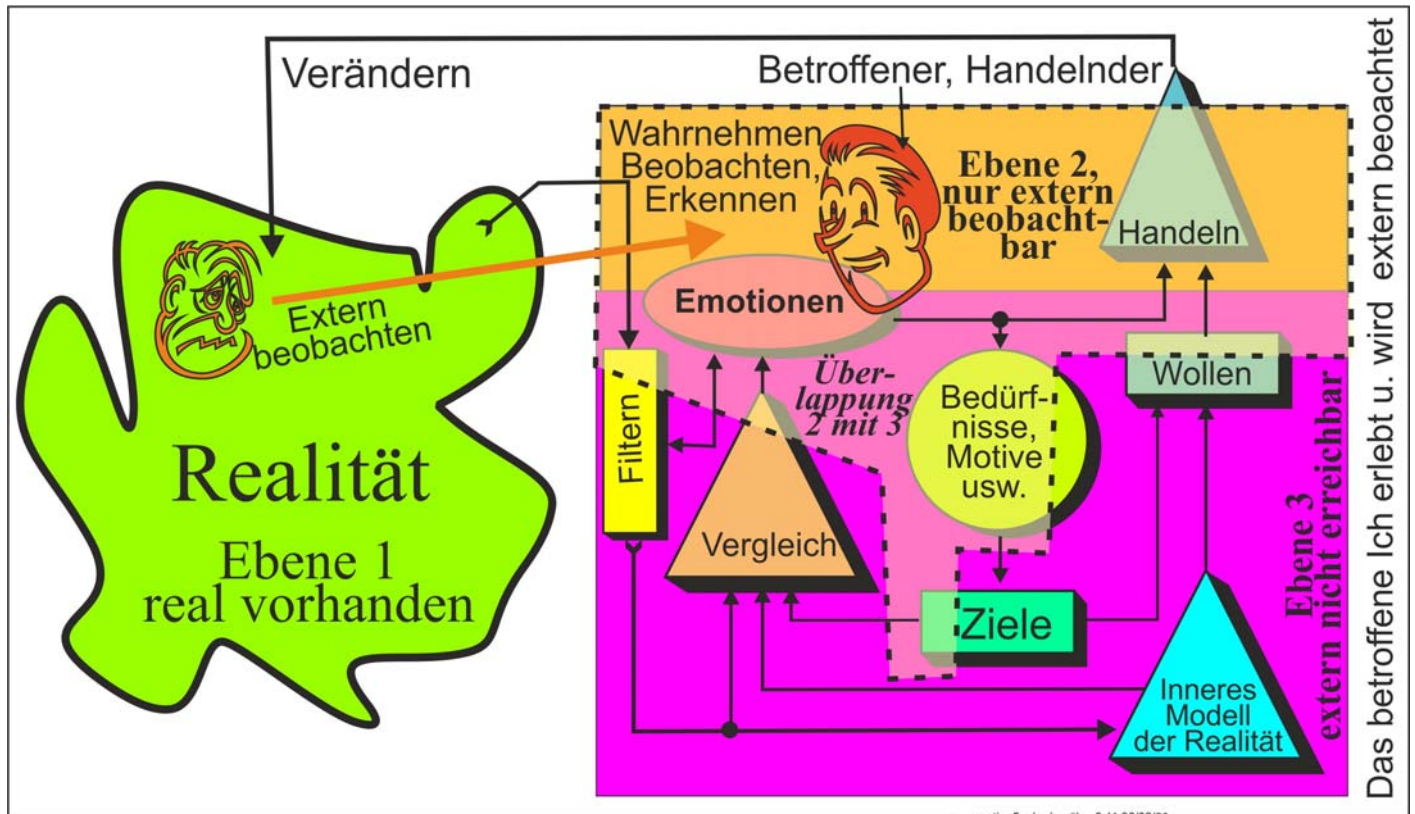


Bild 52. Modell für die Zusammenhänge bei Emotionen.

Im Modell sind drei Ebenen zu unterscheiden [Völ76]:

- Die Ebene 1 entspricht der Realität und ist im Prinzip voll erkennbar. In ihr gibt es auch den Beobachter, der das handelnde und betroffene Lebewesen beobachtet.
- In der Ebene 2 befindet sich hauptsächlich das betroffene Wesen. Es beobachtet die Realität, handelt in ihr und erlebt teilweise die Emotionen beim Quasidenken.
- Die Ebene 3 ist weder extern noch vom betroffenen Wesen einsehbar, erzeugt aber die Emotionen. In ihr werden die Prozesse und Systeme der Vorgänge bewirkt und erfasst.

Zusätzlich überschneiden sich die 2. und 3. Ebene und bilden so den gemeinsamen rötlich unterlegten Bereich, der zwischen ihnen vermittelt. Der Übergang zu einem bewussten Denken erfolgt erst dann, wenn die Prozesse für den Betroffenen weitgehend bewusst erlebt werden. Das erfordert ein beachtlich hoch entwickeltes Bewusstsein, was nach heutiger Kenntnis wohl nur beim Menschen vorhanden ist. Dafür ist nämlich mehr als nur ein Ich-Erkennen im Spiegel erforderlich. Dennoch verlangt es keine verbale Sprache, denn die Prozesse können auch mittels Bildern, Gesten, Schall usw. und sogar rein gedanklich verfolgt werden.

4.3. Die verbale Sprache entsteht und Vergleich mit averbalen Varianten

Gute Belege für die Entstehung von Sprache folgen aus der Kommunikation zwischen Individuen. Sie kommt zwar schon ab den Insekten vor. Jedoch die entscheidende Entwicklung geschieht erst bei den Gruppen von Primaten. Ihre wesentliche Kommunikation ist vor allem durch das Grooming als gegenseitige Fellpflege bestimmt. Durch sie werden u. a. die Rangordnung und das gegenseitige Kennen bestimmt. Im Mittel verwenden sie hierfür höchstens 20% ihrer Zeit. Die andere wird für viele weitere Aktivitäten, wie das Verhalten gegenüber anderen Arten und die Nahrungssuche genutzt. So können sich maximal fünfzig Tiere ausreichend gut kennen lernen. Daher beträgt auch

die typische Gruppengröße bei Pavianen 50 oder bei Nasenaffen 14 (**Bild 53a**). Unabhängig hiervon gilt, je umfangreicher eine Gruppe ist, desto größer ist ihre Gesamtleistung. Für die Frühmenschen beträgt die nachgewiesene typische Klan- bzw. Dorfgröße etwa 150 Mitglieder. Für ihren Zusammenhalt würde Grooming nie ausreichen, denn dazu müsste etwa 40 % aller verfügbaren Zeit aufgewendet werden. Jedoch mit einem akustischen Austausch durch Schreie, Rufe, Knurren usw. ergeben sich für die Individuen infolge der räumlich weit reichenden Parallelität völlig neue Möglichkeiten, aber auch vielfältige Nebentätigkeiten. Diese Aussage lässt sich gut mit dem Neokortex-index (Volumenverhältnis vom Neokortex zum restlichen Gehirn) belegen. Er übertraf dabei erstmals den Wert vier (b roter Punkt). Hiermit kann der noch averbale Sprachbeginn vor reichlich 100 000 Jahren begonnen haben. Das sich gegenseitige Kennenlernen usw. führte aber ähnlich dem Grooming recht bald zu einem quasi Smalltalk. Natürlich war dabei zunächst nur die „Sprache“ mit Händen, Gesicht und Körper beteiligt. [Völ03].

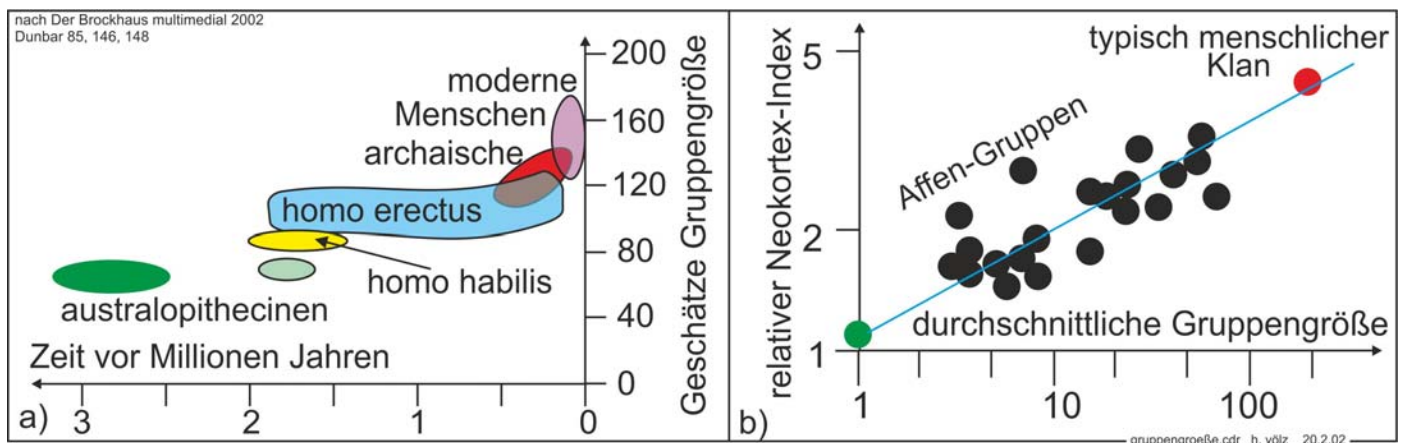


Bild 53. Zur möglichen Gruppengröße, der Menschwerdung und Entstehen der Sprache.

Im Sinne der Semantik (s. S. 7f. und Bild 7+8) sind für eine wirksame Sprache akustische Zeichen notwendig, welche als **Wörter** auf Anderes und dessen Bedeutungen hinweisen oder als Begriffe auftreten. Jedes Wort ist dabei sowohl akustisch – als auch später orthografisch – eine selbstständige Einheit, für die es jedoch keine allgemein akzeptierte Definition gibt. Die akustischen Signale für die Wörter müssen vom Menschen erstens gut unterscheidbar erzeugt werden. Dazu mussten sich die Stimmbänder und der Rachenraum deutlich weiterentwickeln. Die Signale können dann in mittleren Entfernungen wahrgenommen, gut erkannt und richtig interpretiert werden. Hier sei noch erwähnt, dass es sogar sinnlose Wörter gibt. Genauso verwendet Kurt **Tucholsky** (1890 - 1935) in einer kleinen Satire „repunsieren.“

Wörter bestehen aus Silben und Phonemen (Selbst- und Mitlaute) und später bei der Schrift aus Buchstaben. Jedoch in jeder (natürlichen) Sprache kommen nicht alle Möglichkeiten vor. So kennen z. B. die Japaner nicht „r“ und sprechen und benutzen so anstelle von „read“ meist „lead“. Die in einer Sprache vorhandenen oder häufig benutzten Wörter werden in einem Lexikon zusammengefasst und häufig auch bezüglich ihrer Anwendung, Grammatik, Bedeutung usw. erklärt.

Die **Bedeutung** der Wörter entspricht einen Verweis, z. B. auf ein Objekt, auf dessen Eigenschaft, seinem Ort, seiner Beziehung zu anderen, seine Verwendung usw. Sie kann auch einem Geschehen entsprechen. Leider ist jedoch dieser Zusammenhang oft nicht hinreichend genau festgelegt. Weiter kann sie sich durch den Gesamtkontext oder im Laufe der Zeit ändern. Meist besteht daher zwischen dem Klangbild und dem Verweis kein Zusammenhag. Fast immer ist er im Laufe der Sprachgeschichte sogar zufällig entstanden. Lediglich bei den Wörtern Kuckuck, Uhu, Kuh (muh), Eule (heulen) und Brummer (dicke Fliege) ist er gerade noch zu ahnen. Noch immer ist es sogar fraglich, ob zumindest für Allgemeinbegriffe reale Urbilder existieren.

Das Zeichen kann auch für einen **Begriff** stehen. Er ist zudem die älteste und häufig sehr mehrdeutige Kennzeichnung. Er geht offensichtlich auf das „Be-greifen“ zurück. Zuweilen wird er synonym mit Bedeutung benutzt. Besonders wichtig ist er beim Denken. Umgangssprachlich entspricht

etwa „einen Begriff von etwas haben“ seiner Bedeutung, dessen Wesen zu kennen und ihn von anderem unterscheiden zu können. Mittels einer Begriffsbestimmung wird dieser Zusammenhang gewöhnlich durch eine (logische) Operation hergestellt. Oft wird dabei festgelegt, welche Objekte, Ereignisse usw. zum Begriff gehören bzw. welche ausgeschlossen werden. Wie bei einer Definition können dazu u. a. wesentliche, typische Eigenschaften herangezogen werden. Entsprechende Verfahren und Methoden sind Klassifizieren, Clustern, Verallgemeinern, Vergleichen, logisches Entscheiden und metrische Werte. Da es eine sehr große Begriffsvielfalt gibt, werden häufig Art- und Gattungsbegriffe, Individual- und Allgemeinbegriffe, konkrete und abstrakte Begriffe sowie hierarchische Abstufungen unterschieden. Trotz der sehr vielen Möglichkeiten kann aber die übliche Sprache nicht alles grenzenlos ausdrücken. Zuweilen müssen zusätzliche Möglichkeiten hinzugenommen werden (s. u.).

Deshalb sei erwähnt, dass für inhaltliches Wahrnehmen im Prinzip auch *seh-*, *riech-* oder *schmeckbare* Zeichen möglich sind. Aber für ihre vielfältige und schnelle Erzeugung besitzt der Mensch nur sehr unzureichende Möglichkeiten. Bei anderen Lebewesen jedoch, wie fliegenden Insekten wird z. B. auch Riechen benutzt, etwa ein recht spezieller Duft für die Paarung. In einigen Sonderfällen benutzt auch der Mensch neben der Sprache unmittelbar andere Signale, wie etwa Licht, z. B. Feuer, Fahnen usw., Trommeln für größere Entfernungen sowie Klopfzeichen im Gefängnis. Doch insgesamt ist die akustische Sprache die vorteilhafteste Möglichkeit.

In Analogie zur Struktur der natürlichen (verbalen) Sprachen sind auch viele ähnlich gestaltete „künstliche“ Sprachen entstanden. So ergibt sich etwa die folgende Zusammenstellung

Sprachtyp	Grundelemente	Regeln	Ergebnisse	Beispiele
natürlich (verbal)	Wörter, Lexikon	Grammatik, Kontext	sinnvolle Sätze	Literatur
avermal	Formeln, Symbole, Noten, Bilder, Ges- ten, Mimik, Laute, Lachen, Weinen	recht unterschied- lich und manch- mal nur teilweise bekannt	Aussagen recht unter- schiedlicher Art	Mathematik, Chemie, Musik, Kommunikation
Program- mierung	Befehle, reservierte Wörter, Vereinba- rungen, Sprünge. Entscheidungen	Syntax (Semantik, Pragmatik)	lauffähige Programme	C, BASIC, COBOL, LISP, Fortran, Prolog usw.
formal	Elemente, Zeichen eines „Alphabets“	Regeln	gültige Wörter	Chomsky, Semi- Thue, Lindenmayer

In speziellen Sprachen werden als Basiselemente u. a. Schrift (auch Kurzschrift), Gebärden, Gesten, Symbole, Bilder, Musik, Formeln, Gedanken, Düfte usw. verwendet. Außerdem gibt es Geheim-, Welt- (etwa Esperanto), Traum- und Tiersprachen. Wohl als erster sagte daher **Galileo Galilei** (1564 – 1642) sehr prägnant: „*Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.*“

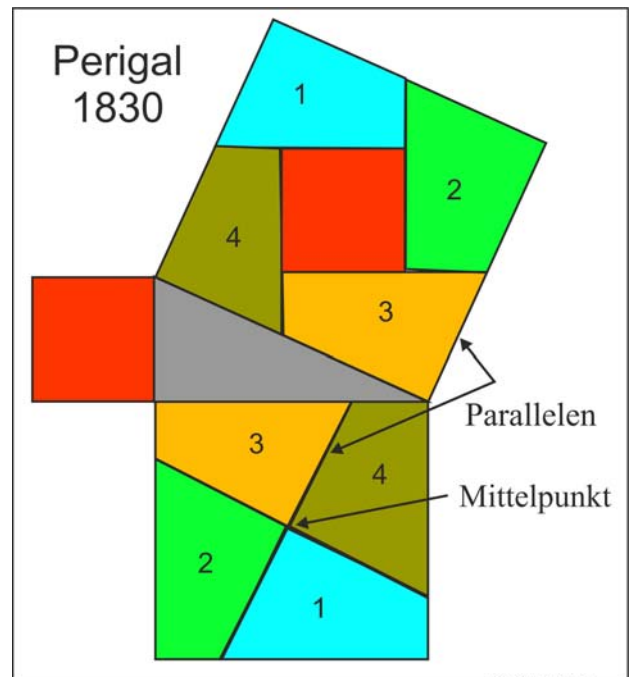
Ein umfangreiches, fast ohne natürliche Sprache verlaufendes Geschehen beschreibt recht ausführlich Stefan Zweig (1881 - 1942) in seiner Schachnovelle von 1941. Einfacher erlebt es jeder Schachmeister beim Simultanschach, wenn er von Brett zu Brett geht und dann schnell an jedem Brett seinen meist vorteilhaften Zug ausführt. In [Zem88] beschreibt Heinz **Zemanek** (1920 – 2014), dass es häufig viel wirksamer ist zu sagen und zu zeigen: „*Schau her, so funktioniert das*“, als die Zusammenhänge im Handbuch nachzulesen. Eine kleine Skizze oder ein Vormachen leisten meist deutlich mehr als jede noch so schöne Formel oder jeder noch so übersichtliche Algorithmus. Für Problemlösungen belegt das Johannes Müller (1921 – 2008) mittelbar in [Mül90]. In diesem Sinne beklagte sich auch Grace Murray **Hopper**³⁶ (1906 - 1992), darüber, dass ihre Dissertation offensichtlich deswegen unbeachtet blieb, weil sie bildliche Aussagen enthielt.

³⁶ Sie hat COBOL entwickelt, fand den ersten Bug bei J. v. Neumann und war hohe amerikanische Marineoffizierin.

In Griechenland und noch lange danach waren Arithmetik und Geometrie zwei streng getrennte und sich hervorragend ergänzende Wissenschaftsrichtungen. Eine Änderung trat erst 1637 durch das Buch „La géométrie“ von René **Descartes** (Cartesius, 1596 - 1650) ein. Ab hier wird die gesamte klassische Geometrie schlagartig durch analytische Formeln behandelbar. Dadurch wird der mathematische Denkstil deutlich verändert. Zunächst werden keine Bilder mehr benötigt, und bald werden sie für unbrauchbar erklärt, denn mit ihnen ist keine eindeutige Ableitung in logischen Einzelschritten möglich.

Dieser Unterschied von Bild und Sprache wurde ab dem 19. Jh. bei einigen Mathematikbüchern recht deutlich. So gab es Autoren, die stolz erklärten, dass im ganzen Buch kein Bild notwendig gewesen sei und es somit höchsten formalen Ansprüchen genüge. Auf dem Mathematikerkongress 1900 forderte dann David **Hilbert** (1862 - 1943) die vollständige Axiomatisierung der Mathematik: Es sollten künftig nur logische Beweise gültig sein. Dieser Weg stellt sich aber spätestens 1931 durch die Dissertation von Kurt **Gödel** (1906 - 1978) als undurchführbar heraus. Umgekehrt ist aber viel zu wenig bekannt, dass der Amateurmathematiker **Perigal** 1830 einen allgemeinen, graphischen Beweis für den Satz des Pythagoras fand und ihn auf seiner Visitenkarte mit sich führte. Mittels **Bild 54** ist er auch ohne weitere Erklärungen nachvollziehbar. Ab etwa 1960 trägt dann die Computertechnik dazu bei, dass wieder verstärkt Aussagen ohne Bilder benutzt werden. Dennoch wurde die graphische Bildschirmausgabe um 1980 zum Standard.

Bild 54. Bild-Beweis für den Satz des Pythagoras



Sehr früh war es bereits üblich, **Geschäftsgrafiken** zur Veranschaulichung von Daten, Zusammenhängen und Trends zu benutzen. Doch erst in den 1970er Jahren wurde die Möglichkeit der Unterstützung von theoretischen Zusammenhängen durch bildliche Darstellung großer Datenmengen erkannt. Das führte schließlich zur **Infografik**. Hierzu erklärte u. a. die Frankfurter Allgemeine am 23.10.93, wie die Umsetzung der Zahl zum Bild bewusst negativ im Nahostkrieg missbraucht wird, wobei ganze Bataillone von Grafikern nur zu diesem einen Zweck beschäftigt wurden. Solch ein grafisches Bild erlaubt nämlich eine Zusammenschau, ist nicht dialogisch und diskursiv, sondern ist rein „sachlich“ und ein Appell. Man kann ihr nicht widersprechen. Zahlen sind dabei in einen Pfeil umgewandelt. Dessen Zweck ist es, die Zusammenhänge mit einem Blick überschaubar zu machen, ohne dass man sich dabei über Details Rechenschaft ablegt. Die Bilder sagen aber, was sie sagen sollen. So wird unmittelbar ihre **Macht** verdeutlicht.

4.4. Von der Sprache zu Schrift und Zahlen

Die verbale Sprache existiert nur solange wie ihr Schall zu hören ist, also in der aktuellen Gegenwart. Dieser Nachteil wird besonders deutlich im Vergleich zu Bildern. Da mit der Sprache auch das Zählen entstand macht sich das sehr nachteilig bemerkbar, vor allen beim Lagern von Nahrungsmitteln, Gütern usw. so entstanden zunächst einfache Gebilde aus gebranntem Ton oder Steinen, die **tokens**, ins besondere für Zahlen und zur Bezeichnung bestimmter Güter. Einige typische Beispiele zeigt **Bild 55**. Bei mehr komplexen tokens existieren Löcher, durch die sie aufgefädelt wurden. Ab etwa 3 500 v. Chr. wurden sie mit den Gütern in danach verschlossene Lehmbehälter gelegt, die anschließend verschlossen wurden. Eine entscheidende anschließende Weiterentwicklung schuf die hohle, eiförmige Tafel (d), den neuen Rosettestein von $46 \times 62 \times 50 \text{ mm}^3$ aus

dem 2. Jt. v. Chr. Er wurde in Nuzi (nördlicher Irak) gefunden wurde. Die auf ihr befindlichen tokens sagen aus:

21 Mutterschafe; 6 weibliche Lämmer; 8 ausgewachsene Schafböcke; 4 Schafböcke; 6 Mutterziegen; die Zicklein; 1 Ziegenbock; 3 Jungziegen und darunter das Siegel des Hirten von Ziqarru.

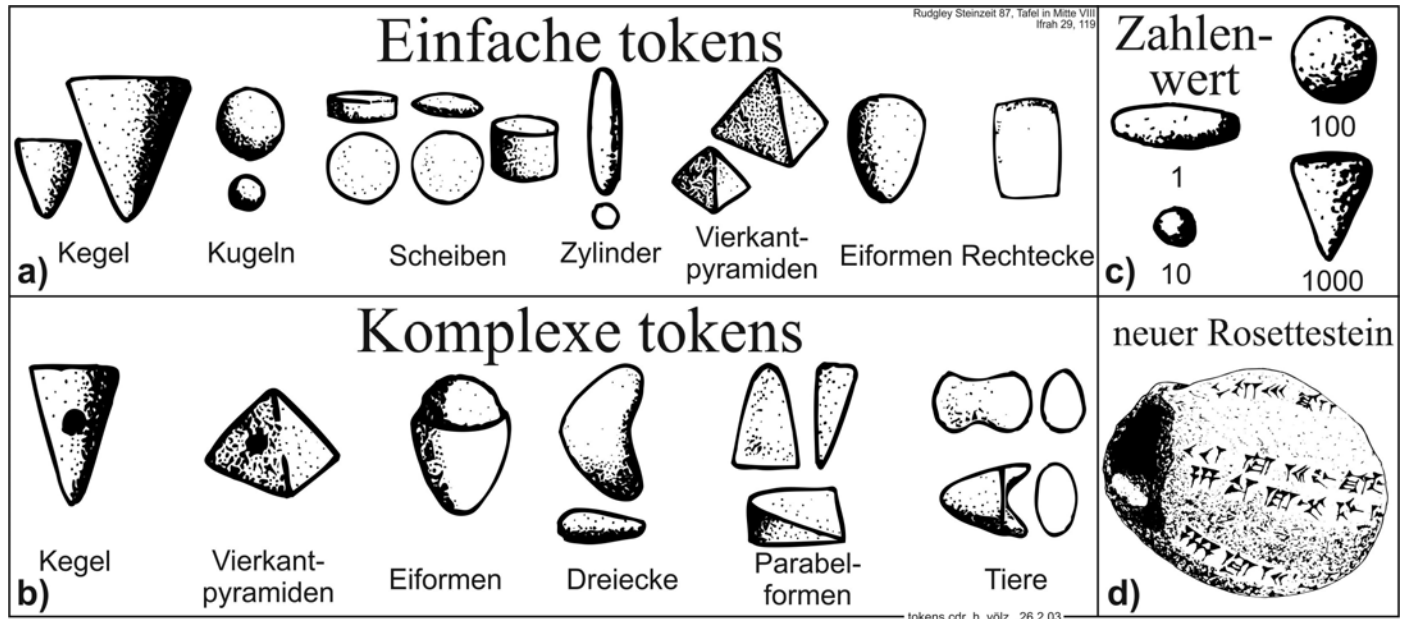


Bild 55. Beispiele für tokens.

Die sich daran anschließende Sprachentwicklung ist zwar äußerst komplex und vielgestaltig und erfolgte jedoch in relativ kurzer Zeit besonders im Vergleich zur Sprache, aber noch viel mehr bezüglich der bei den Zahlen. Das ist deutlich aus den in **Bild 56** zusammengefassten Verläufen zu erkennen. Auffällig ist weiter, dass die Höhlenzeichnungen quasi im Mittelfeld vor etwa 30 000 Jahren entstanden. Daher ist es wiederum sehr erstaunlich, wie viel unterschiedliche und immer wieder Sprachen neu entstanden und auch verloren gingen. Doch letztlich bleiben nur die mitteleuropäischen (lateinische), kyrillischen und fernöstlichen Schriften übrig (**Bild 57**).

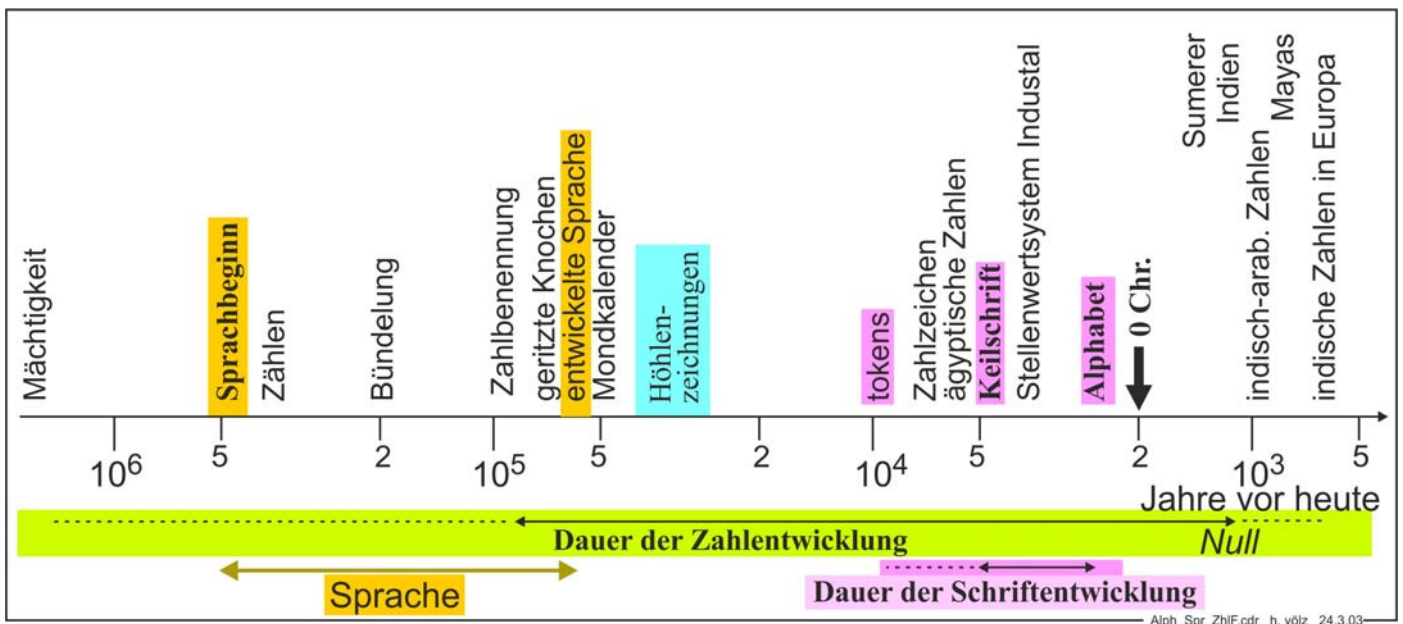
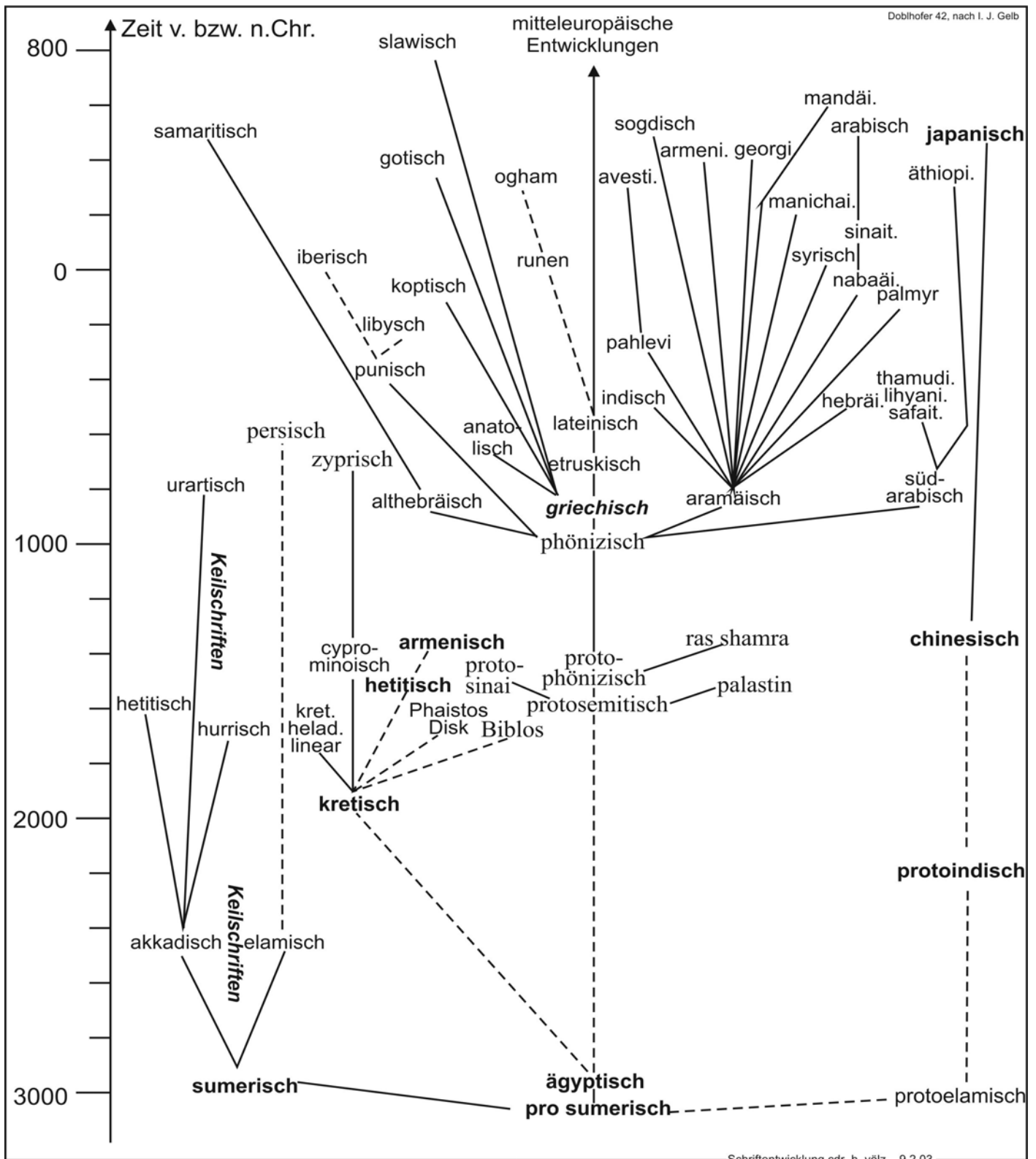


Bild 56. (oben) Ablauf der geschichtlichen Entwicklung von Sprache, Schrift und Zahlen.



Schriftentwicklung.cdr h. völk. 9.2.03

Bild 57. Zusammenhang der vielen entstandenen und weitgehend wieder verschwundenen Schriften.

4.5. Vergleich von Sprache, Schrift und Denken

Bereits Sokrates hielt wenig von der Schrift und benutzte sie daher nicht. Dazu meinte Cicero, dass er so die Differenz von Geist und Herz (Zunge, Schallsprache) deutlich machen wollte. Daher unterschied er deutlich die Gelehrsamkeit für gerechtes Leben vom guten, richtigen Leben. Mit der schriftlichen Aufzeichnung gehen die in der Sprache mitschwingenden Betonungen, Geschwindigkeiten, Tonhöhen, Artikulationen, Pausen und der emotionale und bewertende Ausdruck als averbale Sprachteile verloren. So gibt es sehr viele Möglichkeiten. Ja zu sagen, darunter auch solche, die Nein bedeuten. Noch größere Freiheit besitzt die Sprache in der Lyrik. Der Übergang zwischen den

beiden Varianten erfolgte mit Platon, der daher auch der Schreiber des Wissens von Sokrates war. Recht bedeutsam sind hierzu u. a. die Aussagen von McLuhan [Luh68]. Er definierte das alphabetische Zeitalter mit der Einführung des Schriftalphabets und unterschied dann zwei typische Gesellschaften:

- die **orale**. Hier gibt es keine individualisierten Menschen. Sie gehören alle zu einer großen Gruppe. Als Ausgleich für die individuelle Entwicklung hat der Einzelne eine große Freiheit im Gefühlsleben. Denken, Sprechen, Handeln und Erleben eimd trotzdem eine Einheit. Es gilt vorwiegend „das Hier und Jetzt“. Diese Welt nennt er heiß und ist durch den Mund und das Ohr bestimmt. Das Gesprochene ist immer nur aktuell vorhanden. Als Beispiel führt McLuhan afrikanische Stämme an. Nur in gewissem Umfang gehören aber immer noch Indien, China und Japan dazu.
- die **visuelle**. Von Kindheit an wird der Mensch hier auf die Relation von Ursache und Wirkung hin erzogen. Es regieren der Sachzwang und das rationale Denken. Das, was gesagt wird, muss nicht gültig sein. Das Schriftstück ist entscheidend, denn es allein besteht über die aktuelle Zeit hinaus. Hier gilt: „Sehen heißt glauben“. Sie ist vorrangig durch das Auge bestimmt und daher verhältnismäßig kühl.

Bereits damals vermutete McLuhan, dass eventuell das begonnene elektronische Zeitalter über die audiovisuellen Medien zu einer Einheit auf höherer Ebene führen könnte. Vieles spricht aber bereits seit längerem dagegen. Eher kommt eine weitere Variante hinzu, die durch Anklicken auf dem Handy oder Rechner bestimmt ist und durch die man bestenfalls noch weiß, wo etwas zu finden ist.

Damit lässt sich in Ergänzung zu oben das **Denken** genauer definieren. Es erfolgt im Gehirn und ist neuronal und physiologisch bestimmt. Es wird deutlich von der Wahrnehmung und Intuition unterschieden. Das Hauptziel ist Problemlösen. Analog zur Einteilung von McLuham gibt es sowohl ähnlich wie beim Sprechen das stumme Denken mit Wörtern und Begriffen als auch das betont bildliche, welches vorwiegend wie ein Stummfilm abläuft. Daher können analoges und analytisches Denken auftreten. Analoges findet assoziativ und oft spontan statt. Es erfolgt teilweise auch im Traum und Halbschlaf (s. Kreativität). Daher kann neben dem bewussten, absichtlichen, kontrollierten Denken auch unbewusstes, absichtsloses, automatisches und unwillkürliches Denken erfolgen. Vielfach werden dabei aber abschließend die Ergebnisse bewusst. Der Anteil der verschiedenen Denkformen ist bei den einzelnen Menschen recht unterschiedlich ausgeprägt und hängt auch von der Kultur ab. Zum Denken gehören auch die Gedanken und das Erdachte.

5. Kognition: Bewusstsein, Wissen usw.

Der Begriff Kognition³⁷ umfasst alle individuellen Vorgänge des Wahrnehmens, Erkennens sowie ihrer gedanklichen Betrachtungen und Analysen. Dazu gehören daher Vorstellung, Beurteilung, Gedächtnis, Erinnerung, Wissen, Lernen und Denken. Oft wird der Begriff auch im Gegensatz zur Emotion (vgl. Bild 52), also dem zweiten Pol der menschlichen Psyche, verwendet, der vor allem die unkontrollierten, nicht gedanklich fassbaren Anteile der Psyche umfasst.

Ein besonders wichtiger Teil der Kognition ist das **Bewusstsein**, das vorrangig unser Erleben mentaler (geistig vorgestellter) Zustände und Prozesse betrifft. Ursprünglich wurde es ähnlich dem Gewissen benutzt. Infolge des vielfältigen Gebrauchs mit verschiedenen Bedeutungen ist jedoch kaum eine allgemein gültige Definition möglich. Sein Inhalt wurde von Christian Wolff gemäß dem lateinischen *conscientia*³⁸ geprägt. Allgemeiner benutzte es dann René *Descartes*. Häufig wird es für den gemeinsamen Bereich von „Geist“ und „Seele“ verwendet. Das Bewusstsein sorgt dafür, dass wir überhaupt etwas wahrnehmen, also nicht bewusstlos sind. Es ermöglicht auch, dass wir

³⁷ Lateinisch das Kennenlernen, Erkennen

³⁸ Lateinisch *conscientia* Mitwissen, Altgriech. Miterscheinung, Mitbild, Mitwissen; *synaisthesis* Mitwahrnehmung, Mitempfindung und *phrónesis* von *phroneîn* bei Sinnen sein, denken; mittelhochdeutsch bewissen im Sinne von Wissen über etwas habend

etwas bewusst (absichtlich) wahrnehmen oder tun, oft ohne darüber nachzudenken. Ferner entspricht es „belebt-sein“ oder „beseelt-sein“. Damit besteht ein Gegensatz zum Schlaf. Es ermöglicht auch die Kontrolle über unsere Gedanken und enger betrifft es unser Selbstbewusstsein, also die Gewissheit eines „Ichs“, das immer mit sich selbst identisch ist. Dabei entsteht die Überzeugung „Ich bin!“, s. Anfangszitat von Descartes. Noch immer ist ungeklärt, wie es zustande kommt. Umstritten ist sogar, ob es überhaupt prinzipiell erforscht werden kann. Eine hierfür typische Analyse ist „das Chinesische Zimmer“ [Chu90], [Sea90]. In ihm sitzt völlig abgeschirmt jemand, der kein Chinesisch versteht, aber mit formalen Tabellen chinesische Fragen auf Chinesisch beantwortet. Von außen betrachtet, wird so der Eindruck erweckt, als ob das Chinesische Zimmer Chinesisch verstünde. Ein mögliches Gegenargument betrifft den Umschlag von Quantität in Qualität: Jemand sitzt in einem dunklen Zimmer und bewegt einen Magneten. Das dabei entstehende elektromagnetische Feld ruft für den Menschen zunächst keine wesentliche Wirkung hervor. Wenn aber der Magnet – unabhängig von der technisch möglichen Realisierung – immer schneller bewegt wird, dann tritt irgendwann der Fall ein, dass die elektromagnetischen Wellen zu Licht werden und das Zimmer erhellen. Ähnliche Effekte erwarten die Vertreter der harten Künstlichen Intelligenz auch bei anderen technischen Varianten. Zur Erweiterung wurde auch noch die Chinesische Turnhalle eingeführt, in der viele Menschen parallel Chinesisch genauso formal „übersetzen“. Doch es lässt sich auch dann zeigen, dass alle zusammen kein Chinesisch verstehen. Die wahrscheinlich funktionelle Wirkungsweise des Bewusstseins zeigt Bild 28a und auf den Seite 4 bis 5 ist dann kurz darauf eingegangen, wieweit Ähnliches auch bei einigen Tieren auftreten kann

5.1. Wissen

Ein wichtige Unterbegriff von Kognition ist **Wissen**. Das recht alte Wort leitet sich vom Althochdeutschen *wizzan* ab und bedeutete etwa *gesehen habend*, später auch *etwas kennen*. In anderen Sprachen werden immer anders herzuleitende und vielfach sogar mehrere spezialisierte Begriffe für Wissen verwendet, im Englischen vor allem *knowledge* und *to know*. Das hat zur Folge, dass für Wissen häufig fälschlich Information benutzt wird (s. Abschnitt ###). Da jedoch Bücher, Bilder, Filme usw. selbst nichts wissen können, betrifft Wissen immer nur einen oder viele Menschen. Sie haben es als Kenntnisse in ihrem Gedächtnis gespeichert. Beispiele für den Inhalt von Wissen sind Fakten, Objekteigenschaften, Verhalten, Formeln, Gesetze, Theorien usw. Der in Büchern festgehaltene (gespeicherte) Inhalt muss erst von Menschen wahrgenommen (gelesen, gesehen) und interpretiert werden, bevor er im Gedächtnis zu Wissen werden kann. Deutlich einfacher ist der Wissensaustausch zwischen Menschen mittels Kommunikation. Schließlich können auch eigene Gedanken usw. zum Wissen gehören und sogar Neues erzeugen. Vorhandenes Wissen kann fast immer leicht angewendet und anderen vermittelt werden. Infolge der genannten Zusammenhänge wird Wissen hauptsächlich in der Physiologie gründlich untersucht, z. B. [Kli93]. Das im Gedächtnis gespeicherte Wissen kann recht unterschiedliche Eigenschaften und inhaltliche Bezüge besitzen. Zunächst werden dabei zwei Hauptgruppen gemäß der folgenden Tabelle unterschieden.

deklaratives	nicht-deklaratives
Explizit, relational, enzyklopädisch	Implizit (Zusammenhänge)
„Wissen was oder dass“, Fakten, Datenbank, Lexikon, Denken, Kognition	„Wissen wie“: Regeln, Abläufe, Prozesse, Fertigkeiten, Behaviorismus, Verhalten
Unterbegriffe: <i>semantisch</i> ³⁹ oder <i>episodisch</i>	Unterbegriffe: <i>prozedural</i> ⁴⁰ oder <i>priming</i>
Meist verbalisierbar, schnell, flexibel, verbunden mit bewusster Erinnerung, kann blockiert werden	Kaum verbalisierbar, langsam, unflexibel, meist unbewusst ausgeführt, wirken direkt, sind immer zugänglich
Durch Hirnschäden meist stark beeinträchtigt	Durch Hirnschäden weniger beeinträchtigt

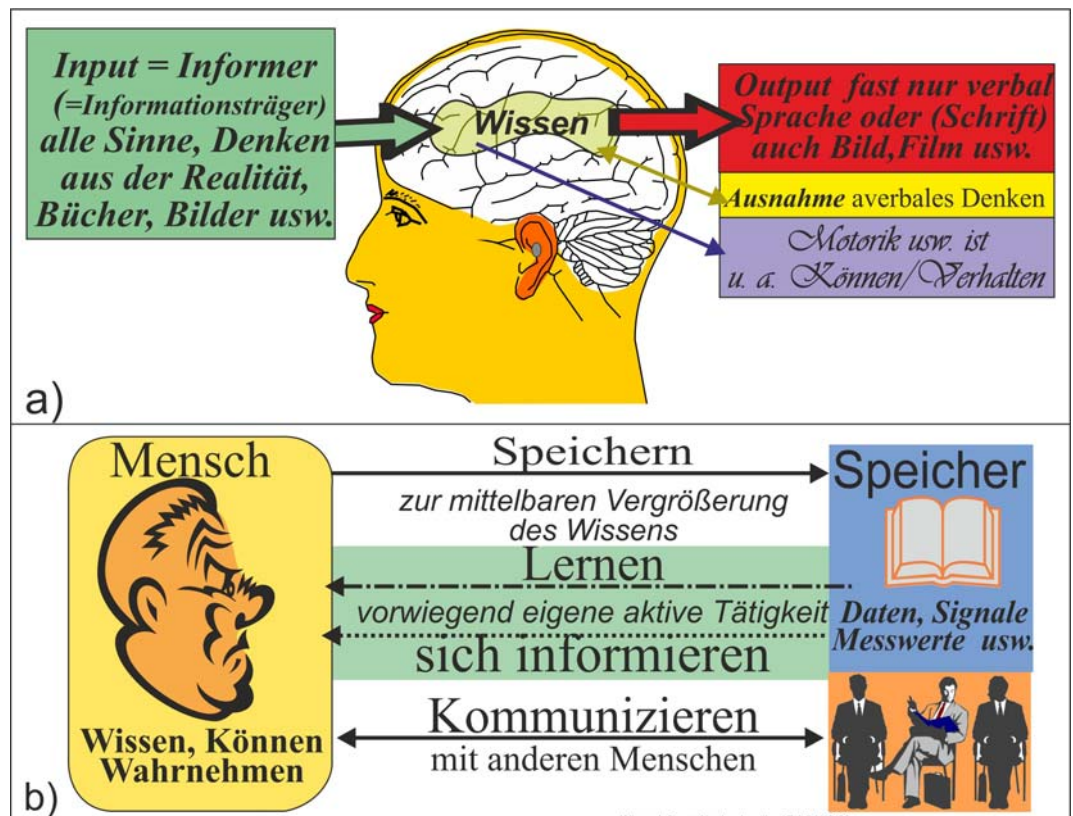
³⁹ Griechisch *semantikos* bezeichnend

⁴⁰ Lateinisch *procedere* Vorgehen, Art und Weise zu handeln

Für weitere Unterscheidungen sind noch Erklärungen vorteilhaft. Das **Semantische** ist bereits im Zusammenhang mit Bild 9 und 10 erfasst. Das **Episodische**⁴¹ speichert zeitliche Abläufe von Ereignissen und autobiographische, individuelle Erlebnisse, wie Hochzeit, Urlaub oder Prüfungen, also quasi den Lebenslauf und teilweise markante Ereignisse des öffentlichen Lebens in Politik, Kultur, Wirtschaft, berühmten Personen usw. Beim nicht-deklarativen Wissen sind die Inhalte praktisch immer verfügbar, jedoch nur langsam und unflexibel. Sie sind fast nur im erworbenen Zusammenhang nutzbar. Fast nie sind sie einer bewussten, verbalisierbaren Erinnerung zugänglich. Auch das Lernen erfolgt anders als beim deklarativen Gedächtnis. Möglicherweise ist es die einzige Gedächtnisform bei Wirbellosen. Das **Prozedurale**⁴² betrifft mechanische und motorische (automatisierte) Fertigkeiten, Handlungsabläufe und Gewohnheiten, wie Gehen, Rad- oder Autofahren. Diese Fertigkeiten nehmen selbst bei intensivem Üben nur sehr langsam zu, bestimmen aber erheblich das persönliche Verhalten. Das **Priming**⁴³ erfasst schließlich Regeln und deren Anwendung sowie Erwartungen, Hoffnungen usw. Dadurch wird ein leichteres Erinnern von ähnlich erlebten Situationen oder früher wahrgenommenen Reizmustern möglich. Ein Kontext bewirkt dabei immer eine Beschleunigung des Erfassens. Es wird nicht nur Einzelnes erinnert, sondern gleichzeitig Ähnliches „vorgewärmt“. Das Wort „Nagel“ wird in einer Wortliste schneller gefunden, wenn zuvor „Hammer“ genannt wurde. Beim Anschauen von Noten sind deutlich schneller die zugehörige Melodie und der Text verfügbar.

Zuweilen wird noch ein „Wissen von“ als Kenntnis von etwas haben, z. B. den Geruch von Butter getrennt ausgewiesen. Weiter seien noch Alltags- und Erfahrungswissen sowie Wissen von Handwerkern, Künstlern, Managern, Politikern usw. betont und schließlich sind auch früheres oder späteres Wissen zu unterscheiden, und zwar als „a priori“-Wissen gemäß der deduktiven Einsicht und als „a posteriori“, was vor allem auf Wahrnehmung beruht. Die vielfältigen Zusammenhänge fasst **Bild 58** zusammen.

Bild 58, Die wichtigsten Zusammenhänge für das Wissen.



Bezüglich der *Anwendung* von Wissen gilt etwa die folgende Einteilung:

- Das *exakte, formalisierbare* Wissen ist in allen Details bekannt und vielfach axiomatisch beschreibbar- Es entspricht in vielen Aspekten dem Wissen der Wissenschaft und wird meist besonders betont.

⁴¹ griechisch *episodion* Zwischenspiel, Nebenhandlung, ursprünglich Chorgesang der antiken Tragödie

⁴² lateinisch *procedere* Vorgehen, Art und Weise zu handeln

⁴³ lateinisch *primus* vorderster, erster, vornehmster

- *Routinehaftes* Wissen benutzen wir im Alltag, z. B. beim Radfahren oder Sich-durch-eine-dichte-Menge-Bewegen. Es ist vielfach nicht bewusst vorhanden und damit unmittelbar zugänglich. Es entspricht dem grauen Wissen nach Dreyfus [Dre85] und ist so komplex, dass bereits jenes eines 2-jährigen Kindes im Gegensatz zu dem von Experten kaum zu formalisieren ist.
- *Heuristisches* Wissen ist weniger starr und wird durch Erfahrung, Gefühl, Zufälle und Verstehen gesteuert. Die zugehörigen Denkschritte und Handlungen sind nur wenig detailliert vorgegeben und kaum formalisierbar, sondern nur als Tendenz bekannt [Mül90].

Wissen erhebt einen Anspruch auf Qualität, also Geltungs- und Sicherheitsanspruch und verlangt so Verlässlichkeit, Geprüftheit, Interessenneutralität. Weitere Details sind bereits ab S. 23 erklärt. Da auf Fragen auch zufällig die richtigen Antworten gefunden werden können, wird für Wissen eine Begründung gefordert. Es sollte also immer gültig sein. Dennoch wird es zuweilen anders benutzt. Dabei werden teilweise auch die folgenden Fälle einbezogen:

- *Unvollständiges* Wissen entsteht, weil die meisten Details der Realität viel zu komplex und mit sehr vielen Inhalten verknüpft sind. Daher ist unser Wissen zuweilen unsicher. Deshalb sprach Steinbuch von einem Flickenteppich [Ste72].
- *Sich widersprechendes* Wissen kann entstehen, wenn es auf verschiedenen Wegen oder mit unterschiedlichen Methoden gewonnen wurde. Hierzu gehören u. a. Paradoxien und Antinomien (s. Abschnitt ###).
- Durch *Unerkanntes* der Realität können sich u. a. Unsicherheit, Fehlverhalten usw. ergeben.
- *Scheinbares* Wissen gibt es dann, wenn es keine Entsprechung in der Realität besitzt. Hierzu gehören Meinungen, Glauben, individuelle Auffassungen, Irrtümer, Dogmen, Ideologien und teilweise auch Kunst (vgl. Bild 21). Mit der Rechentechnik sind auch virtuelle Schöpfungen zu erzeugen und dann per Bildschirmbrillen und sensiblen Handschuhen zu erleben.

Wo sich einzelnes Wissen im Gehirn befindet, ist ungeklärt. Durch Gehirnschäden gehen nämlich nie einzelne Begriffe, Wörter usw. verloren, sondern nur irgendetwas Ganzheitliches, wie Aspekte vom Sehen, Sprechen oder Hören. Der Verlust ist etwa mengenmäßig proportional zu dem zerstörten Volumen. Er betrifft meist nur bestimmte Broca-Areas des Wahrnehmens oder Handelns, die im Bild 50 ausgewiesen sind.

5.2. Intelligenz

Intelligenz⁴⁴ ist ein allgemeiner Begriff für die Fähigkeiten zu lernen, zu verstehen und sich erfolgreich für ein vorteilhaftes bis sicheres Leben zu verhalten. Sie ist also u. a. auf das Lösen von Problemen ausgerichtet. Vorteilhaft sind dabei auch Phantasie, Gedächtnisleistungen und das Erkennen abstrakter Muster. Im geringen Umfang betrifft Intelligenz auch ein averbales Wissen. Vielfach wird als ganz wesentlich ein effektives Denken in Analogieschlüssen und Hierarchien angenommen. Dadurch können Wissen und Erfahrung schnell und sinnvoll auf Unbekanntes, Neues oder einen neuen Kontext übertragen und dann genutzt werden. Eine hohe Intelligenzleistung liegt u. a. häufig bei der Schaffung neuer Axiomatiken vor (vgl. Bild 20, S. 21). Klix erklärt: während Denken den Vorgang beschreibt, erfasst Intelligenz dessen Qualität [Kli83].

Im alltäglichen Umgang werden unter Intelligenz auch Klugheit, Lebenstüchtigkeit, Schlauheit, Gerissenheit usw. verstanden. Im weitergefassten Sinn werden auch besonders leistungsfähige Berufsgruppen zu technischen, biologischen usw. Intelligenzen zusammengefasst.

Die Idee eines extrem intelligenten Wesens beschrieb Laplace mit seinem Dämon (s. Bild 19 und S. 20). Weizenbaum glaubte einmal, dass es ähnlich – wie bei der Nachrichtenübertragung mit der Shannon-Entropie – auch für die Intelligenz eine Obergrenze gäbe. Schon lange wusste er aber, dass dies nicht der Fall sei. Er glaubt nun aber, dass jede Art von Lebewesen eine typische Art von Intelligenz besitze und daher Intelligenzleistungen verschiedener Lebewesen untereinander nicht

⁴⁴ Lateinisch *intelligentia* Einsicht, Verstand, Vorstellung

vergleichbar sind. Jede Intelligenz richtet sich auf die arttypischen Interessen und Bedürfnisse. Diese sind eben für ein Insekt anders als für einen Menschen, für einen Fuchs anders als für ein Huhn. Quantitativ wird dabei der Schlaueit des Fuchses auch die Dummheit der Hühner hinzugerechnet. Genau in diesem Sinn wird auch die Intelligenz möglicher künftiger „intelligenter“ Roboter (die Weizenbaum im Grenzfall auch für Lebewesen zu halten bereit ist) völlig anderer Art sein als die des Menschen [Wei77].

Noch mehr dürfte es auf *außerirdische Intelligenzen* zutreffen, nach denen aber bisher nur vergeblich gesucht wurde. Versuche, um Radiosignale von Außerirdischen zu erhalten unternahm bereits Guglielmo Marconi. 1919 behauptete er solche empfangen zu haben, was aber nicht bestätigt werden konnte. Für die Wahrscheinlichkeit außerirdischer Intelligenzen gab Frank Drake 1960 sogar eine Formel an [Dra97]. 1961 fand dann die erste Konferenz in Green Bank (West Virginia) statt. Daraufhin entstand in Arecibo (Hafenstadt ≈ 15 km von Puerto Rico) die größte Beobachtungsstation für Ionosphärenforschung mit einem Teleskop von 304 m Durchmesser, deren Einweihung 1963 erfolgte. Dort fielen bald sehr viele Empfangsdaten an. Deshalb wurde 1996 von David Gegye SETI@home als damals größtes Internetprojekt gegründet. Dazu konnte jeder Rechner mit einem speziellen Bildschirmschoner in Ruhepausen empfangene Datenblöcke von Arecibo nach „intelligenten“ Signalen absuchen. Als das Geld für den Betrieb von Arecibo knapp wurde, unternahm Drake am 16.11.1974 eine neue Variante. Er sendete eine Botschaft an die Außerirdischen.

5.2.1. Intelligenz-Test (IQ)

Die Intelligenz einzelner Personen kann mittels der Ordinalskala gemäß „ $\geq$ “ vergleichend bewertet und eingeordnet werden (s. S. 14). Oft unterscheidet sich der Klügere vom Dümmeren dadurch, dass ihm die Problemlage einfacher erscheint. Auch die qualitativ bessere Problemlösung ist meist jene, die mit einfacheren Mitteln gefunden wurde. Einfach bezieht sich dabei auf den kognitiven Aufwand. Die größere Einfachheit erweist sich oft auch als Ausgangsbasis zu größerer Universalität. Durch Mess- und mit Zahlenangaben entsteht jedoch die Gefahr einer Verabsolutierung als *Etikett* für einen Menschen, so wie Körpergröße oder Gewicht. Wie gefährlich das sein kann, zeigte bereits die Ilias: Paris sollte unter drei Göttinnen die Schönste auswählen. Das führte schließlich zum Jahre andauernden, zerstörerischen Trojanischen Krieg (s. S. 13). Dennoch ist es verständlich, dass Intelligenztests als Instrument der *psychologischen Diagnostik* entwickelt wurden. Sie hatten unterschiedliche Anwendungen und Schwerpunkte für die Erfassung der kognitiven Leistungsfähigkeit. Beispiele sind Berufserfolg oder -eignung sowie Studienauswahl. Außerdem verlangen klinische Fragestellungen zu möglichen Erkrankungen wie Demenz und beruflichen Rehabilitationsmaßnahmen – eine angepasste Erfassung der dazugehörigen Intelligenz. Einzelne Intelligenztests werden dabei mit entsprechend großen Gruppen so entwickelt, dass möglichst eine Gauß-Verteilung entsteht (s. Bild 13 und unten).

Den ersten brauchbaren Intelligenztest entwickelten Alfred Binet und Théodore Simon 1905. Sie benutzen eine Reihe verschiedenartiger Aufgaben (Subtests) und prüfen mit einfachen Fragen und Problemen des Alltags. Meist werden logische oder mathematische Aufgaben gewählt, wie z. B. die Fortsetzung von Zahlen-, Bild- oder Wortreihen. Durch die Reihenfolge der Fragen nach ansteigendem Schwierigkeitsgrad sind Zuordnungen für Altersgruppen möglich. Die Zahl der gelösten Aufgaben wird schließlich addiert. Bereits die ersten Tests umfassten auch das Messen der Gedächtnisspanne, setzten dabei aber voraus, dass die sprachlichen Anweisungen verstanden wurden. Der Intelligenzquotient (IQ) bekommt als Messergebnis den Mittelwert (Erwartung) 100, wobei die Standardabweichung (Streuung) 15 beträgt, daher liegen die üblichen Werte im Bereich von 85 bis 115. Meist werden die Werte auf das Alter und zuweilen auch nach anderen Merkmalen, wie dem Schulabschluss, normiert. Weitere Details enthält u. a. [Wiki4].

Vieles vom Binet-Simon-Test kehrt in allen modernen IQ-Tests irgendwie wieder. Insgesamt werden so Sprachverständnis, Arbeitsgedächtnis, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Merkfähigkeit, Einfallsreichtum, und Verarbeitungskapazität gemessen und wahrnehmungsgebundenes, logisches,

zahlengebundenes, räumliches, rechnerisches, schlussfolgerndes, sprachliches und räumliches Denken überprüft. Trotz alledem treten immer wieder Messfehler auf. Deshalb müssen Intelligenztests regelmäßig nachgeeicht werden, denn die durchschnittliche gemessene Intelligenz verändert sich mit der Zeit (s. u.). Auch viele unerwünschte Einflüsse (Umwelt, Erbgut, Vorwissen, Bildung usw.) wirken sich aus. Zuweilen werden fast nur abstrakt-logisches Denken oder andere spezifische Fähigkeiten erfasst. Hinzu kommt, dass es auch eine gewisse averbale Intelligenz gibt. Insgesamt enthalten daher die Ergebnisse oft beachtliche systematische Fehler und daher sind die Tests teilweise umstritten.

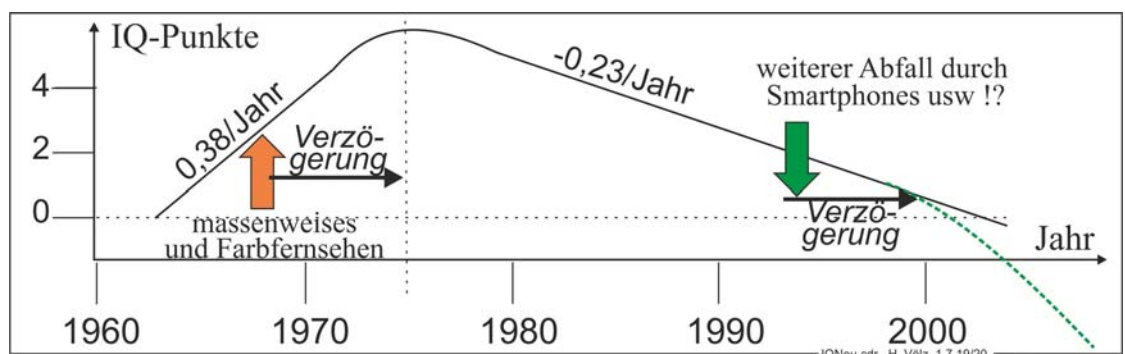
Da die üblichen Intelligenztests ein bis zwei Stunden dauern, sind sie zuweilen recht unpraktikabel. Deshalb existieren auch Kurzttests von nur etwa 15 Minuten Dauer. Mehrfach entstand auch der Wunsch, höhere Skalen anwenden zu können, um so detaillierte individuelle Zahlenwerte zu erhalten. Weiter entstand der Begriff *Emotionale Intelligenz* EQ, für die es aber keinen geeigneten Test gibt. Zuweilen wird auf Protagoras verwiesen „*Der Mensch ist das Maß aller Dinge.*“ Da aber seine Schrift „Die Wahrheit“ verloren ging, ist das Zitat nur indirekt über Platon bekannt.

5.2.2. Intelligenz-Änderungen

In den 1980er Jahren entdeckte James Flynn, dass in Industrieländern bis in die 1990er Jahre die durchschnittlichen IQ-Werte zunahmen. Mit Beginn der 1990er Jahre stagnierte dann der IQ, und seit dem Ende der 1990er Jahre nimmt er wieder ab. Dieser Verlauf wird seitdem als **Flynn-Effekt** bezeichnet. Inzwischen haben zwei Wissenschaftler der Universität Oslo 730 000 IQ-Tests an jungen Männern und Frauen der Jahrgänge 1962 bis 1991 untersucht, die den Militärdienst in der norwegischen Armee antraten. Bis zum Jahrgang 1975 stiegen die Werte stetig auf mehr als 102 Punkte an. Danach fielen sie systematisch. Der Jahrgang 1991 erreichte nur noch knapp 100 Punkte. Nach anderen 271 Untersuchungen aus 31 Ländern verbesserten sich die Werte (wie bei Flynn) ab 1962 bis 1975 um 0,26 bis 0,28 Punkte/Jahr. Der Anstieg wurde durch die bessere Ernährung, medizinische Versorgung und Bildung erklärt. Ab 1975 nahm der IQ jährlich jedoch um etwa 0,23 Prozent ab. Nachdem genetische Faktoren ausgeschlossen waren, wurden als Ursache teilweise Umweltschadstoffe, polychlorierte Biphenyle (PCB) angenommen, die in Flammenschutzmitteln und Pestiziden enthalten sind. Sie könnten sich über die Schilddrüse auf das Gehirn auswirken. Von ihnen waren bereits zuvor negative Auswirkungen auf die Fruchtbarkeit von Männern ermittelt worden [Wiki6].

Wird der Verlauf des IQ über die Zeit aufgetragen, so ergibt sich **Bild 59**. Der Anstieg dürfte aber sehr viel früher begonnen haben, z. B. durch den Buchdruck ab 1450 (Gutenberg), die allgemeine Schulpflicht ab 1710 usw. Inhaltlich unklar bleiben jedoch die Ursachen des Abfalls. Eine systematische Untersuchung hierzu erfolgte in [Völl19]. Infolge der zu erwartenden verzögerten Auswirkungen von knapp 10 Jahren kommt als Ursache sehr wahrscheinlich die massenweise Zunahme des Fernsehens in Betracht. Durch seine bildliche Form mit den nur kurzen Begleittexten wird meist eigenes Denken unterdrückt (s. S. 22 Entscheidungs- und teilweise Ergänzungsfragen sowie Infografik S. 56). Darauf soll der rote Pfeil hinweisen.

Bild 59. Verlauf und wahrscheinliche Einflüsse auf den IQ.



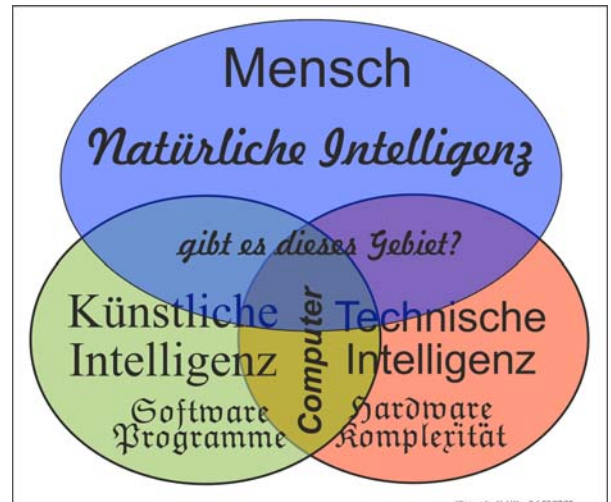
Die Auswirkungen des Smartphones könnten daher erst um 2000 sichtbar werden. Denn bei dem üblichen fortlaufenden Klicken und Betrachten von Bildern können nur noch Entscheidungsfragen beantwortet werden, deren inhaltliche Aussagen wegen fehlender Wiederholungen (s. Bild 26) schnell wieder vergessen werden (grüner Pfeil). Zum Behalten müssten entsprechend unserem KZG

die Inhalte etwa 30-mal leicht verändert wiederholt werden. Für diese wahrscheinlichen Folgen fehlen aber noch experimentelle Ergebnisse. Jedoch viele gut bekannte Fakten weisen bereits deutlich auf ein Abnehmen der Intelligenz hin. Dazu gehört der Fachkräftemangel, ganz besonders bei den Auszubildenden, u. a. infolge von beachtlichen Lese-, Schreib- und Rechenschwächen. Hinzu kommen die deutlich Zunahme der Analphabeten und die Ergebnisse der PISA-Studien. Auch für Grafiken (Bildern) mit 2- oder 3-dimensionalen Zusammenhängen tritt häufig kein Verstehen mehr ein.

5.2.3. Künstliche Intelligenz

Oben ist die Intelligenz als individuelle menschliche Leistungsfähigkeit definiert, die oft für das Problemlösen benutzt wird. Dagegen ist die Künstliche Intelligenz (KI) ein Forschungszweig, der 1956 von John McCarthy auf der Dartmouth-Konferenz begründet wurde. Dabei werden für die Probleme ähnliche Lösungen ausschließlich mittels technischer Einrichtungen angestrebt. Wichtig dafür sind Computer als Hardware und spezielle Programmen als Software. Zuweilen werden auch spezialisierte, hoch komplexe elektronische Schaltungen als Technische Intelligenz bezeichnet. Sie sollte aber nicht mit der genauso bezeichneten Menschengruppe (s. S. 62) verwechselt werden. So ergeben sich die Zuordnungen und Einteilungen von **Bild 60**.

Bild 60. Zusammenhänge der Varianten von Intelligenz.



Bezüglich der prinzipiell technisch erreichbaren Möglichkeiten existieren zwei Lager. Die Vertreter der „**Harte KI**“ (z. B. Minski) gehen davon aus, dass es möglich sei, alle Lösungen der menschlichen Intelligenz auch mit der Künstlichen Intelligenz zu realisieren. Insbesondere soll die Technik dann auch denken und fühlen können sowie Humor und Kreativität besitzen. Dann wäre unser Gehirn (Bewusstsein) prinzipiell nicht leistungsfähiger als die Möglichkeiten der Rechentechnik, es wäre total simulierbar. Die deutlich **anerkanntere Richtung** setzt darauf, dass bei der Künstlichen Intelligenz gefundene Lösungswege (Algorithmen usw.) vorteilhaft in äquivalent arbeitende Techniken – insbesondere Computer – erfolgreich übertragen werden können. Zuweilen ist umstritten, ob hochintelligente Lösungen, die auf anderen Wegen gefunden wurden, auch zur KI gerechnet werden sollten. Trotz der unterschiedlichen Auffassungen gibt es zwei anerkannte Hauptrichtungen mit einigen Untergruppen. Weitere Details u. a. in [Völ17]:

- **Simulation von menschlich intelligentem Verhalten:**
 - Expertensysteme (Frage-Antwort- und Diagnosesysteme),
 - Intelligente Roboter,
 - Problemlösen, automatisches Beweisen, Formelmanipulation,
 - Spiele als Simulationen und auch zur Analyse des menschlichen Verhaltens,
 - Sprachliche Systeme und automatische Übersetzung,
 - Objekterkennung, u. a. 3D-Objekte, Bilder, Sprache und Musik (Noten),
 - Lernen, z. B. Neuronale Netze,
 - Automatisiertes Programmieren.
- **Schaffung neuer Rechentechnik:**
 - Größt- und Parallel-Rechner, Adaptive Systeme, (Quantencomputer?),
 - Spezielle Rechensprachen, wie PROLOG, LISP, Smalltalk usw.

Diese und weitere Gebiete können bezüglich ihres Anteils zur Psychologie, Informatik und Kybernetik gemäß **Bild 61** eingeordnet werden. Genauer sei hier nur auf einige Beispiele kurz

eingegangen. Bei **Spiele**n sind hauptsächlich die sehr vielen Stellungen (Dame $\approx 10^{40}$, Schach $\approx 10^{120}$ und GO-Spiel $\approx 10^{761}$) bedeutsam. Dabei ist Dame inzwischen völlig entschieden: Bei Schach verlor der Weltmeister Kasparow im Mai 1997 erstmalig gegen den Super-Computer „Deep Blue“ von IBM. Wesentlich war dabei, dass er den Sinn eines (neuartigen) Bauernopfers nicht erfasste. Für GO ist noch kein so leistungsfähiges Computerprogramm bekannt. Es wurden aber auch neuartige Spiele geschaffen.

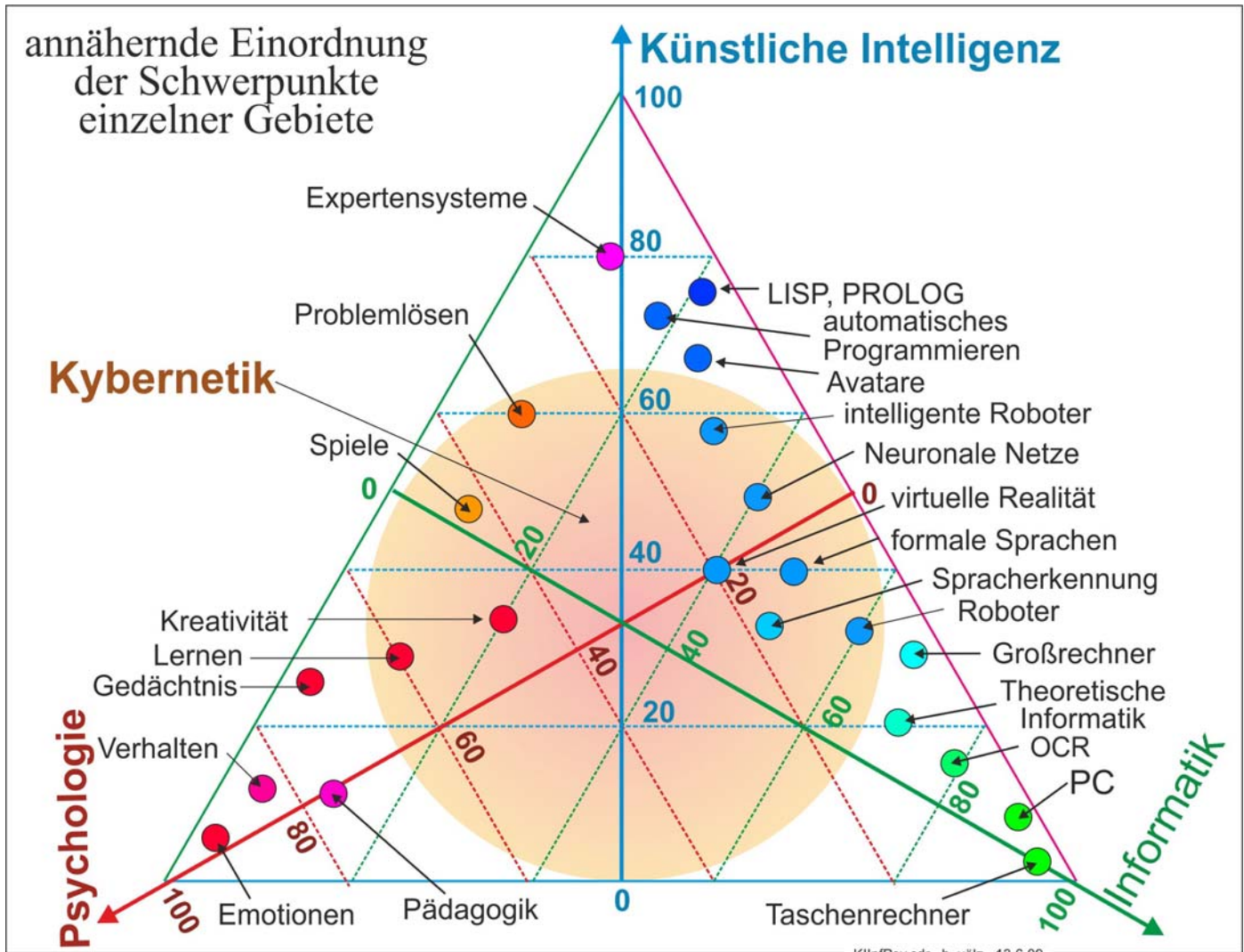


Bild 61. Anteile einzelner Zweige der KI in % von Psychologie, Informatik und Kybernetik.

In einem **Expertensystem** ist das anerkannte Wissen eines Gebietes zu einer Einheit aus den folgenden Komponenten verbunden:

- Die *Wissensbasis* enthält die Fakten und Regeln, mehr als 10 000 sind üblich.
- Der *Schlussfolgerungs-Mechanismus* hat eine vorgegebene Strategie und produziert Schlussfolgerungen. Falls kein exakter Weg zu finden ist, werden auch probabilistische Komponenten benutzt. Die Leistungsfähigkeit wird in LIPS (logische Inferenzen je Sekunde) gemessen. Während ein Mensch nur etwa zehn erreicht, sind bei Expertensystemen Millionen üblich.
- Die *Erklärungskomponente* soll dem Nutzer begründen, wie das Ergebnis entstand.
- Der *Dialogteil* ist die intelligente Benutzerschnittstelle.
- Eine *Wissensakquisition* soll das System zum Lernen befähigen und erweiterbar machen.
- Es bestehen auch Möglichkeiten zum *Experimentieren* (Szenarios).

Bei den Anwendungen müssen die Vorteile des Menschen und des Rechners gegeneinander abgewogen werden. Letztlich soll immer ein Mensch für die endgültige Entscheidung verantwortlich

bleiben. Dafür spricht auch die Einschätzung von Dreyfus zum **grauen Wissen** eines zweijährigen Kindes (s. S. 62). Dessen Menge dürfte deutlich größer sein als das Fachwissen eines Professors.

KI-ähnlichen Betrachtungen beginnen aber bereits 1940 als Turing seinen Test einführte. Damit sollte entschieden werden, ob hinter einer Wand ein Rechner oder Mensch unsere Fragen beantwortet. Wenn keine Entscheidung möglich ist, dann hat der Rechner menschliche Intelligenz. 1963 entwickelte, wenn auch nicht zu diesem Zweck, sondern zum Sprachverstehen, Weizenbaum sein Dialog-Programm ELIZA. Es wurde jedoch leider von Psychiatern sehr ernst genommen und das machte Weizenbaum zum Feind der KI [Wei77]. Eine neuere Betrachtung ist das *Chinesische Zimmer* (s. S. 60). Einen Vergleich zwischen Mensch und Computer versucht die folgende Tabelle.

Kriterium	Mensch	Roboter, Computer
Ursprung, Entwicklung	Im Laufe der <i>Evolution</i> entstanden	Zum Nutzen des <i>Menschen</i> entwickelt
Verhalten wurde optimiert	Zum erfolgreichen <i>Überleben</i> in der realen <i>Umwelt</i>	Als praktikable, dem Menschen <i>nützliche</i> Lösungen
Ablauf der Informationsverarbeitung	<i>Top-down</i> : von ganzheitlich über komplex bis trial and error, Erfahrungen und Ursache-Wirkung	<i>Bottom-up</i> : vom logischen Einzelschritt über strukturelle, funktionelle Einheiten und Programmierung zum komplexen Verhalten
Verhältnis von Struktur/Funktion	Erforderliche Funktion bestimmt überwiegend die Strukturen	Strukturen dienen der Realisierung von Funktionen
Substrat	Biologisch, neuronal, psychologisch, kognitiv, soziologisch	Elektronisch, physikalisch, chemisch, optisch, strukturell
System	Gehirn und Nervensystem	Vorwiegend elektronische Schaltkreise
Methoden und Verfahren	Assoziative, neuronale, logische und intuitive Verknüpfungen	Programmiersprachen, wie LISP, PROLOG und Smalltalk

Mittelbar gehören zur KI auch Modelle und Programme des **Künstlichen Lebens** (KL) nach Levy [Lev93], [Völ17]. Ebenso kann auch die Erzeugung von „*Kunstwerken*“ hinzugefügt werden. Ein kurzer Überblick befindet sich in [Völ88]. Wegen mehrerer sehr früher „Vorversuche“ und der schnellen Entwicklung der KI sei hier ein kurzer Geschichtsüberblick eingefügt:

- 1660 Kirchner beschreibt eine Komponiermaschine
- 1760 Knaus u. Gebrüder Droz: schreibende, zeichnende u. musizierende Puppen
- 1769 Kempelen führt einen schachspielenden Automaten vor (fake?)
- 1793 Mozart schreibt KV 294 d zum Würfeln von Musik
- 1818 Shelleys Roman „Frankenstein or the modern Prometheus“
- 1920 Capeks Drama: „RUR“ Rossums Universal Robots erscheint
- 1930 Herstellung erster Roboter
- 1947 Asimov: Drei Gesetze für die Roboterwelt
- 1950 Turing stellt seinen Test vor
- 1951 Erstes Schachprogramm von Turing
- 1956 John McCarthy ruft die Dartmouth-Konferenz ins Leben, KI wird definiert
- 1956 Newell und Simon: GPS (general problem solver)
- 1959 Samuel: ‘Dame’ lernfähig programmiert
- 1960 McCarthy: erster LISP-Interpreter
- 1963 Weizenbaum entwickelt ELIZA
- 1965 Abbruch der automatischen Übersetzungen Russisch ↔ Englisch
- 1970 Erster intelligenter Roboter entwickelt
- 1972 Colmeraur, Kowalsky und Roussel entwickeln PROLOG

1972 KI-Kritik von Dreyfus
 1974 1. Computer-Schachmeisterschaften in Stockholm
 1977 Weizenbaum: Macht der Computer und Ohnmacht der Vernunft
 1978 Levy bietet Wette 500 Pfund für Schach-Computer-Programm, das ihn schlägt
 1980 KI-Kritik von Searl (Chinesisches Zimmer)
 1985 15.10. in New York 10 Programme spielen gegeneinander Schach
 1987 1. Konferenz: Neuronale Netze in San Diego
 1989 Konferenz über Künstliches Leben

5.3. Bildung

Trotz einer anderen Orientierung hängt auch die **Bildung** erheblich von dem Denken und der Intelligenz ab. Sie ist eine lebenslange und nie endgültig abgeschlossene Fähigkeit und Leistung jedes Einzelnen und ist ein gesellschaftlicher Leitbegriff, der bei Platon noch religiös-mystische und philosophische Wurzeln besitzt. Es besteht ein beträchtlicher Zusammenhang zwischen Renaissance und Aufklärung, der vor allem von Pestalozzi und Humboldt geprägt wurde und sich bereits damals auf die gesellschaftlichen Lehr- und Lernprozesse bezog. Als Erweiterung der üblichen Allgemeinbildung ermöglicht Bildung eine selbstständige, mitverantwortliche Teilnahme an allen Bereichen der Kultur und des gesellschaftlichen Lebens. Die damit zusammenhängende Herzensbildung, als mitmenschliches Verhalten, wird jedoch staatlich (offiziell) kaum behandelt und muss vorwiegend im Elternhaus erfolgen. Das wichtigste Allgemeinwissen wird in der Grund- und Hauptstufe vermittelt und dann bei der Berufsausbildung oder mit der Fortsetzung zur Hochschulreife (Abitur, Matura) erweitert. Intelligenz wird dagegen erst an Hochschulen und Universitäten gefördert. Dennoch ist es für die Bildung und Intelligenz besonders günstig, wenn bereits im Vorschulalter ein Aufwachsen im entsprechend stimulierenden Umfeld erfolgt. Dafür gibt es viele Belege, z. B. in der Musik durch die Familien Bach und Johann Strauss. Nachteilig sind dagegen aufgezwungene Dogmen jeglicher Art, die nicht hinterfragt werden dürfen. Weitere Details dazu enthält der Abschnitt Kreativität.

5.4. Kreativität

Menschen können zuweilen Neues, oft auch Nützliches finden oder schaffen. Diese **Kreativität**⁴⁵ äußert sich in ihrem Verhalten und Denken und ist durch ungewöhnliche und unerwartete, aber meist lösungsorientierte Einfälle gekennzeichnet. Ein gewisser Zusammenhang besteht mit einer **Kreation** in Mode und Kunst, die stets ein neu geschaffenes Modell betrifft. Keinen mittelbaren Zusammenhang gibt es aber zur **Kreatur**, die meist negativ bewertete Personen, wie Kriminelle, Günstlinge, willenlose, bedauerns- oder verachtenswerte Menschen, betrifft. Zuweilen wird dieser Begriff aber auch für Lebewesen (Geschöpfe) verwendet, die von einem Gott geschaffen wurden.

Meist ist Neues intuitiv und unmittelbar erkennbar. Dennoch bedarf es einer Beschreibung. Sie existiert besonders deutlich im früheren Patentgesetz mit den folgenden Hauptkriterien:

- Die formale *Neuheit* im Sinne des noch nie Dagewesenen,
- die Größe des *technischen Fortschritts*,
- die soziale *Nützlichkeit* und
- die Originalität im Sinne von *Erfindungshöhe*.

Im neuen Patentgesetz wurden weitere Kriterien hinzugenommen und einige abgeschwächt. Das bringt hier aber keinen Gewinn. Nützlicher sind Aussagen der Psychologie zu typischen Eigenschaften:

- *Originalität*: Dinge oder Beziehungen neu erkennen,
- *Flexibilität*: Ungewöhnlicher, aber sinnvoller Gebrauch von Gegenständen.

⁴⁵ Lateinisch *creare* (er)schaffen, (er)zeugen, (er)wählen.

- *Sensitivität*: Probleme bzw. bisher missachtete Zusammenhänge erkennen (Analogschluss)
- *Flüssigkeit*: Abweichen von gewohnten Denkschemata
- *Nonkonformismus*: Gegen gesellschaftlichen, sozialen Widerstand sinnvolle Ideen entwickeln

Zusammengefasst ist Kreativität die Fähigkeit von Menschen (und höheren Tieren), etwas Neues in ihrem Umfeld zu finden, zu schaffen und/oder anzuwenden. Sie existiert vorrangig in Wissenschaft, Technik, Kultur, Kunst und bei Handlungen. Es ist aber weitgehend unbekannt, wie sie erfolgt, die Prozesse dabei ablaufen oder gar gefördert werden können. Häufig besteht ein Zusammenhang zur Phantasie. Zur weiteren Betrachtung müssen vier Kreativitätsarten unterschieden werden:

1. **Individuelle** (subjektive) Kreativität: Sie entspricht dem erfreulichen *Aha-Erlebnis*, bei dem oft völlig unvermittelt und ziemlich automatisch ein neuer Zusammenhang, Fakt usw. erkannt wird: Wir wissen nicht, wie es geschah, es geschah uns!
2. **Gemeinschaftliche** Kreativität entsteht u. a. bei Diskussionen und entspricht etwa dem Brainstorming (s. S. 45), weshalb hier darauf nicht weiter eingegangen wird.
3. **Objektivierte** Kreativität: Meist teilen wir das Neue freudig unserer Umgebung (dem Kollektiv usw.) mit und erfahren dann leider allzu oft, dass es andere bereits wissen. Erst wenn allgemein zugestimmt wird, wurde diese höhere Qualität erreicht. Doch damit das Neue auch von den anderen benutzt wird, muss oft ein unbequemes Umdenken bewirkt werden. Dadurch treten nicht selten die berüchtigten Killerphrasen auf. Recht ähnlich wird die Phantasie von Kindern nachteilig beeinflusst.
4. **Absolute** Kreativität liegt dann vor, wenn das Neue noch nirgends und jemals bekannt war.

Die Kreativitätsrate nimmt also von 1 → 3 → 4 deutlich ab. Recht wahrscheinlich dürfte aber die individuelle Kreativitätsrate für alle Menschen ähnlich groß sein. Entsprechend unserem Gedächtnis muss sie kleiner als die Zuflussrate von 0,5 Bit/s (KZG) bzw. 0,05 Bit/s (LZG) sein. Dadurch dürften etwa $\leq 10^{-2}$ Bit/s möglich sein. Dennoch gibt es Personen, die geradezu vor Kreativität übersprudeln. Vielfach sind deren Ideen aber kaum nutzbar. Andererseits gibt es Einzelne, die ein gewaltiges Wissen besitzen und trotzdem oder vielleicht gerade deshalb so gut wie keine neuen Ideen haben. Schließlich gibt es erstaunlich wenige Wissenschaftler, die viele (große) Ideen hatten und so erheblich zum Weltwissen beitrugen, z. B. Platon, Aristoteles, Kant, Newton oder Einstein. In der Kunst ist ihre Anzahl noch größer, so dass hier auf Namen verzichtet sei. Teilweise können die Kreativitätsraten über Nobelpreise, Weltwissen, Patenterteilungen, Produktivität von Autoren usw. bestimmt werden. Aus dem gesamten Weltwissen und der insgesamt jemals gelebten Weltbevölkerung sind außerdem gemittelte Werte je Person zu gewinnen. So ergaben sich die groben Werte der Tabelle mit sehr großem Spielraum [Völ82]. Bei der Rechnerprogrammierung ließen sich auch reale Werte in

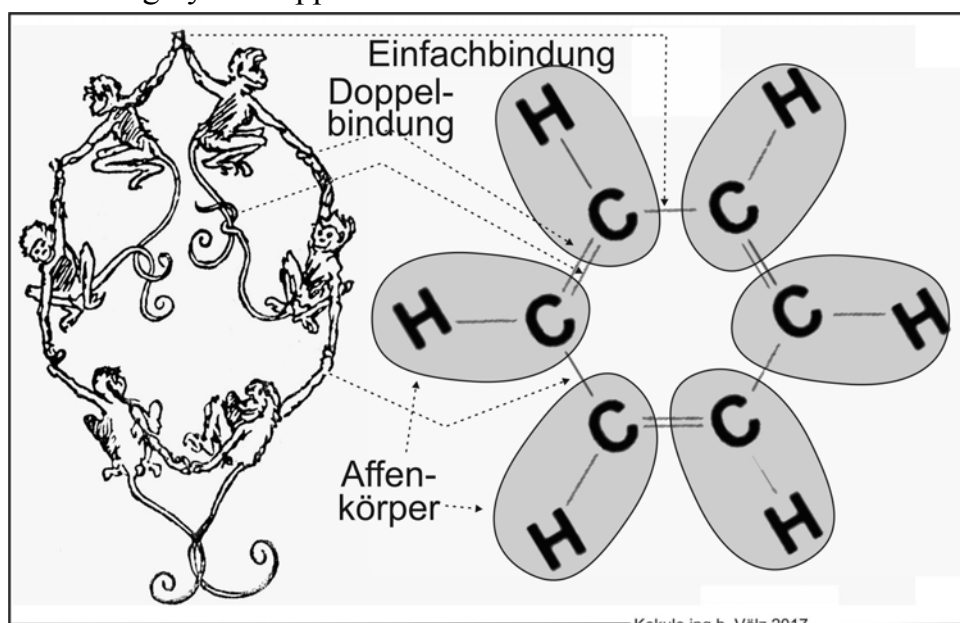
	subjektiv	objektiviert	absolut
maximal hoch kreativ	$10^{-6} - 10^{-2}$ Bit/s 1 Bit/Stunde	$10^{-7} - 10^{-3}$ Bit/s 1 Bit/Tag	$10^{-8} - 10^{-7}$ Bit/s 1 Bit/Jahr
gemittelt	$10^{-4} - 10^{-3}$ Bit/s 1 Bit/Tag	$10^{-6} - 10^{-5}$ Bit/s 1 Bit/Woche	$10^{-9} - 10^{-8}$ Bit/s 1 Bit/Leben
Große Projekte	Programmieren 20 gültige Zeilen/Tag $5 \cdot 10^{-3}$ Bit/s $\approx$ 20 Bit/h		Buch schreiben 2 Druckseiten/Tag 0,5 Bit/s $\approx$ 2000 Bit/h
Menschheit	total 30 Bit/s $\approx$ 10^9 Bit/Jahr		
biologische Evolution	etwa $3 \cdot 10^{-9}$ Bit/s $\approx$ 0,1 Bit/Jahr		

gültigen Programmzeilen je Zeit bestimmen [Völ91], [Völ01], S. 469ff. dann [Völ17], S. 259ff. Hierbei können aber individuell und zeitlich erhebliche Unterschiede auftreten. Von den Programmierern selbst werden außerdem bezüglich der Fertigstellung eines Programms meist deutlich zu kurze Zeiten angegeben.

Leider gibt es fast keine Aussagen dazu, wie die Kreativität abläuft und was ihre Ursache war. Generell ist es sogar individuell unüblich, mitzuteilen, wie das Neue gefunden wurde. Es wird nur das Ergebnis publiziert. Lediglich Johannes Müller gibt in seiner systematischen Heuristik einige

Hinweise: Sind erst einmal die meist schwierig zu findenden Ursachen der Probleme gut bekannt, dann lässt sich eine Aufgabe formulieren und weiter mit einer Zielstellung präzisieren. Ein derartig schrittweises Herangehen zur Problemlösung kann gefördert werden [Mül90]. Doch das ist selten anwendbar und dann muss die Lösung „intuitiv“ gefunden werden. Zusätzlich sind einige Fälle bekannt geworden, wo das Ergebnis plötzlich und unvermittelt im Traum oder Halbschlaf auftrat. So teilte Kekule in seiner Festrede 1890 mit, wie er im „Halbschlaf“ vier Schlangen gesehen hat: „Eine der Schlangen erfasste den eigenen Schwanz und höhnisch wirbelte das Gebilde vor meinen Augen. Wie durch einen Blitzstrahl erwachte ich“ [Wiki3]. Es gibt auch Berichte von 1865, wonach er im Zoo vier Affen beobachtet habe, die sich kreisförmig gegenseitig am Schwanz hielten. Diese Ergebnisse führten ihn zur Struktur des Benzolringes (**Bild 62**). Ähnlich sollen Dimitri Mendelejew das Periodensystem der Elemente und Elias Howe die Nähmaschine so erfunden haben. Nachdem ich meinen Studenten etwa 30 Jahre lang auf die Probleme und Grenzen der Digitalisierung von Schall bezüglich der Amplitudenstufen hingewiesen hatte, erlebte ich im Halbschlaf am 21.01.2007 die Idee zur Kontinuierlichen Digitalisierung [Völ08]. So wird das Schallsignal entsprechend unseren Gehörtoleranzen durch ein Gleichungssystem approximiert. Dann sind nur deren Koeffizienten zu übertragen. Bei der Wiedergabe kann daraus das unhörbar veränderte, aber voll kontinuierliche Signal (ohne Amplitudenrauschen) wieder erzeugt werden.

Bild 62. Kekule und der Benzolring. Die Verweispfeile mussten jedoch spiegelbildlich eingetragen werden. Die Affen entsprechen den C- und H-Atomen.



Sowohl für die Intelligenz als auch für die Kreativität sind wahrscheinlich tiefe Entspannung, Halbschlaf und Traum sehr vorteilhaft bis notwendig. Denn zuweilen arbeitet das Gehirn auch selbstständig an Problemen weiter, ohne dabei das Bewusstsein zu erreichen. Dabei könnten sogar unbekannte Methoden oder Algorithmen und der Zufall wirksam sein. Deshalb könnte René Descartes Satz „Ich denke, also bin ich“ auch so ergänzt werden: „Ich denke und lasse das Es (mein Gehirn) denken, also bin ich“ Insgesamt lässt sich daher der sehr hohe Judenanteil bei Hochintellektuellen und -kreativen in Wissenschaft und Kunst wie folgt erklären. Gemäß [Wiki7] gibt es weltweit $\approx 2,1 \cdot 10^9$ Christen und $\approx 1,3 \cdot 10^9$ Islamiten, aber nur $\approx 1,35 \cdot 10^7$ Judentum. Das Verhältnis beträgt also $\approx 1/250$. Zum Vergleich seien die fünf Bücher herangezogen, in denen jeweils hundert Hochintellektuelle zusammengestellt sind [N.N95]. Nach eigener, aber unvollständiger Kenntnis sind in jeder Kategorie mindestens 3 Juden vorhanden. Mit $>1/30$ ergibt sich so mindestens das Zehnfache an Juden gegenüber Christen und Islamiten. Eine Ursache könnte darin liegen, dass beim Judentum konsequent Dogmen vermieden werden. Denn bereits 14-Jährige werden vollwertig in die betont undogmatischen Diskussionen zu Thora und den Glaubensgrundsätzen einbezogen.

5.5. Die Wissenspyramide

Unsere kognitiven Leistungen auf den Gebieten: Denken, Bewusstsein, Lernen, Wissen, Intelligenz und Kreativität sind sehr unterschiedlich stark. *Lernen* führt zum Speichern von Wissen im Gehirn, dabei sind vor allen Entscheidungsfragen wichtig. *Intelligenz* betrifft die Fähigkeit, vorteilhaft mit

dem Wissen umzugehen und beantwortet so Ergänzungs- und Begründungsfragen. *Kreativität* ist die Fähigkeit, neues Wissen zu schaffen. Auch die funktionellen und strukturellen Zusammenhänge unterscheiden sich. Insgesamt entsteht so **Bild 63**. Das Fundament ist die Realität. Die im Zentrum stehende *Wissenspyramide* weist zeigt auf, wie das nutzbare und genutzte Wissen, über technische Speicherungen und das gesellschaftliche Wissen zum Gehirn des Einzelnen gelangt und dabei erheblich abnimmt. Intelligenz und Kreativität nutzen davon nur relativ geringe Teilmengen. Unser Bewusstsein (rot-braunes Rechteck) betrifft nur Wissen. Intelligenz und Kreativität sind im individuellen Gedächtnis vorhanden. Zwischen den einzelnen Gebieten bestehen Wechselwirkungen über Erkennen (Wahrnehmungen), Kommunikation, Nutzen (Anwenden) von Wissen sowie per Kreativität durch neue Ideen und Visionen. Falls nun wirklich die Intelligenz ständig abnimmt (s. o und Bild 59), dürfte davon das gesamte gesellschaftliche Leben, insbesondere Kultur, Wissenschaft, Technik, Gesundheit und Zivilisation nachteilig betroffen sein. Gegenmaßnahmen ermöglicht vor allem und zuerst nur die Bildung. Sie muss unbedingt umgehend deutlich verbessert werden. Technische Möglichkeiten, wie Künstliche Intelligenz, Big Data und Virtuelle Realität, versprechen dagegen wenig Erfolg.

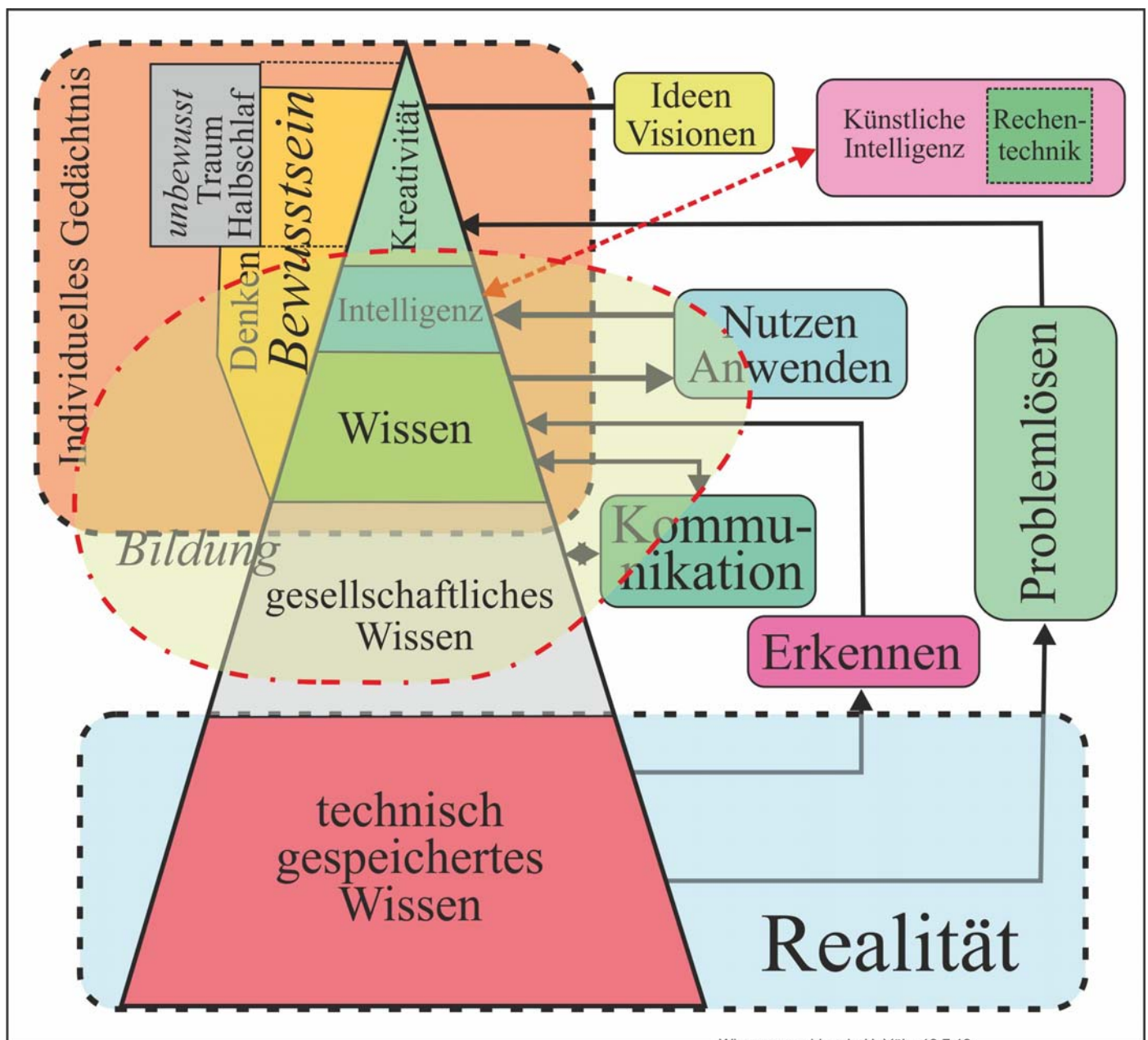


Bild 63. Die Wissenspyramide zeigt die Zusammenhänge zwischen unseren kognitiven Leistungen.

III Vom Werkzeug zur Technik

Ab Seite 50 ist in einem erweiterten Sinn gezeigt, dass die menschliche Hand das erste Werkzeug⁴⁶ ist. Mit ihr kann er in der Realität etwas nach seinen Wünschen gestalten. Doch eigentlich gilt: Ein Werkzeug ist ein Objekt, das nicht Teil von einem lebendigen oder organischen Organismus ist und mit dem er seine Funktionen so erweitern kann, dass er ein Ziel erreicht. Typische Handwerkzeuge sind Hammer, Zangen, Scheren, Feilen, Schraubendreher, Meißel, Sägen usw. Als wichtige Grundwerkzeuge werden häufig Amboss, Richtplatte und Schraubstock betrachtet. Deutlich später sind komplexe Werkzeugmaschinen entstanden, denen nur teilweise zusätzliche Werkzeuge wie Bohrer, Fräser usw. eingesetzt werden müssen. Häufig werden aber auch nichtmaterielle Hilfen so bezeichnet, z. B. Programmier- und Softwarewerkzeuge. Deutlich umfassender oder besser übergeordnet ist der Begriff **Technik**⁴⁷. Auch deren Mittel dienen dazu, die Realität zweckmäßig zu verändern und umzugestalten. Dabei entstehen u. a. materielle Gebilde, wie Werkzeuge, Maschinen, Transportmittel und Bauwerke. Dabei sind drei Bereiche zu unterscheiden:

- nutzenorientierte, künstliche, materielle Gebilde,
- menschliche Handlungen und Einrichtungen, durch die Sachsysteme entstehen,
- menschliche Handlungen, bei denen Sachsysteme verwendet werden.

Die Varianten und Geschichte der Technik sind so umfangreich, dass hier nur Ausschnitte behandelt werden können. Die Auswahl erfolgt dabei so, dass sich die gewünschten Einzelheiten weitgehend aus der Kybernetik und ihren Systemen ableiten lassen.

6. Einführung der Kybernetik

Der Begriff und die Wissenschaft Kybernetik⁴⁸ wurden von Norbert Wiener (1894 – 1964) eingeführt. Den Ausgangspunkt bildete eine Konferenz im März 1943. Alle bis dahin bekannten Wissenschaften orientierten sich an ausgewählten Eigenschaften bzw. Strukturen der Realität, wie die Physik an Energie und Masse, die Chemie an den Verbindungen, das Leben an Pflanzen und Tiere oder die Medizin für den Menschen. Wiener war aufgefallen, dass sich mit der damals beginnenden technischen (elektronischen) Entwicklung etwas Neues abzeichnete. Hierbei wurden viele Analogien sichtbar, die unter Vernachlässigung des speziellen Substrats (biologisch, mechanisch usw.) sehr ähnliche Abläufe oder Funktionen betrafen und so viele Gemeinsamkeiten bei Maschinen, Pflanzen, Tieren, dem Menschen und in der Gesellschaft deutlich zeigten. Hierfür schuf er den Begriff Kybernetik und begründete ihn schließlich mit einem Buch [Wie48], dessen Titel im Deutschen „Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und in der Maschine“ lautet und damit deutlich das Ziel ausweist. Eine anschauliche Erklärung hierfür ist mit **Bild 64** auf der nächsten Seite möglich. Ein Mensch geht seinen Weg zu einem Ziel. Zwischendurch hat sein Hund anderweitig etwas beschnuppert und nun muss er seinem Herrchen schnell nachlaufen. Das geschieht mit ständigem Sichtkontakt auf dem, gekrümmten, blau gestrichelten Weg. Ganz analog verläuft die Radarverfolgung eines Feind-Flugzeugs und die dazu erfolgende Nachlaufregelung bis zum Treffer. Die Bewegung des Feind-Flugzeuges bzw. des Mannes entsprechen einer Ursache, kybernetisch gesprochen dem Input, die Steuerung der Abwehrrakete bzw. die Bewegung des Hundes der erreichten Wirkung, dem Output. Vom prinzipiellen Ablauf sind also beide Geschehen fast gleichartig und können daher auch mit gleichen Methoden (z. B. Formeln) behandelt werden. Das ist typisch für die Kybernetik und zugleich ein Beispiel für Analogiebetrachtungen. Auf die Begriffe von Regelung und Steuerung wird später noch genauer eingegangen (s. Bild ### und Abschnitt ##).

46 Von Althochdeutsch wirken, arbeiten, etwas schaffen

47 Griechisch *techné* Kunst, Kunstfertigkeit, Geschick, Handwerk, Gewerbe und *technikos* kunstvoll, kunstverständlich, vernünftig, verstandesgemäß, sachgerecht, listig

48 Griechisch *kybernetes*, Lateinisch *gubernator*, Englisch *governor*, was den Lotsen und die Steuermannskunst betrifft. Auch Statthalter, Regler, Chef und Direktor kommen in Betracht

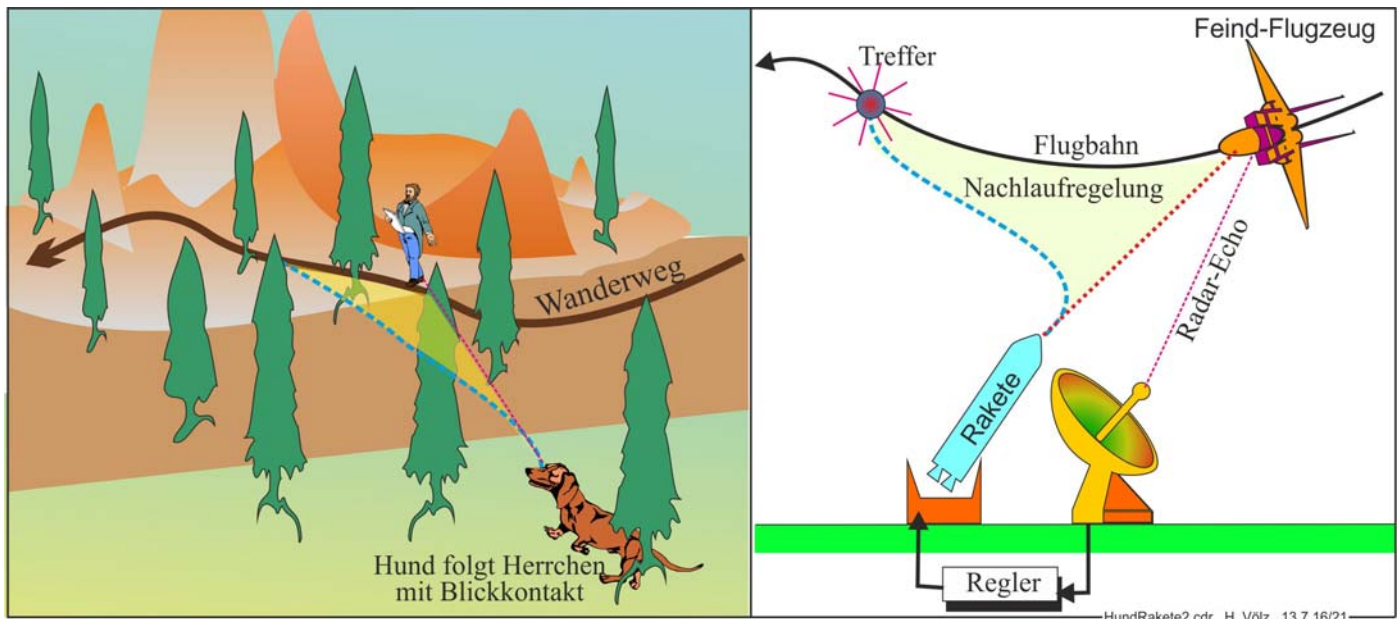


Bild 64. Analogie zwischen dem Verfolgen des Hundes und der Rakete.

Fast gleichwertig mit Wiens Kybernetik erschien Herrmann Schmidts Gedenkschrift von 1941 [Sch41]. Im Gegensatz zu Wiener wird in ihr aber die regelungstechnische und menschliche Seite der Prozesse deutlich hervorgehoben. Trotz des Krieges ist dann sogar das international erste Regelungstechnische Institut in Deutschland gebildet worden. Dennoch erlangte Schmidts Anliegen kaum eine ähnliche Breitenwirkung wie Wiens Kybernetik. Leider gibt es für die Kybernetik trotz mehrerer Versuche so gut wie keine geeignete Definition. Hier wird die von Förster benutzt [Foe93] S. 72/73:

"Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine" kann als Definition von Kybernetik fungieren. Wenn auch das Wort Kybernetik vor ungefähr 150 Jahren von André Marie Ampère ... benutzt und dieses Konzept schon vor 1500 Jahren von Heron von Alexandria ... verwendet wurde, so war es der Mathematiker Wiener ..., der diesem Begriff schon im Jahre 1948 Namen und Bedeutung im modernen Kontext verlieh. ... Müsste man ein zentrales Konzept, ein erstes Prinzip der Kybernetik nennen, so wäre es „Zirkularität“. ... Heute kann vielleicht „Zirkularität“ durch „Rekursivität“ ersetzt werden."

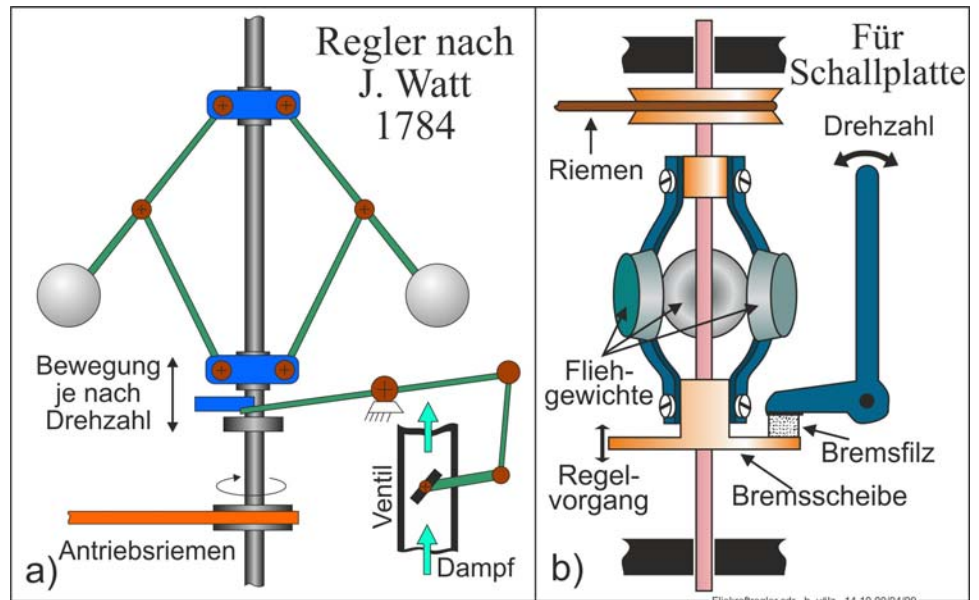
Erste Anwendungen im Sinne der Kybernetik erfolgten schon in der griechischen Antike. Bereits um 270 v. Chr. benutzte Ktesitios ein Schwimmventil, um die Durchflussmenge konstant zu halten, 230 v. Chr. baute dann Philon eine Öllampe, bei der das Flüssigkeitsniveau konstant gehalten wurde. Um 100 v. Chr. realisierte Heron von Alexandria automatische Theater, Wasserspiele und Türöffner. Aristoteles hat sogar an eine praktikable Automatisierung gedacht:

„Wenn jedes Gerät in der Lage wäre, auf Befehl selbständig Arbeit auszuführen, wenn ... die Weberschiffchen auf eigenem Antrieb weben würden, so hätten die Werkmeister keine Arbeiter und die Herren keine Sklaven mehr nötig.“

Aber schließlich waren damals in Alexandria Sklaven sehr billig und so blieb es beim Gedanken. Um 1000 entstand die jüdische Sage vom *Golem* als Synagogendiener des Prager Rabbi Löw. Ab 1500 folgten die ersten „Nachbildungen“ von „tätigen“ Menschen. Wiener wusste auch, dass bereits Ampère den Inhalt von Kybernetik in seinem "Essai sur la philosophie des sciences" von 1834 benutzt hatte. Damals betraf er aber wissenschaftliche Verfahrensweisen bei der staatlichen Regierung. Die erste umfangreich benutzte Anwendung ist der Fliehkraftregler von James Watt (**Bild 65a**). Damals trieb eine einzige Dampfmaschine eine Transmissionswelle an. An diese wurden dann je nach Bedarf einzelne der Arbeitsmaschinen ständig an- und abgekoppelt. Dadurch

schwankte die Belastung der Maschine und als Folge ihre Drehzahl. Der Regler von Watt verändert deshalb voll automatisch die Dampfzufuhr so, dass unabhängig von der jeweiligen Belastung die Drehzahl konstant blieb. Das Prinzip wurde sogar noch in den 1950er Jahren zur Drehzahlregelung bei den Plattenspielern benutzt (b).

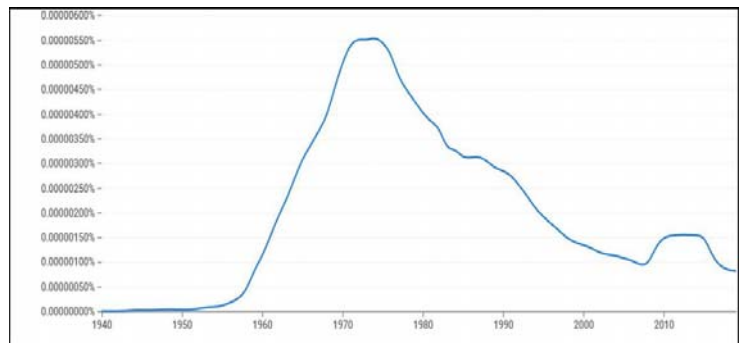
Bild 65. Prinzip des Reglers nach Watt (a) und beim Plattenspieler der 1950er Jahre (b).



Schließlich gelangten die Gedanken der Kybernetik auch in die Literatur. So erschien u. a. 1818 von M. W. Shelley der Roman „Frankenstein, or the modern Prometheus“⁴⁹ und 1920 von Karel Capek⁵⁰ „Rossums Universal Robots, R.U.R.“.

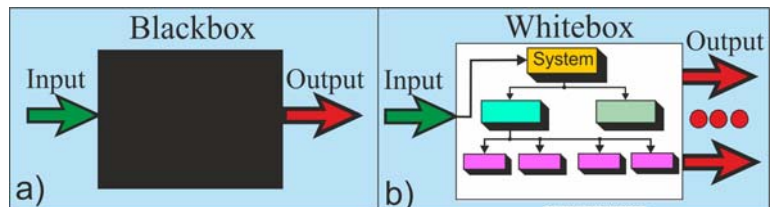
Ab den 1950er Jahren erfolgen dann immer mehr Anwendungen der Regelung und Steuerung in fast allen Gebieten, so auch in Biologie, Gesundheit und Wirtschaft und zwar als Analogiebetrachtungen. Jedoch solide Zusammenfassungen für die Kybernetik sind bisher kaum erschienen. Sie blieben wohl auch infolge der ideologischen Auseinandersetzungen im kalten Krieg aus (s. dazu Information Abschnitt ###). So nahm vorübergehend, aber über viele Jahre die Bedeutung der Kybernetik deutlich ab. Doch inzwischen hat sie wieder erneut Bedeutung erlangt (**Bild 66**).

Bild 66. Die Häufigkeit des Wortes Kybernetik (deutsch) in Google.



Eine grundlegende Struktur der Kybernetik ist die *Blackbox*. Als System empfängt sie Signale X_E am Input und erzeugt dadurch als Output $X_A = f(X_E)$ (**Bild 67a**). Im Prinzip kann sie deshalb bereits durch die Funktion f voll beschrieben werden. Mit ergänzenden Aussagen zur inneren Struktur entstehen die *Graybox* und schließlich die *whitebox*. Einen kybernetisch wichtigen Sonderfall besitzt dabei die hierarchische Struktur aus mehreren internen Systemen (b). Sie kann dann auch mehrere Ausgänge erzeugen.

Bild 67. Die Blackbox und Beispiel für eine Whitebox mit hierarchischer Innenstruktur.



Mittels spezieller Zuordnungen zu Input und Output, sowie einer eventuellen Energieversorgung (blau) entstehen aus dem Grundsystem (**Bild 68a**) mehrere speziell benutzte und daher besonders

⁴⁹ Mary Wollstonecraft **Shelley**, geborene Godwin, (1797 - 1851) schrieb als englische Romanautorin u.a. 1818 den Roman „Frankenstein, or the modern Prometheus“ (Frankenstein oder der moderne Prometheus), der zum Klassiker der phantastischen Literatur wurde.

⁵⁰ Karel **Capek** (1890 - 1938) gilt als tschechischer **Goethe**. R.U.R. ist nur eines seiner vielen berühmten Dramen. Hier geht es um die Entfremdung des Menschen im Maschinenzeitalter. Von Tschechisch robota (Fronarbeit) wurde der Begriff in fast alle Sprachen aufgenommen.

benannte Systeme: Verstärker, Wandler und Speicher, mit zusätzlichen Strukturen die Regelung und Steuerung sowie die Rückkopplung und schließlich meist ohne Input der Oszillator. Ihnen sind später besondere Abschnitte gewidmet. Eine Sonderanwendung ist jedoch die Information (c). Gegenüber den anderen betrifft sie keine spezielle Schaltung (Struktur), sondern ist vielmehr ein *Prozess*. Deshalb wird aus dem Input der Informer, der ehemals fälschlich Informationsträger hieß. Seine Wirkung kann dann zweifach sein: Einmal wird das System selbst verändert und zusätzlich kann auch ein Output auftreten. Beides zusammen wird als Informat (gelb, früher Getragenes) zusammengefasst. Auf die Besonderheiten und äußerst umfangreiche Anwendungen wird ausführlich im Abschnitt ### eingegangen. Aber bereits hier sei auf den Zusammenhang mit dem Wissen verwiesen (s. Bild 58). Es wird durch den Informer im Gedächtnis erzeugt (b).

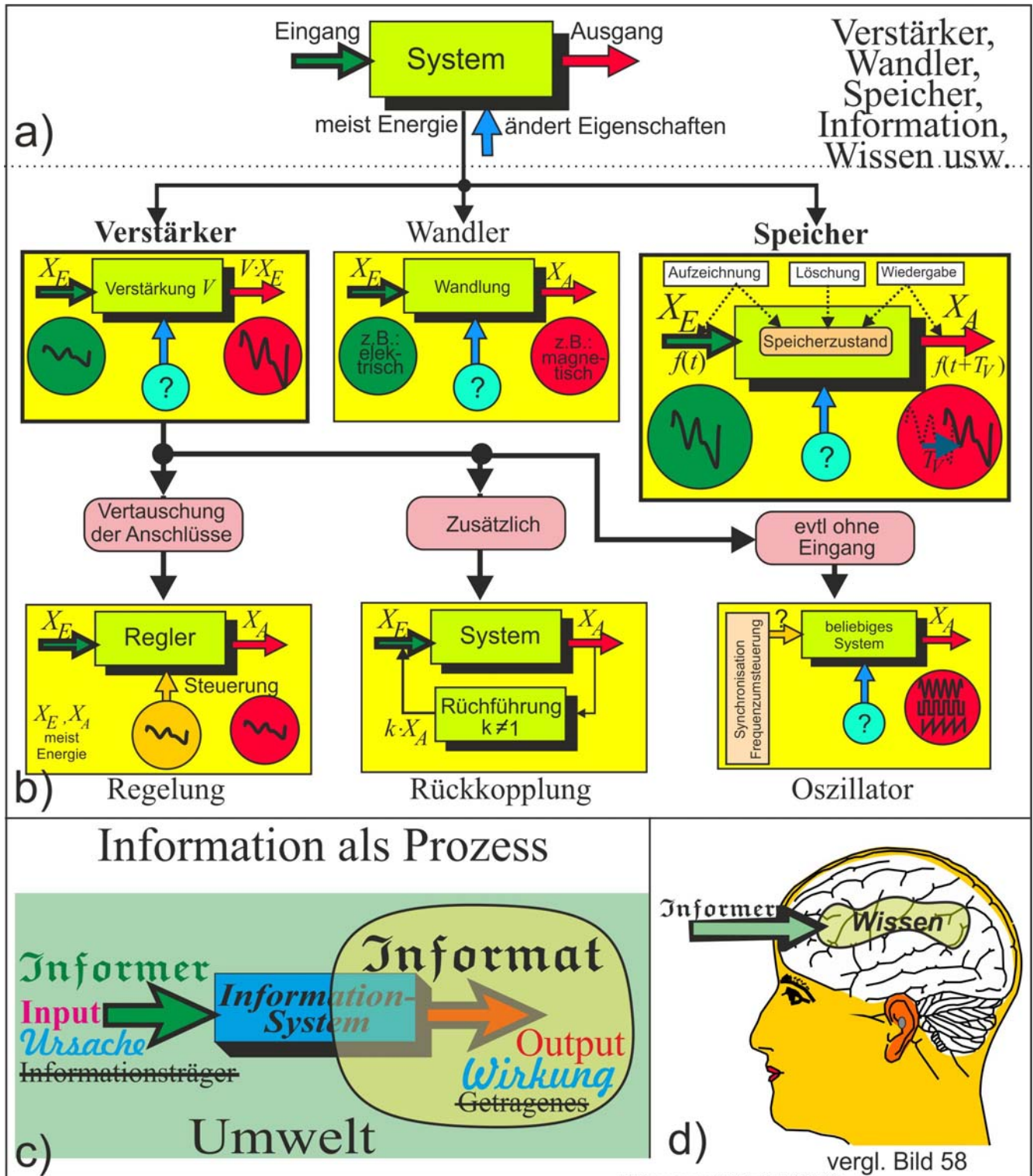


Bild 66. Die wichtigsten kybernetischen Schaltungen.

Zunächst sei noch betont, dass die im Folgenden ausführlicher beschriebenen Systeme als Beispiele für technische Anwendungen stehen. Eine größere Auswahl hätte den Umfang gewaltig erhöht und kaum zusätzliche Aussagen für das angestrebte Ziel erbracht. Außerdem sei erwähnt, dass sogar die prinzipiellen Möglichkeiten der Systeme eingeschränkt werden müssen. Das wird beim Verstärker besonders deutlich. Alle im weiteren behandelten Verstärker, Wandler usw. haben eine bestimmte Aufgabe, die sie aber immer nur mit einer gewissen Sicherheit leisten können. Darauf wird aber erst genauer im Teil IV eingegangen und kann daher im Folgenden weitgehend entfallen.

6.1. Die Vielfalt der Verstärker

Der Begriff Verstärker erlangte für entsprechenden Schaltungen und die damit aufgebauten Geräte erst mit der breiten Anwendung der Elektronenröhre etwa ab den 1930er Jahren beachtliche Bedeutung (**Bild 67**). 1906 lag sowohl das Patent von Lee de Forest als auch die erste Elektronenröhre von Robert von Lieben vor. Durch die später erfolgende weitgehende Einordnung des Prinzips in die integrierten Schaltungen (IC integrated circuits) fiel die Häufigkeit des Begriffs wieder stark ab. Doch inzwischen wurde der Begriff für viele ähnliche Anwendungen, selbst weit von der Elektronik entfernt, benutzt. Das „verstärkte“ sich noch durch Verallgemeinerungen im Sinne der Kybernetik. Hinzu kommt vielleicht auch, dass von „stark“ abgeleitete Inhalte bzw. Wörter, wie sich stärken, Stärke zeigen usw. extrem vielfältig benutzt werden. Sie betreffen dann u. a. die Körperkraft, Großes, Umfangreiches, Dickes, Heftiges, Gehaltvolles usw. Schließlich gibt auch noch die Stärke als Hilfsmittel um Stoffe zu versteifen. Schall- und Bildverstärker s. Abschnitt 6.3.

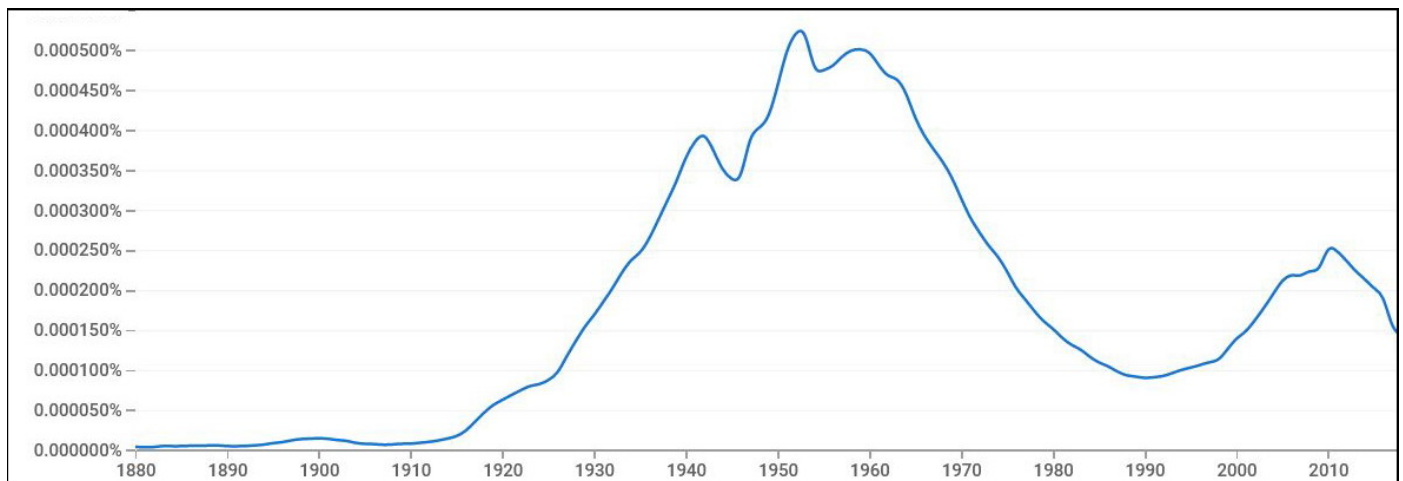


Bild 67. Die Häufigkeit des deutschen Wortes „Verstärkung“ in Ngram bei Google.

Allgemein ist der *Verstärker* ein Gerät, eine Anordnung oder ein Prinzip, das etwas verstärkt, vergrößert usw. Das kann drei Inhalte betreffen:

1. Den Wert einer Eigenschaft, wie Größe, Kraft, elektrische Spannung, Wirkung usw.
2. Einen zeitlichen Ablauf, ein Geschehen oder ein Signal.
3. Eine räumliche Anordnung von Objekten, Zeichen usw., für Bildern s. u.

Meist erzeugt ein Verstärker dabei Vorteile für die Anwendung. Zuweilen kann aber auch das Gegenteil vom Verstärken ein Abschwächen, Verkleinern nützlich sein. Das wird u. a. zur Verringerung von Störungen beim Verstärker angewendet. Zuweilen besitzt der Aufbau dabei sogar erhebliche Ähnlichkeit mit einem Verstärker. Verwandt mit Verstärken sind die getrennt behandelten Wandler, Regler und Oszillatoren.

Die Vielfalt der möglichen Verstärker erfordert eine deutliche Abgrenzung. So gehören Lupen (abgesehen vom Brennpunkt), Mikroskope usw., die Bilder für das Auge vergrößern (verstärken?) nicht dazu. Das gilt noch mehr für Elektronenmikroskope. Auch chemische Substanzen, wie Medikamente, Katalysatoren, Enzyme, Gewürze usw. ja selbst so genannte Geschmacksverstärker werden nicht eingeordnet. Noch weniger gilt das für Lernmethoden, Konditionierung, Motivierung

usw. Auch das Wachsen von Pflanzen und Tieren wird nicht zugeordnet. Auch die Verstärkung der Macht, von Gruppen, Besatzungen, Mitarbeitern, Orchestern usw. sind anderer Art Dennoch bleibt die Vielzahl der Verstärkerprinzipien so groß, dass eine geeignete Klassifikation notwendig ist. Hier werden drei Klassen⁵¹ unterschieden. Dabei ist auch wesentlich, wie die erforderliche Energie zum Verstärker gelangt:

	G-Verstärker	S-Verstärker	E-Verstärker
Betrifft	Geräte, Formeln, Gesetze	Systeme, Strukturen	Effekte, Erscheinungen
Beispiele	Hebel, Schrauben, Rollen, Getriebe, Hydraulik usw. Wirkung = Weg · Kraft Elektrisch: $U = I \cdot R$	Röhre, Transistor, (Relais)	Laufzeit von Teilchen, Stimulierte Emission
Energie, Bedingungen	Erhaltungssätze: Energie steht im engen Zusammenhang mit dem Input, bzw. wird davon irgendwie abgeleitet	Die Energie gelangt auf einem getrennten Weg zum Verstärker	Erst ein verschachtelt Zusammenwirken mehrerer Prozesse macht die Verstärkung möglich

6.1.1. G-Verstärker mittels Austausch-Energie.

Die wohl ältesten Anwendungen sind G-Verstärker. Sie wurden bereits mehrfach in der griechischen Antike genutzt. Am meisten bekannt sind die Nutzenanwendungen von Archimedes (284 - 212 v. Chr.). Um 250 v. Chr. findet er die Gesetze des Hebels und der schiefen Ebene, 239 v. Chr. den Flaschenzug und wendet ihn in der Hafenstadt Syrakus (Sizilien) an. Mit ihm konnte König Hieron ein großes Schiff allein ins Wasser gleiten lassen. So überzeugte er ihn von der Bedeutung der technischen Wissenschaft. 212 v. Chr. setzte er angeblich mit einem riesigen Spiegel die römische Flotte bei Syrakus in Brand. Von ihm soll auch die Aussage stammen. Gebt mir einen festen Punkt in der Welt und ich hebe die Erde aus den Angeln (**Bild 68**).



Bild 68. Eine anschauliche Darstellung der Vorstellung von Archimedes

Über Archimedes sind zwei Anekdoten bedeutsam: Der Legende nach besaß König Hieron II von Syrakus einen goldenen Kranz (Krone). Er hatte aber den Verdacht, dass er eventuell mit Silber gefälscht worden sei. Daher übertrug er die für damalige Zeit sehr schwierige Prüfung Archimedes. Dieser fand die Problemlösung, als er zum Bade in die Wanne stieg und dabei das Wasser überlief. Dadurch begriff er, so das spezifische Gewicht und damit der Silberanteil zu bestimmen. Die Krone war wirklich gefälscht!

Im 2. Punischen Krieges belagerten die Römer Syrakus und rückten schließlich 212 v. Chr. unter Leitung des Konsuls Claudius Marcellus als Sieger ein. Er hatte dabei seinen Soldaten ausdrücklich den Befehl erteilt, Archimedes unbedingt zu verschonen. Sie trafen ihn, als er geometrische Figuren für eine Berechnung in den Sand zeichnete. Er war so tief in sein Problem versunken, dass er einen sich nähernden römischen Soldaten aufforderte: „Störe mir meine Kreise nicht!“. Darauf habe der ihn erschlagen. Eine deutlich andere Meinung vertritt hierzu der tschechische Schriftsteller Karel Čapek (1890 - 1938) in seiner Kurz-Erzählung „Archimedes' Tod“ von 1938 [Cap77] S. 40. Es war den Römern gut bekannt, dass Archimedes viele wirksame Kriegsmaschinen erfunden

⁵¹ In „horstvoelz.de/PDF Sonstige/VerstärkeEndgültig.pdf“ sind 9 Klassen unterschieden, die aber z. T. die Funktion bzw. den zu verstärkenden Inhalt betreffen. Zusätzlich sind dort aber viele ausführliche Details vorhanden.

hatte, um den Feind abzuwehren, u. a. Steinschleudern, Flaschenzüge und Haken, mit denen römische Schiffe hochgezogen werden konnten, um sie dann zerbersten zu lassen, sowie optische Vorrichtungen, um sie in Flammen zu setzen. Deshalb versuchte der Konsul ihn für Rom gewinnen, um mit ihm Roms Weltmacht weiter zu stärken. Doch hierzu war Archimedes nicht zu überzeugen und daher musste er sterben!

G-Verstärker nutzen die Multiplikation von zwei Veränderlichen: $c = a \cdot b$. Dabei ist c eine Konstante z. B. die Energie E . Mit dem Ändern einer Variablen ändert sich dann die andere entgegengesetzt (**Bild 69**). Dies gilt für **Hebel** (a), **schiefe Ebene** (b), **Keil** (c) und **Schraube** (d). Bei (a) unten folgt aus dem Weg x und der Kraft F die konstante Energie $E = x \cdot F$. Zu den unterschiedlich langen Hebellängen l_1 und l_2 gehören die Wege $x_1 > x_2$. Für die Kräfte gilt dabei $F_2 = F_1 \cdot x_1 / x_2$. Auch beim oberen, einseitig gelagerten Hebel tritt die Verstärkung für F_2 ein.

Bei der **schiefen Ebene** (b) wird die Fallgeschwindigkeit G in die Normalkraft zur geneigten Schiefe $F_N = G \cdot \sin(\alpha)$ und in die Kraft zur Beschleunigung der Kugel $F_H = G \cdot \cos(\alpha)$ gewandelt. So verlangsamte 1859 Gallilei für seine Experimente die Fallgeschwindigkeit und erhielt so leichter mit dem Pulsschlag messbare Zeiten. Die Wirkung des **Keiles** (c) wird mit dem Keilwinkel 2α von der senkrechten Druckkraft F_1 auf die sich seitlich auswirkende Kraft auf $F_2 = F_1 / 2 \sin(\alpha)$ verstärkt und treibt so leichter den Block nach beiden Seiten auseinander. Alle scharfen Messer – und ganz besonders die Skalpelle der Mediziner – schneiden auf diese Weise. Die **Schraube** wird mit einer Drehung von 180° um die Ganghöhe h vorangetrieben. An ihrem Rand wird dabei ein Weg von $b = 2\pi r$ zurückgelegt. Daher erfolgt eine Verstärkung um R/r bezüglich des Außenrandes der Schraube. Ergänzend sei noch erwähnt, dass auch die reziproke „Übersetzung“ möglich ist. Dann wird zwar weniger Kraft, dafür aber ein längerer Weg verfügbar. Darauf wird noch bei den Getrieben genauer eingegangen

Trotz des recht unterschiedlichen Aufbaus von **Zahnradgetrieben** ist die Verstärkung nur von den Zahnzahlen n auf ihrem Umfang abhängig (e). Die unterschiedlichen Aufbauten ermöglichen sowohl die Umwandlungen bezüglich Kraft und Weg als auch für Drehzahlen, Drehmomente, Kräfte, Drehrichtungen und Trägheitsmomente. Mit den zwei oberen und der zweiten links werden die Drehzahlen entsprechend dem Verhältnis der Zahnzahlen und reziprok dazu die Kräfte. Die weiteren zwei Beispiele ermöglichen auch eine Umwandlung zwischen Dreh- und Linearbewegung. Erheblich komplexer ist der Planetenantrieb (f, oben). Bei ihm zeigen die beiden Achsen in die gleiche Richtung. Das Drehzahlverhältnis ist durch die Anzahl der Zähne vom Sonnenrad n_1 zu Planetenrädern n_2 bestimmt. Eine einfache Variante des Ausgleichsgetriebes (f, unten) wird auch Differentialgetriebe oder vereinfacht Differential genannt. In Kurvenfahrten mit vierrädrigen Fahrzeugen kann damit die unterschiedliche Drehzahl der beiden hinteren, nichtgelenkten Räder ausgeglichen werden.

Die **Rollentechnik** ist recht einfach und sehr preiswert herzustellen. Für einen Transport kann sie raumsparend zerlegt werden. Bei allen Varianten kann das Seil bzw. der Riemen jedoch verschleiben und eventuell sogar zerreißen. Außerdem kann, wie bei den ähnlichen (analogen) Reibradantrieben, ein Schlupf auftreten. Die Übersetzung und die Kraftänderung entsprechen dem Verhältnis der Radien. Bei der festen Rolle wird nur die Kraftrichtung geändert. Bei der beweglichen Rolle werden die Kraft und reziprok dazu der Weg um den Faktor 2 geändert. Der Flaschenzug kann mit n festen und n beweglichen Rollen gestaltet werden. Mit $1/n$ ändert sich dann das Kraft- und Bewegungsverhältnis.

Bei **Transformatoren** ist das Produkt aus Spannung U und Strom I gemäß $N = U \cdot I$ konstant. Hier bestimmt das Verhältnis von der Primär- zur Sekundärwindungszahl die Stromübersetzung und reziprok dazu das Spannungsverhältnis. Das gilt ganz analog für einen angezapften Transformator. Beim Drehstrom sind drei Wicklungen notwendig. Die Stern- und die Dreieckschaltung verhalten sich dabei voll identisch. Beide ermöglichen den Betrieb sowohl bei 220 als auch 380 Volt. Bei der Sternschaltung kann bei einer Fernübertragung der Mittelanschluss weitgehend entfallen. Die

Phasenverschiebung zwischen den äußeren Anschlüssen beträgt 120°. Die Umrechnung zwischen beiden Schaltungen erfolgt gemäß:

$$l_1 = \frac{L_1 \cdot L_2 + L_2 \cdot L_3 + L_1 \cdot L_3}{L_1}; \quad l_2 = \frac{L_1 \cdot L_2 + L_2 \cdot L_3 + L_1 \cdot L_3}{L_2}; \quad l_3 = \frac{L_1 \cdot L_2 + L_2 \cdot L_3 + L_1 \cdot L_3}{L_3}$$

bzw.

$$L_1 = \frac{l_2 \cdot l_3}{l_1 + l_2 + l_3}; \quad L_2 = \frac{l_1 \cdot l_3}{l_1 + l_2 + l_3}; \quad L_3 = \frac{l_1 \cdot l_2}{l_1 + l_2 + l_3}$$

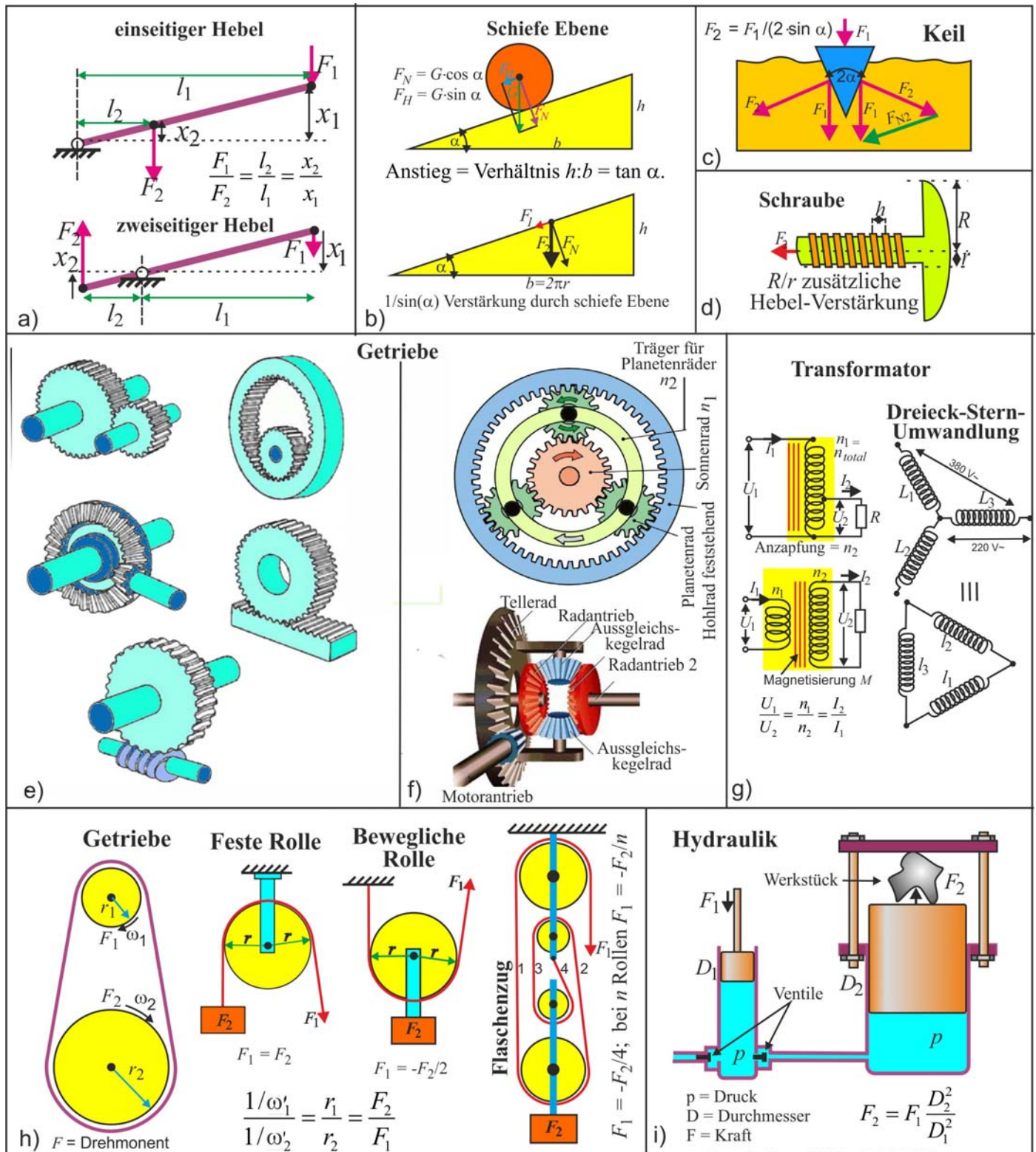


Bild 69. Die wichtigsten G-Verstärker

Deutlich anders funktioniert **Hydraulik**, die jedoch inkompressible Flüssigkeiten voraussetzt (i). Durch sie ist der Druck/Fläche in beiden Zylindern überall gleich groß. Infolge der unterschiedlichen Kolben-Durchmesser D_1 und D_2 gilt $F_2 = F_1 \cdot (D_2/D_1)^2$. Für große Kolbenhübe bei D_2 müsste der Kolben bei D_1 daher sehr lang sein. Das lässt sich durch ein Pumpen mittels der beiden Ventile vermeiden. So werden heute selbst riesige Baukräne mit wenig Leistung in die Höhe gehoben.

6.1.2. S-Verstärker mit Transistoren

Die S-Verstärker sind durch zwei Inhalte gekennzeichnet: Einmal wird die zur Verstärkung notwendige Energie gesondert zugeführt (**Bild 70b**). Außerdem werden nur elektrische oder elektronische zeitabhängige Signale $f(t)$ verstärkt. Dafür entstanden nacheinander drei typische Bauelemente welche die Fortleitung von Elektronen betreffen: um 1837 das Relais⁵², ab 1904 die Elektronenöhre und ab 1947 der Transistor⁵³. Von allen existieren mehrere Varianten. Relais werden heute fast nur noch als gesteuerte binäre Schalter eingesetzt [Völ89] S. 406ff. Elektronen-röhren kommen praktisch nicht mehr zur Anwendung (s. Fußnote S. 72 und [Völ74] S. 181. Allerdings gibt es stark abgewandelte Ausführungen, z. B. für Mikrowellen, extrem hohe Frequenzen und für Sonderanwendungen.

Für die Transistoren müssen die benutzten Festkörper nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit unterschieden werden: Leiter mit $<10^{-4} \Omega \cdot m$, Halbleiter von 10^{-4} bis $10^6 \Omega \cdot m$ und Isolatoren mit $>10^6 \Omega \cdot m$. Bei den Halbleitern, u. a. Germanium oder Silizium ist es möglich, durch Legierung mit anderen Elementen die Leitfähigkeit für Elektronen zu verändern oder durch Zusatz von anderen Elementen zu verändern. Das wird Dotieren⁵⁴ genannt. Je nachdem ob dabei zusätzliche Elektronen erzeugt werden oder ein Fehlen auftritt, Bei Elektronen im Leitungsband liegt dann n - und bei Löchern im Valenzband p -Leitung vor. Diese wichtige Grundlage der Transistoren wurde mittelbar, jedoch noch nicht verstanden, bereits beim Beginn des Rundfunks mit dem Detektor⁵⁵ benutzt. Ein Spitzenkontakt auf dem Kristall bewirkt einen pn -Übergang, der wie eine Diode die Hochfrequenz gleichrichtet.

6.1.3. Bipolar-Transistoren

Nur recht mittelbar ging aus dem Detektor der Transistor mit nutzbarer Verstärkung hervor. Zunächst entstand mit zwei, dicht beieinander liegenden Spitzen auf einem Germanium- bzw, Siliziumkristall der *Spitzentransistor* mit zwei pn -Übergängen. Er wurde sehr schnell durch den aus flüssigem Si gezogenen Flächen- bzw. Bipolartransistor mit einem $nnpn$ -Übergang ersetzt **Bild 71a**. Beim Anlegen der beiden Spannungsquellen ist in (a) und (b) der obere pn -Übergang leitend und der untere gesperrt. Dadurch entsteht im p -Bereich eine Sperrzone, die den Basisanschluss B erhält. In ihr werden die von oben, vom Emitter⁵⁶ her eingeschleusten Elektronen beschleunigt und gelangen so zum Kollektor⁵⁷ C. Dieses Geschehen ermöglicht das Analogbild (c) Vom Emitter E gelangt laufend Flüssigkeit in einen Behälter und fließt gegenüber ab. Entsprechend der Fallhöhe U_C wird als Verstärkung Energie gewonnen. Durch Verdunsten an der Oberfläche geht allerdings eine gewisse Flüssigkeitsmenge I_B für die Verstärkung verloren. Die besonders einfache Basisschaltung mit dem $nnpn$ -Transistor zeigt (d). Es gibt aber auch die Emitter- und Kollektorschaltung, bei denen E oder C das Bezugspotential (Masse-Verbindung) sind. Sie besitzen dann deutlich andere Verstärkereigenschaften, die jedoch erheblich schwieriger zu erklären sind [Völ89]. Auch die Variante pnp existiert nahezu gleichberechtigt. Doch bei ihrer Anwendung muss die Polung der Spannungsquellen umgetauscht werden.

⁵² Französisch *real*; Spätlatein *realis* sachlich, wesentlich, dinglich, Lateinisch *res* Sache, Ding, Wesen, Umstand

⁵³ Englisch Abkürzung von *transfer resistor* etwa gesteuerter Widerstand

⁵⁴ Lateinisch *donator* Geber, Spender von *dos* Mitgift, Gabe, *dare* geben, reichen, spenden und *donator* Geber, Spender, Stifter

⁵⁵ Lateinisch *detegere*, *detectum* abdecken, aufdecken, enthüllen

⁵⁶ Lateinisch *emittere* herausgehen lassen, ausschicken, Englisch *to emit* aussenden

⁵⁷ Lateinisch *collecta* Geldsammlung und *colligere* einsammeln Französisch *collecteur* Steuereinnahmer, Lottereeinnahmer

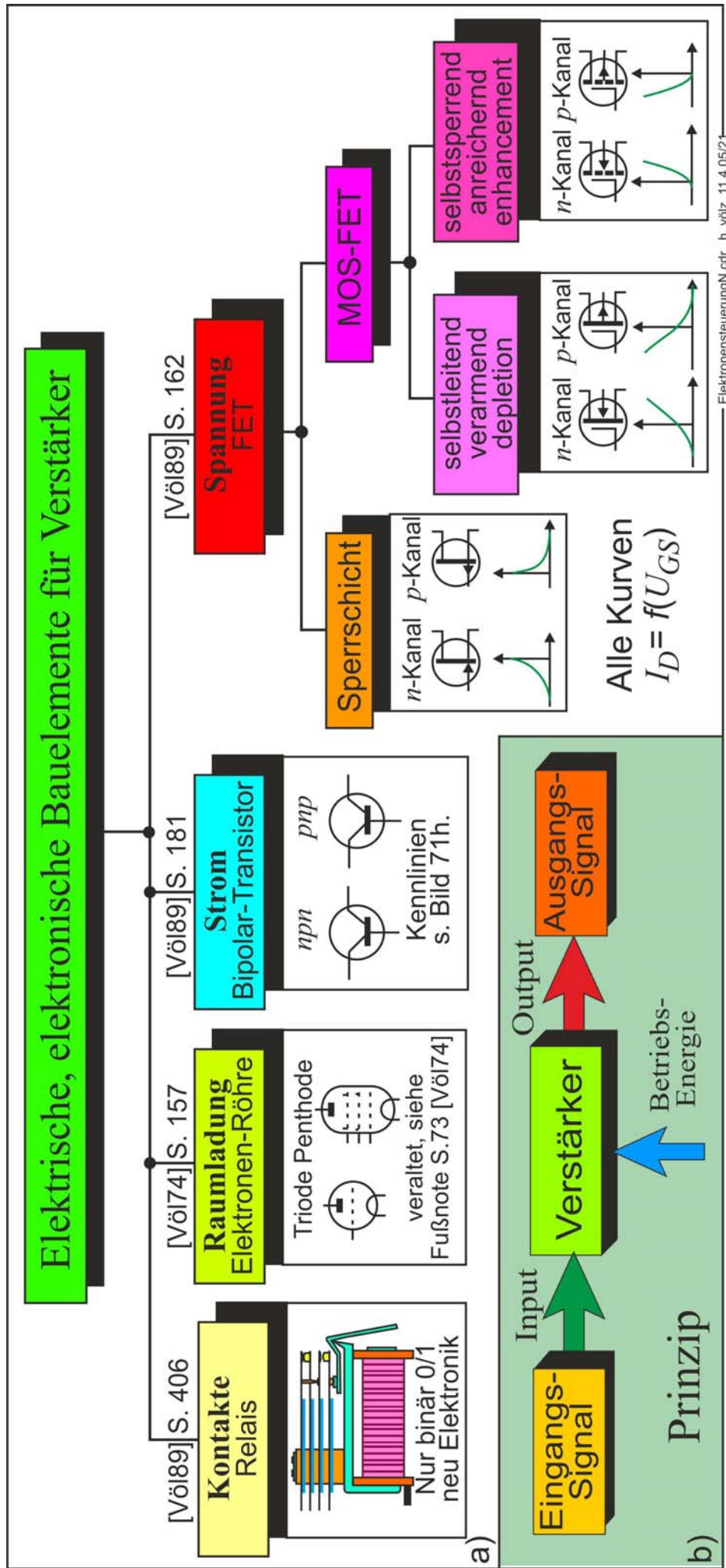


Bild 70 Bauelemente für elektrisch-elektronische P - Verstärker

Durch die Übertragung der einfachen *npn*-Anordnung (a) in die spätere entstandene integrierte Halbleitertechnologie (= Planar-Technologie) entsteht die Struktur (f). Die dort blau gekennzeichnete *n*-Zone – auch vergrabene Schicht genannt – dient nur der elektrischen Isolierung dieses Transistors gegenüber anderen auf der gleichen Halbleiterfläche erzeugten Transistoren. Bei der Produktion existiert zunächst der untere grüne *p*-Block als einheitlicher Kristall. Dann werden von der Oberfläche her die Strukturen durch mehrere, räumlich und mengenmäßig genau festgelegte Dotierungen erzeugt. Für die dabei erreichten Ladungsträgerdichten in der einzelnen Zonen gilt (g). Die erreichten typischen Kennlinien zeigt in den vier notwendigen Quadranten (h). Im Quadrant (I) gilt $I_C = f_2(U_{CE})$, in (II) $I_C = f_2(I_B)$ usw.

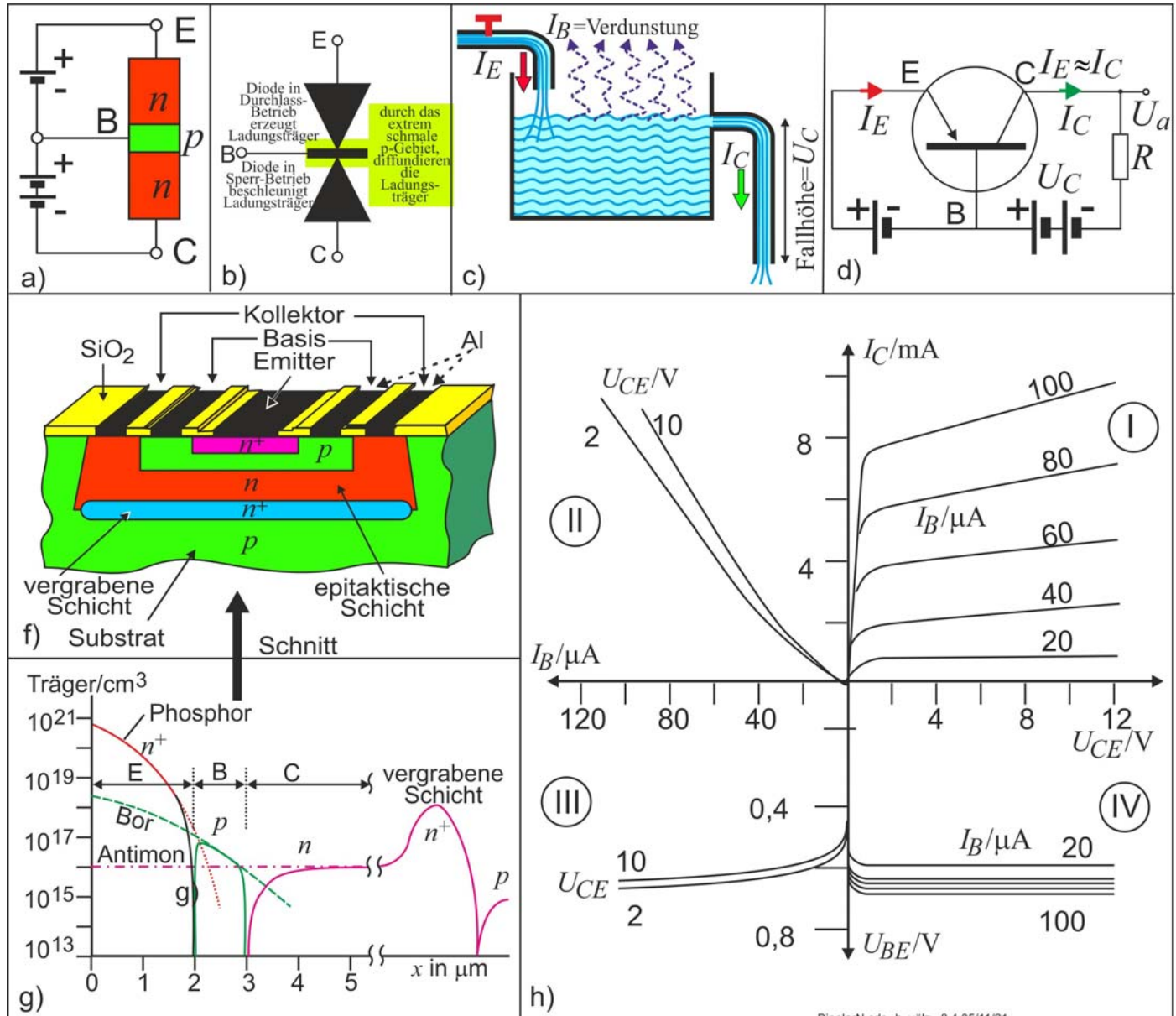


Bild 71. Zusammenfassung von Bildern für *npn*-Transistoren.

6.1.4. Feldeffekt-Transistoren

Für die Steuerung des Ausgangsstromes mit Verstärkung benötigt der bipolare Transistor Strom und damit Leistung. Doch bereits 1924 ermöglichte die Elektronenröhre eine leistungslose spannungssteuerung. Außerdem meldete bereits 1926 Julius Edgar Lilienfeld auf Grundlage der Drudeschen Elektronengastheorie das Prinzip eines FET (**F**eld-**E**ffekt-**T**ransistor) zum Patent an. Ein weiteres Patent erfolgte 1934 von Oskar Heil. Aber erst 25 Jahre und damit deutlich nach dem

bipolaren Transistor, nämlich um 1960 konnte ein MOS⁵⁸-FET technisch realisiert werden. Heute zählen FET in mehreren Varianten zu den besonders wichtigen Bauelementen der Mikroelektronik.

Beim *Sperschicht-FET* (SGFET) wird die trägerarme Zone des pn -Übergangs genutzt, sie wirkt daher fast wie ein Isolator und wird auch Sperschicht genannt. Den historischen Aufbau eines SGFET zeigt **Bild 72**. Ein dünner Zylinder aus n -leitendem Halbleitermaterial (rot) ist an beiden Enden für den Stromfluss kontaktiert. Die linke Seite heißt **Source**⁵⁹ S und dient der Stromzufuhr I_D . Auf der rechten Seite wird der Strom am **Drain**⁶⁰ D abgenommen. Zwischen beiden Anschlüssen entsteht der Spannungsabfall U_{DS} . Ein Teil des Zylinderumfangs ist p^+ -leitend dotiert (grün) und heißt **Gate**⁶¹ G. Hier wird die Spannung U_{GS} in Sperrrichtung angelegt. Bei Silizium ist der Sperrstrom $<10^{-9}$ A. Dazu gehört ein Eingangswiderstand um $10^9 \Omega$. Mit U_{GS} wird der Kanaldurchmesser d in Längsrichtung verändert. Im Schnitt zeigen das b) und (c). Als Folge wird der FET-Widerstand R_{SD} praktisch verlustfrei gesteuert. Das gilt aber nur so lange, wie $U_{DS} \ll U_{GS}$ ist. Insgesamt entstehen dabei die Kennlinien (d). Mit steigendem U_{DS} erfolgt auf der Drain-Seite schließlich eine nahezu vollständige Abschnürung des Kanals. Dann liegt der Abschnür- bzw. Sättigungsbereich vor, des auch Pinch-off-Effekt⁶² bezeichnet wird. Bei großen U_{DS} entsteht im Material des Kanals eine Feldstärke, welche Ladungsträger generiert. Dadurch geschieht ein Durchbruch (in d rötlich) mit steilem Stromanstieg. Da hierdurch der SGFET zerstört werden kann, ist dieser Bereich im Betrieb zu vermeiden. Besonders günstig sind alle Eigenschaften beim planaren Aufbau (e). Im Beispiel sind gegen über zuvor n und p vertauscht.

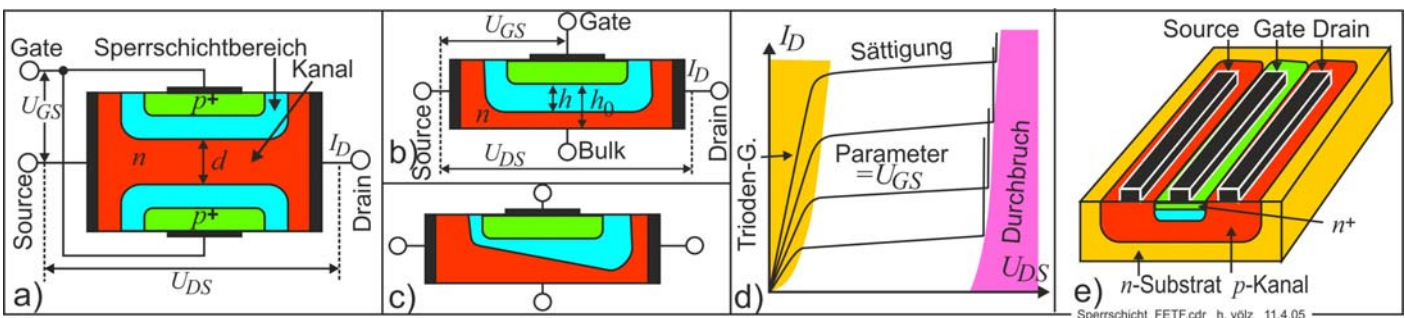


Bild 72. Vom historisch SGFET zum planaren Aufbau.

6.1.5. Die verschiedenen MOS-FET

Ein MIS-FET (**metal isolated semiconductor**⁶³) ist Vorläufer des heute fast ausschließlich benutzten MOS-FET (**m oxide s**). Er besteht aus einem n -leitenden Si-Kristall mit darüber isoliert angeordnetem Metall-Kontakt (**Bild 73a**). Beim MOS-FET (b) ist der n -leitende Kristall ähnlich einem n -Bipolar-Transistor durch die endseitig angeordneten pn -Übergänge ergänzt (b). Es bestehen aber zwei deutliche Unterschiede: Einmal sind beide pn -Übergänge so weit voneinander entfernt, dass keine Raumladungszone entstehen kann. Durch die vergleichsweise große Entfernung bis zu einigen nm ist sogar jede Wechselwirkung ausgeschlossen. Wenn an beiden n -Anschlüssen eine Spannung angelegt wird, dann kann daher kein Strom fließen. Denn je nach Polung der Spannung, ist immer einer der beiden pn -Übergänge gesperrt. Außerdem kann das Gebiet zwischen den beiden pn -Übergängen – so wie bei einem MIS-FET – beeinflusst werden. Für die Isolation zwischen Gate und p -Substrat genügen bereits 100 nm um eine Durchschlagsfestigkeit von 100 V zu erreichen. Der Isolationswiderstand beträgt ca. $10^{15} \Omega$. Durch die am Gate angelegte Spannung tritt im Kanalabschnitt gegenüber eine Ladungsträgerinversion, so dass ein p -Kanal wirksam wird. Es gibt auch die komplementäre pnp -Variante, bei der dann im Kanal ein p -Gebiet auftritt (p -Kanal-Typ).

⁵⁸ Englisch **metal oxide semiconductor**, Deutsch gebräuchlich Metall-Oxid-Silizium

⁵⁹ S **Source** Englisch Quelle.

⁶⁰ D **Drain** Englisch Abfluss, Abzug, Senke.

⁶¹ G **Gate**; Englisch Tor, Tür, Zugang, Eingang, Pforte.

⁶² **Pinch-off** Englisch *pinch* quetschen, klemmen, einengen, drücken, beschränken, beengen, off weg, weg, weit, fort

⁶³ Lateinisch *conductor* Mieter, Pächter und *semi* halb, das S wird zuweilen auch auf Silizium bezogen.

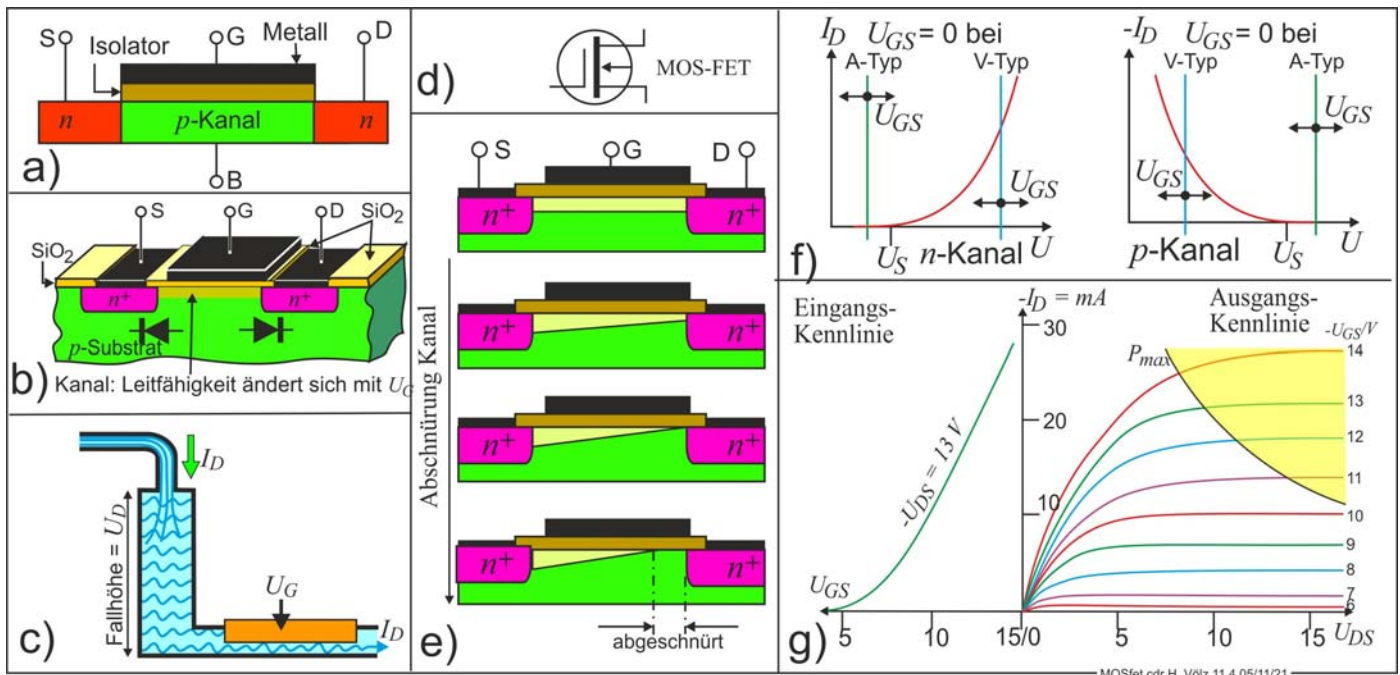


Bild 73. Aufbau, Eigenschaften und Kennlinien des MOS-FET

Beim MOS-FET entstehen ähnliche Eigenschaften, Kennlinien usw. wie bei einem SGFET. Die Vorteile des MOS-FET bestehen vor allem darin, dass infolge des isolierten Gates kein temperaturabhängiger Sperrstrom auftritt und das Gate sowohl mit einer negativen als auch einer positiven Spannung betrieben werden kann. Zuweilen wird der MOS-FET auch MIS-FET oder IGFET⁶⁴ genannt. Im Gegensatz zum Bipolar-Transistor heißt er auch Unipolar-Transistor, denn es kommt jeweils nur eine Trägerart vor: Elektronen beim *n*-Kanal-Typ und Löcher (=Defektelektronen) beim *p*-Kanal-Typ. Eine Sonderform ist der TFT (Thin-Film-Transistor; Dünnschichttransistor). Er wird in dünnen, polykristallinen Schicht aufgedampft oder in Dickfilmtechnik produziert. Bei den Kennlinien eines MOS-FET treten im Gegensatz zum SGFT mehr Einflüsse auf:

- Bei der Herstellung der SiO₂-Schicht durch Oxydation des Si wird im Isolator meist eine *positive Ladung* dauerhaft gebunden, was technologisch nur wenig zu beeinflussen ist.
- Metall und Halbleiter besitzen unterschiedliche, negative oder positive *Austrittsarbeiten*. Durch Materialwahl kann so die effektive Gate- und damit auch Schwellenspannung in beide Richtungen verlagert werden.
- An den Oberflächen des Halbleitermaterials können *Unregelmäßigkeiten des Kristallaufbaus* auftreten, die sich als Störterme auswirken, die eine Verlagerung des Nullpunkts der $I_D(U_{GS})$ -Kennlinie bewirken (f). Dabei können der *Anreicherungs*-Typ (links) und der *Verarmungs*-Typ (rechts) unterschieden werden. Je nachdem fließt bei $U_{GS}=0$ Strom oder nicht. Das Beispiel der Kennlinien vom Anreicherungstyp eines MOS-FET zeigt (g).

Auch die Arbeitsweise der FETs kann mittels einer Analogie zu Bild 71c verständlicher erklärt werden (c): Die Betriebsspannung des Kanals U_D bestimmt die Fallhöhe. Mit der Gate-Spannung U_G wird die Durchflussfähigkeit für den Strom I_D gesteuert.

Schließlich sei noch als Sondervariante der integrierten Technik CMOS (complementary metal oxide semiconductor) kurz erklärt. Sie kommt aber fast nur bei den Speicherschaltungen mittels Flipflop (FF) vor (**Bild 74**). Den üblichen FF in TTL-Technik (Transistor-Transistor-Logik) zeigt (a links). Dabei ist immer nur ein Transistor leitend, je nachdem ob 0 oder 1 gespeichert ist. Rechts ist der entsprechende MOS-FF gezeigt. In beiden Fällen fließt also immer ein beachtlicher Strom. Mit einer CMOS-Schaltung kann er fast vollständig vermieden werden (b). Dabei sind immer ein oberer Transistor und sein diagonal gegenüberstehender, komplementärer MOS leitend bzw. beide

⁶⁴ insulated lateinisch *insularis* eine Insel, Inseln betreffend.

gesperrt. So fließen immer nur die zwei Restströme der gesperrten Transistoren. Stark vereinfacht kann das durch vier Schalter schematisiert werden (c). Der Speicher verbraucht also nur beim Umladen der Leitungskapazitäten $0 \leftrightarrow 1$ Strom. In diesem Sinne hat sich auch das Schaltzeit-Leistungsprodukt der Speicherzellen im Laufe der Entwicklungen stark verändert (e). Schließlich ist in (f) noch die integrierte Struktur von den beiden CMOS-Transistoren dargestellt.

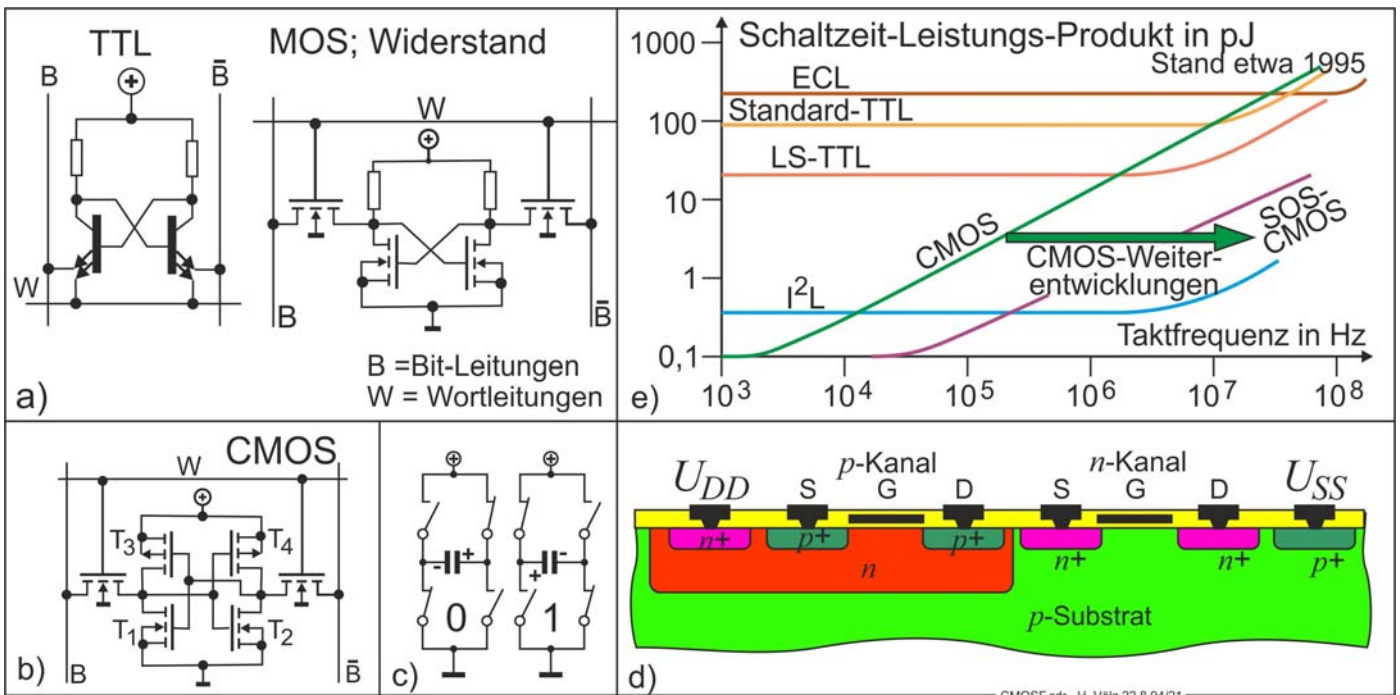


Bild 74. Anwendung der CMOS-Technik bei den Flipflops für digitale Speicher

6.1.6. Betriebsarten elektronischer Verstärker

Es werden nur zwei ausgewählte Verstärker-Anwendungen behandelt:

- Bei den **Signal-Verstärkern** sind die Ein- und Ausgangs-Signale sehr klein und damit gegenüber der notwendigen Hilfsenergie unwesentlich. Daher können sie unabhängig von der Hilfsenergie betrachtet werden. Sie existieren in vielen Varianten. Hier werden nur Varianten des *Operationsverstärker* betrachtet. Ansonsten sind vor allem Frequenzumsetzer (Mischung), Varianten für hohe Frequenzen und störarme Ausführungen wichtig.
- **Leistungs-Verstärker** müssen beim *Ausgangssignal* eine erhebliche *Energie* bereitstellen. Daher sind andere Energieverluste mit Ausnahme der Umwandlung in Wärme kaum zu beachten. Meist ist eine zusätzliche Kühlung erforderlich. Wesentlich ist jedoch der Wirkungsgrad zwischen Hilfs- und Ausgangsenergie. Das erfordert spezielle **Schaltungen** und **Betriebsweisen** (A bis C). Mittelbar können hierzu auch die Regler- und Steuerungsschaltungen gezählt werden (s. Abschnitt ###).

Operationsverstärker (OV) sind ursprünglich für die Analogrechner entstanden und werden hier immer noch vielfach genutzt. Dargestellt werden sie meist als ein Dreieck mit zwei Eingängen und einem Ausgang (**Bild 75**). Ihr innerer Aufbau besteht aus mehreren, oft hoch komplex verschalteten Transistoren, was gewöhnlich nicht mitgeteilt wird. Details enthält u. a. aber [Völ89], S. 573ff. Aus der Differenz der beiden Eingangsspannungen U_{e1} und U_{e2} entsteht dann meist mit recht großer Verstärkung V die Ausgangsspannung

$$U_a = V \cdot (U_{e2} - U_{e1}).$$

Besonders übersichtlich ist der typischen *Umkehrverstärker* (b). Seine Verstärkung ist nur durch R_1 und R_2 zu $V = R_2/R_1$ bestimmt. Mit mehreren Eingangswiderständen ist ganz analog eine Summenbildung (e) möglich. Wird einer der beiden Widerstände durch einen Kondensator ersetzt, so ent-

steht ein Integrierer (a) bzw. Differenzierer (d). Mit den dazugehörenden Grenzfrequenzen f_u bzw. f_o gilt dabei

$$u_A = -\frac{1}{RC} \int u_E dt; \quad f_u = \frac{1}{2\pi VRC} \quad \text{bzw.} \quad u_A = -RC \frac{du_E}{dt}; \quad f_o = \frac{V}{2\pi RC}.$$

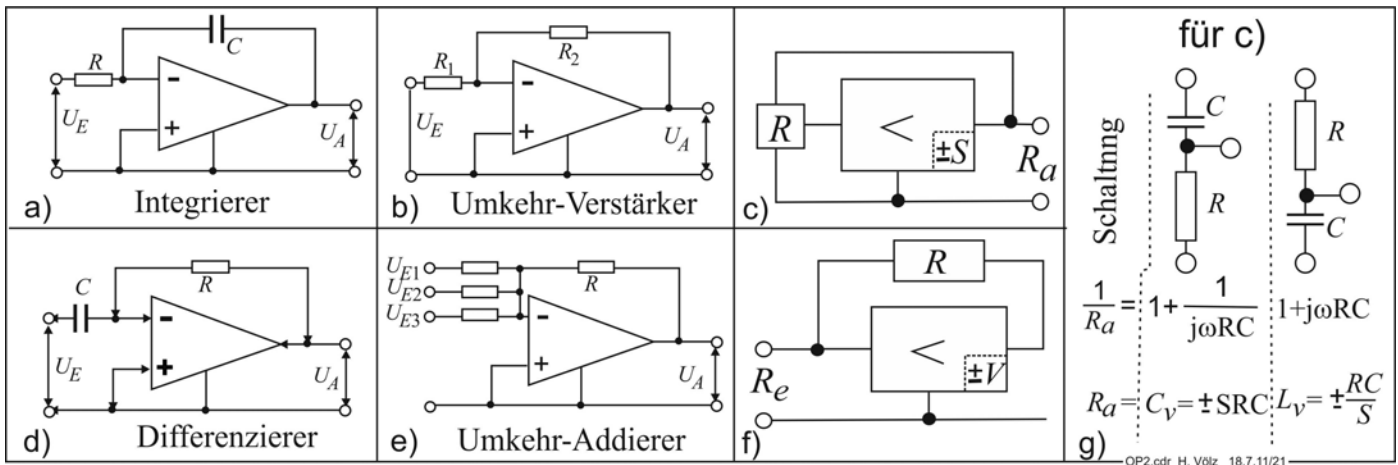


Bild 75. Aufbaudetails und wichtige Beispiele für Anwendungen der Operationsverstärker.

Es gibt noch mehrere weitere Anwendungen. In [Völ89] sind 12 Varianten zusammengestellt, darunter Strom-Spannungs- und Spannungs-Strom-Konverter, Strommesser, lineares Ohmmeter, Elektrometer-Verstärker, Impedanzwandler sowie logarithmisch wirkende Schaltungen für Strom oder Spannung. Besonders vorteilhaft ist bei ihnen der konstant einstellbare Verstärkungsfaktor. Hier seien noch die mit ihnen erzeugbaren Blindwiderstände ergänzt. Sie treten unterschiedlich am Eingang und Ausgang auf. Für die Ausgangswiderstände gilt (c). Je nach ihrer Anordnung (g) entsteht eine virtuelle Induktivität L oder Kapazität C . Ihre Größe und Vorzeichen können über die Steilheit S entsprechend der Stärke und dem Vorzeichen der Rückkopplung verändert werden. Sie besitzen dabei immer einen gewissen Realanteil, der in (g) nicht besonders hervorgehoben ist. Für den komplexen Eingangswiderstand gilt bei R real, induktiv oder kapazitiv:

$$R_e = R \frac{1}{1 \pm V}, \quad R_{e,L} = \frac{j\omega L}{1 \mp V} \quad \text{bzw.} \quad R_{e,C} = \frac{1}{j\omega C(1 \pm V)}$$

Die zulässige Verlustleistung eines Transistors ist auf wenige Watt begrenzt. Deshalb kann auch ein Leistungsverstärker nur wenige Watt Nutzleistung erzeugen. Für höhere Werte sind mehrere, meist zwei Transistoren und spezielle Schaltungen mit hohem Wirkungsgrad erforderlich. Besonders bewährt haben sich die Gegentaktschaltungen. Zunächst wurden sie mit zwei gleichen Transistoren und einem Transformator zur Zusammenfassung und Anpassung an den Verbraucher – meist einen Lautsprecher – realisiert (**Bild 76a**). Die beiden Eingangsspannungen u_g und $-u_g$ müssen also gegenphasig angelegt werden. Die Weiterentwicklung führte dann zur Schaltung (b). Doch ohne Eingangssignal existiert ein recht hoher Ruhestrom durch T_1 und T_2 . Da außerdem von der Transistorkennlinie nur der annähernd lineare Bereich genutzt werden kann (e), wird nur ein geringer mittlerer Wirkungsgrad erreicht. So entstand neben diesem A- der B-Betrieb, der allerdings starke Signalverzerrungen erzeugt (g). Ein brauchbarer Kompromiss ist der AB-Betrieb. Hier werden die Arbeitspunkte beider Transistoren T_1 und T_2 so gewählt, dass sich die beiden stark verzerrten Einzelsignale zu einem verzerrungsarmen Summensignal zusammensetzen (f). Lediglich bei Hochfrequenzsendern gibt es noch den C-Betrieb mit sehr hohem Wirkungsgrad, aber sehr starken Verzerrungen. Doch für die nur eine genutzte Frequenz bleiben die Oberwellen unwirksam. In (c) sind die Arbeitspunkte für die verschiedenen Betriebsarten aufgezeigt. Ihre Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Aussteuerungen zeigt d). Der D-Betrieb ist nur digital möglich und führt zum hoch komplexen D-Verstärker, der bereits zum nächsten Abschnitt überleitet.

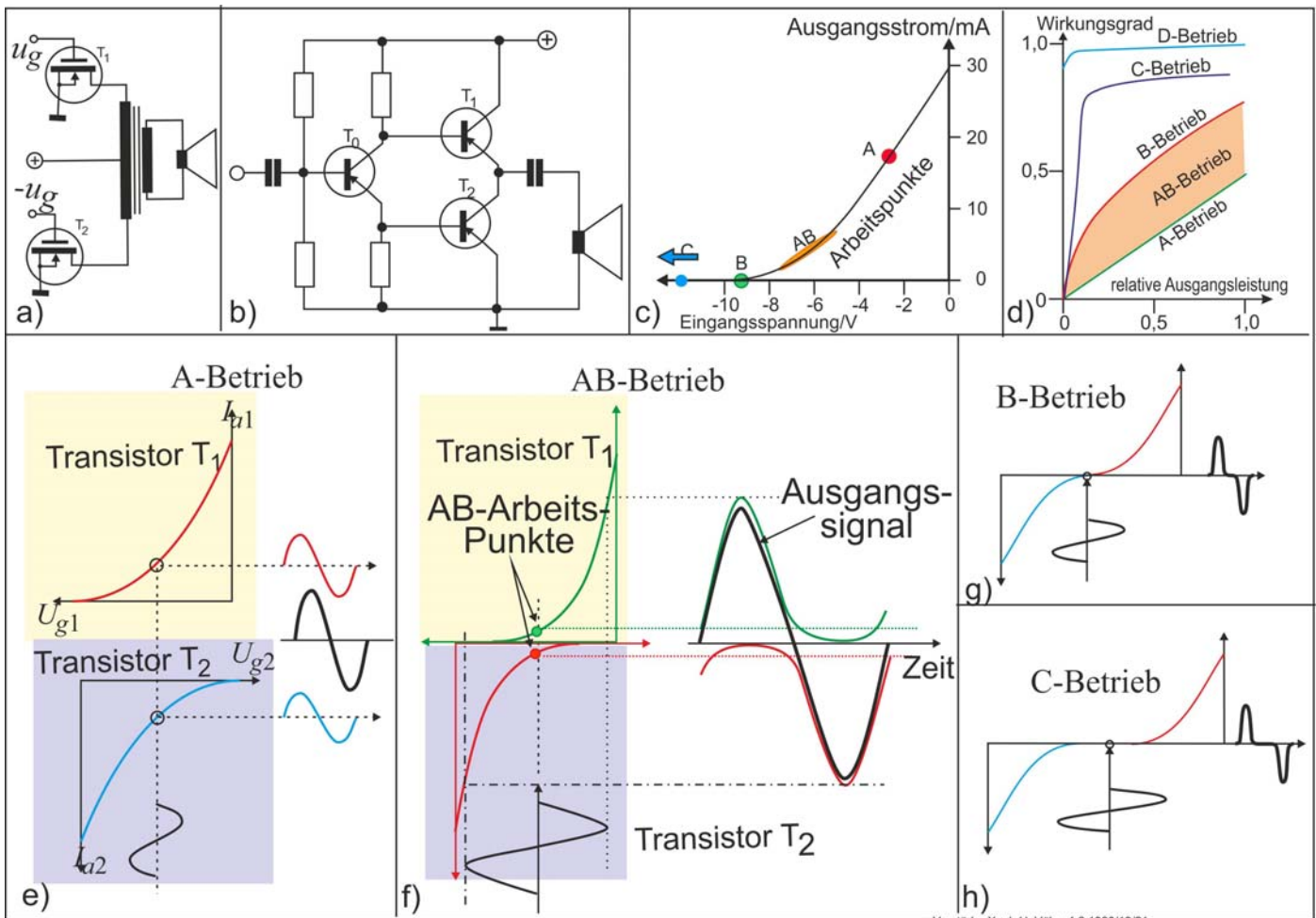


Bild 76. Beispiele für die verschiedenen Gegentaktschaltungen.

Die zulässige Verlustleistung eines Transistors ist auf wenige Watt begrenzt. Deshalb kann auch ein Leistungsverstärker nur wenige Watt Nutzleistung erzeugen. Für höhere Werte sind mehrere, meist zwei Transistoren und spezielle Schaltungen mit hohem Wirkungsgrad erforderlich. Besonders bewährt haben sich die Gegentaktschaltungen. Zunächst wurden sie mit zwei gleichen Transistoren und einem Transformator zur Zusammenfassung und Anpassung an den Verbraucher – meist einem Lautsprecher – realisiert (**Bild 76a**). Die beiden Eingangsspannungen u_g und $-u_g$ müssen also gegenphasig angelegt werden. Die Weiterentwicklung führte dann zur Schaltung (b). Doch ohne Eingangssignal existiert ein recht hoher Ruhestrom durch T_1 und T_2 . Da außerdem von der Transistorkennlinie nur der annähernd lineare Bereich genutzt werden kann (e), wird nur ein geringer mittlerer Wirkungsgrad erreicht. So entstand neben diesem A- der B-Betrieb, der allerdings starke Signalverzerrungen erzeugt (g). Ein brauchbarer Kompromiss ist der AB-Betrieb. Hier werden die Arbeitspunkte beider Transistoren T_1 und T_2 so gewählt, dass sich die beiden stark verzerrten Einzelsignale zu einem verzerrungsarmen Summensignal zusammensetzen (f). Lediglich bei Hochfrequenzsendern gibt es noch den C-Betrieb mit sehr hohem Wirkungsgrad aber sehr starken Verzerrungen. Doch für die eine genutzte Frequenz bleiben die Oberwellen unwirksam. In (c) sind die Arbeitspunkte für die verschiedenen Betriebsarten aufgezeigt. Die Wirkungsgrade für die Betriebsarten bei unterschiedlicher Aussteuerung zeigt noch d).

Der D-Betrieb erfolgt betont digital und wird durch einen speziellen D-Verstärker realisiert. Infolge seiner hohen Komplexität leitet er auch mittelbar zum späteren Abschnitt 5.1.8 über. Sein Prinzip ist schon recht lange bekannt, war aber vor der breiten Anwendung der Digitaltechnik technisch nicht nutzbar. Daher steht D primär auch nicht für digital, sondern ist eine schlichte Fortzählung von A über B und C. Seine Wirkungsweise zeigt **Bild 77**. Es benutzt primär Rechteckschwingungen, bei denen die Flanke zwischen der positiven und negativen Spannung systematisch verschoben wird (b). Mit der Lage der Flanken ändert sich der Gleichwert des Rechteckimpulses.

Das zu verstärkende Signal wird einem Komparator zugeführt, der auch mit einer periodischen Sägezahnswingung versorgt wird (a). beide Frequenzen müssen allerdings wesentlich höher als die höchste Signalfrequenz sein. Die Rechteckimpulse erzeugen bei den Sägezähnen zunächst die schwarz gekennzeichneten Schaltpunkte. Durch eine Tiefpassfilterung folgt schließlich das grüne Signal (c), als erheblich verstärktes Eingangssignal. Da der Schaltverstärker dabei nur Strom oder keinen Strom ausgibt, wird die gesamte Hilfs- bzw. Gleichleistung in Wechselleistung umgesetzt. Das bewirkt einen hundertprozentigen Wirkungsgrad. Während beim AB-Betrieb mit integrierten Schaltkreisen kaum 10 Watt Ausgangsleistung zu erreichen sind, sind so erheblich größere Werte möglich. Außerdem hängt die Linearität des Ausgangssignals nur von der Linearität des Sägezahns ab. Ergänzend sei nur noch die Analogie zwischen dem D-Verstärker und Hochfrequenzvormagnetisierung bei der Magnetbandaufzeichnung erwähnt, s. [Völ07] S. 343.

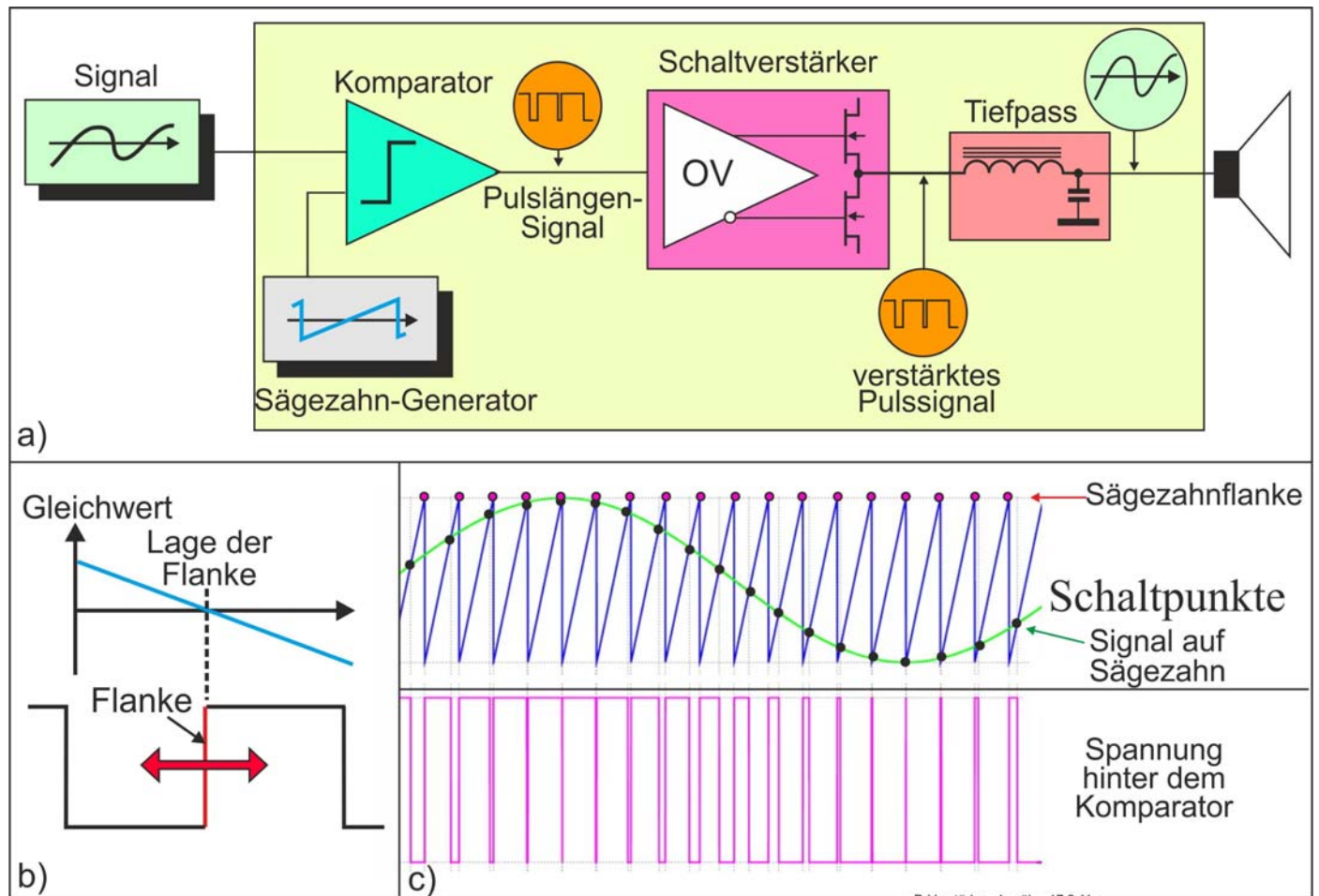


Bild 77. Zur Wirkungsweise eines D-Verstärkers

6.1.7. Transistorgeschichte

- 1925 Julius Edgar Lilienfeld (1881 - 1963) meldet elektronisches Bauelement (*FET*) an
- 1934 Oskar Heil konstruiert und patentiert ersten *FET mit isoliertem Gate*
- 1939 Konzept von Shockley für einen FET
- 1947 William Bradford Shockley (1910 - 1989) und John PEARSON (1908 - 1991) funktionierenden *Bipolar-Spitzen-Transistor* Bell Labs
- 1948 John R. Pierce prägt *Begriff Transistor*
- 1948 Patentanmeldung für europäische Erfindung „*Transistron*“
- 1955 Beginn der *Planartechnik*
- 1956 Shockley, John Bardeen (1901 - 1991) und Walter Houser Brattain (1902 - 1987) Nobelpreis für Physik
- 1959 Atella und Kahng entwickeln bei Bell Labs MOSFET, isoliertes Gate für FET
- 1960 erster *MOSFET*

1962 P. Weimer entwickelt *Dünnschichttransistoren* (thin film transistor, **TFT**)

1963 Fairchild teilt CMOS-Konzept mit

1966 Carver Mead entwickelt *Feldeffekttransistor* (MESFET) mittels **GaAs**

6.1.8. Beispiele für komplexe Verstärker

Es gibt eine sehr große Vielfalt komplex aufgebauter Verstärker bzw. solche, die recht komplex zusammenhängende Funktionen benutzen. Davon kann hier nur eine kleine Auswahl behandelt werden und zwar vor allem die parametrischen, die mit speziellen Hilfsfunktionen und mehrstufig wirkende behandelt werden. Einige weitere, die hauptsächlich zur Schwingungserzeugung benutzt werden, folgen erst im Abschnitt #####

Beim **parametrischen Verstärker (Bild 88)** werden vorrangig *pn*- oder Impatt-Dioden sowie MIS-Variaktoren oder Schottky-Kontakte als Kapazitäten benutzt, deren Wert sich dann mit der angelegten Spannung ändert (c bis e). Sie werden mit der doppelten Frequenz f_p der eigentlichen Schwingung f_s so geändert, dass eine Verstärkung auftritt. Da die Schaltung wie ein negativer Widerstand wirkt, steigt die Amplitude exponentiell mit der Zeit (f). Es besteht eine Ähnlichkeit zur Pendelrückkopplung (s. #####). Durch die nicht mehr exakten sinusförmigen Signalschwingung treten auch Vielfache der Summen- und Differenzfrequenzen auf: $f_x = n \cdot f_p \pm m \cdot f_s$. Technisch ist es besonders schwierig die so genannte Idler-Frequenz $f_i = f_p - f_s$ ausfiltern.

Ins Anschauliche übertragen entspricht ein parametrischer Verstärker dem Schaukeln (h). An den Stellen des höchsten Ausschlages wird der Körperschwerpunkt durch in die Hockegehen bzw. sich Ausstrecken so verlagert, dass der Ausschlag zunimmt. Allein mit diesen Bewegungen kann aber die Schaukel nicht von der Ruhe in Bewegung gebracht werden. Hierfür sind die Körperverschiebungen (j) erforderlich.

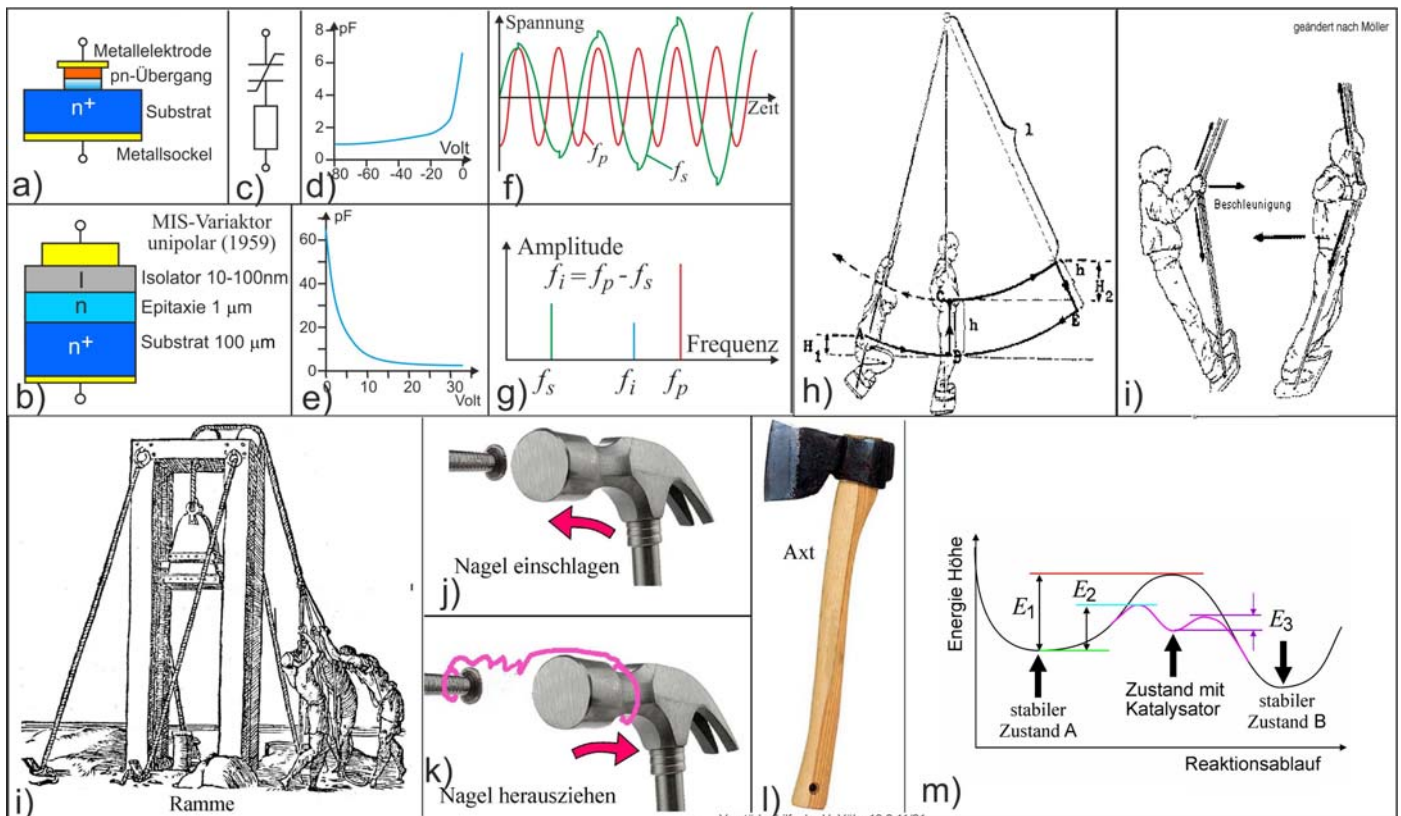


Bild 88. Beispiele und Schwingungen für parametrische Verstärker und jene mit Hilfsenergien.

Gut ausgewählte, genau definierte **Impulse** bieten die Möglichkeit, eine Verstärkung zu vergrößern. Dabei besteht auch die Möglichkeit, eine Integration über die Zeit einzubeziehen.. Die Energie eines Impulses (umgangssprachlich Wucht oder Schwung) leitet sich dabei aus der Masse m und deren Geschwindigkeit v ab:

$$p = m \cdot v.$$

Die hierzu gehörende kinetische (Bewegungs-) **Energie** beträgt (in $\text{N}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m/s}$:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2.$$

Beim dem freien Fall einer Masse m im Erdfeld mit der Erdbeschleunigung $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ entsteht bei einer Fallhöhe h die Geschwindigkeit (f)

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}.$$

Dazu gehören der Impuls $p = m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ und die Energie $E_{\text{kin}} = m \cdot g \cdot h$. Trifft dabei die Masse auf einen festen, harten Gegenstand, so wird die Geschwindigkeit momentan auf Null abgebremst. Dadurch wird diese Energie zusätzlich auf den Gegenstand als Impulsverstärkung übertragen. Dieses Prinzip der *Ramme* (f) wurde erst relativ spät erkannt und erstmalig 1475 erwähnt. Ursprünglich dürfte es in Kriegen zur Zerstörung von Festungen eingesetzt worden sein. Heute gibt es verschiedene Rammen, die sich hauptsächlich durch den „Antrieb“ unterscheiden, u. a. Schlag-, Dampf-, Explosions-, Pressluft-, Diesel- und Hydraulik-Rammen. Bei einer Vibrations-Ramme werden die Schläge periodisch wiederholt.

Während die übliche Ramme die Schwerkraft nutzt, wird beim *Hammer* die manuell erfolgende Bewegung aufaddiert (j). Dieses Prinzip dürfte schon in der frühen Steinzeit genutzt worden sein. Mittels einer Schnur kann so auch ein Nagel herausgezogen werden (k). Bei der *Axt* kommt durch die scharfe Schneide im Sinne des Keils (Bild 69c) hinzu. Für die Steinaxt existieren bereits Funde um mindesten 6 000 v. Chr.

Ein **Katalysator** ist ein Stoff, der allein durch seine Anwesenheit die chemische Reaktionsgeschwindigkeit zwischen Stoffen erhöht, ohne dabei verbraucht zu werden. Dabei wirkt er intermediär auf die Reaktanten. Wenn das Produkt entstanden ist liegt er wieder unverändert vor und der Zyklus kann viele Male durchlaufen werden. Biochemische Prozesse werden analog durch **Enzyme** katalysiert. Bereits 1835 erkannte Jöns Jakob Berzelius das Prinzip. Das Verständnis der thermodynamischen Ursachen gewann 1895 Wilhelm Ostwald und erhielt dafür den Nobelpreis für Chemie. Es wird lediglich zwischendurch ein anderer kinetischer Weg gebahnt (m). Statt der Energie E_1 genügen E_2 und E_3 . Statt des schwarz gezeichneten Weges wird dann der rot gezeichnete durchlaufen. Eigentlich sollte z. B. die Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff unmittelbar ablaufen. Jedoch wegen der hohen Aktivierungsenergie ist die Reaktion stark gehemmt und erfolgt nur sehr geringfügig. Ein Platin-Katalysator erniedrigt sie so stark, dass sie selbst bei niedrigen Temperaturen schnell abläuft. Fast alle lebensnotwendigen chemischen Reaktionen laufen katalysiert ab (z. B. bei der Photosynthese, Atmung oder Energiegewinnung aus Nahrung). Die meist benutzten Katalysatoren sind Eiweiße als Enzyme. Auch bei technischen Anwendungen sind Katalysatoren oft unentbehrlich. Einige wichtige katalytische Verfahren zeigt die Tabelle:

Verfahren	Produkt	Katalysator	Bedingung
Haber-Bosch	NH_3	a-Eisen/ Al_2O_3	$T = 450 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 25 - 40 \text{ MPa}$
Methanolherstellung	CH_3OH	$\text{CuO/Cr}_2\text{O}_3$, $\text{ZnO/Cr}_2\text{O}_3$ oder CuO/ZnO	$T = 210 - 280 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 6 \text{ MPa}$
Kontaktverfahren	H_2SO_4	$\text{V}_2\text{O}_5/\text{Träger}$	$T = 400 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$
Ostwaldverfahren	HNO_3	Platin/Rhodium	$T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

Durch **vielfache Wiederholungen** des Signals – mehrere Beispiele fasst **Bild 89** (S.93) zusammen – können sehr große Verstärkungen erreicht werden. Dazu wird der Signalwert N_0 mit dem Faktor α verstärkt wieder zu dem Eingang zurückgeführt. Für eine fortlaufende Wiederholung gilt dann

$$N_{k+1} = \alpha \cdot N_k.$$

(Die Rückkopplung wird noch allgemein im Abschnitt #### behandelt). Für die Folge der so verstärkten Signalwerte gilt dann die Differentialgleichung

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot N(t).$$

Mit den Startwerten t_0 und N_0 führt die Integration zum exponentiellen Wachstum

$$N = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot (t - t_0)}$$

Ein Abbruch der kann gesteuert bei $t_{\max}$ oder nach x Schritten, aber auch durch Ressourcen M als begrenztes Wachstum erfolgen, dann gilt

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot N(t) \cdot \frac{M - N(t)}{M}$$

Durch die Wiederholungen wird insgesamt die Verstärkung $V_{\max}$ erreicht.

Für eine wiederholte Verstärkung ist der Sekundärelektronenvervielfacher (**SEV**) besonders einfach. Er benutzt spezielle Elektroden. Wenn auf sie Elektronen mit einer bestimmten Energie auftreffen, so schlagen aus der Oberfläche mehrere Sekundärelektronen heraus (Bild 89a). Diese Stoßionisation besitzt große Ähnlichkeit zu Wassertropfen, die beim Auftreffen auf eine Wasseroberfläche deutlich mehr Wasser Hochschleudern. Das Verhältnis von der herausgeschleuderten zur auftreffenden Elektronenzahl wird Ausbeutefaktor δ genannt. Er hängt u. a. von der Energie des Primärelektrons ab. Dabei sind grob drei Stoffarten zu unterscheiden:

- $\delta < 1$, Alkali- und Erdalkalimetalle sowie Kohlenstoff (Graphit).
- $1 < \delta < 2$, die meisten Metalle.
- $\delta > 2$. Metalloxide, -chloride und -legierungen ($\text{BeO} \approx 10$, $\text{Mg} \approx 8$, $\text{NaCl} \approx 6$, $\text{GaP-Cs} \approx 5$, $\text{Cu-Mg} \approx 13$, $\text{Ni-Be} \approx 12$, $\text{Al-Cu} \approx 10$).

Beim SEV werden die Oberflächen systematisch so angeordnet, dass sich die Reflexionen fortlaufend erhöhen (a). Im Beispiel wird das Primärelektron durch ein Signalphoton ausgelöst. Derartige **Photomultiplier** besitzen oft tausendfache Verstärkung.

Das wohl älteste Prinzip ist die **Pendelrückkopplung**, auch Pendelaudio oder Super-Regenerativ-Empfänger genannt. Bereits 1920 wurde es von Edwin Armstrong für die sehr große Erhöhung der Empfindlichkeit von Audioschaltungen entwickelt und genutzt. Wegen der unerwünschten Ausstrahlung seiner Pendelschwingungen verschwand sie mit dem Fortschritt der Röhrentechnik. Jedoch 1950 kam sie wieder kurzzeitig bei der Einführung des UKW-Rundfunks mit einem Transistor zum Einsatz,

In der Schaltung (b) erfolgt die Rückkopplung vom Drain des Transistors zurück auf die Hochfrequenzspulen, die mit dem Drehkondensator auf den zu empfangenden Sender abgestimmt werden. Zum Gate wird außerdem eine periodische Rechteckschwingung > 20 kHz eingefügt (d). Sie schaltet die Verstärkung des Transistors immer nur während der negativen Halbwelle ein (d). Vor dem Einschalten liegt dann ein nur sehr kleines Sendersignal vor (c). Durch die Rückkopplung wird es fortlaufend exponentiell verstärkt. Am Ende der negativen Rechteckspannung erreicht sie ihr Maximum und wird dann unterbrochen (c). So entstehen die exponentiellen Einzelverläufe (e), die jeweils proportional zur jeweiligen Sendeamplitude am Beginn der negativen Rechteckflanke sind (f). Der Kondensator am Transistorausgang überbrückt die HF und es verbleibt nur die aufmodulierte NF (g).

Bei der **Wanderfeld-Röhre** (Travelling Wave Tube, TWT) wird zur Vervielfachung die Wechselwirkung zwischen einem Elektronenstrahl und bewegtem elektrischem Feld genutzt (Prinzip h, bildlich i, Schaltung j). In der Wendel breitet sich das elektrische Feld mit fast Lichtgeschwindigkeit ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s) aus. Die Strahlelektronen fliegen dagegen erheblich langsamer, z. B. bei 1 kV Beschleunigung mit nur $v_e \approx 7 \cdot 10^6$ m/s. Deshalb wird die Feldausbreitung mittels eines spiralförmigen Leiters (Helix) auf eine v_h reduziert, die nur wenig kleiner als v_e ist. Außerdem wird der Elektronenstrahl mit einem statischen Magnetfeld von $\approx 0,1$ Tesla gut fokussiert durch Helix geleitet. So übertragen die bewegten Elektronen Energie auf die Helix und verstärken ein dort vorhandenes Signal. Wegen $v_e < v_h$ tritt der Cerenkov-Effekt auf und es werden Pakete (bunches) erzeugt. Die Ein- und Auskopplung der Signale erfolgt coaxial bei den Hohlraum-Resonatoren oder mit Hohlleitern. Die TWT arbeiten im Bereich von 1 bis 20 GHz und trotz der großen Verstärkung (> 20 dB) sehr breitbandig ≈ 300 MHz. Die hohe Verstärkung kann leicht durch auf der Wendel zurücklaufende Signale

zur Selbsterregung führen, Dagegen wird in der Röhrenmitte ein Dämpfungsglied eingefügt. Leider ermöglichen TWT nur kleine bis mittlere Ausgangsleistungen.

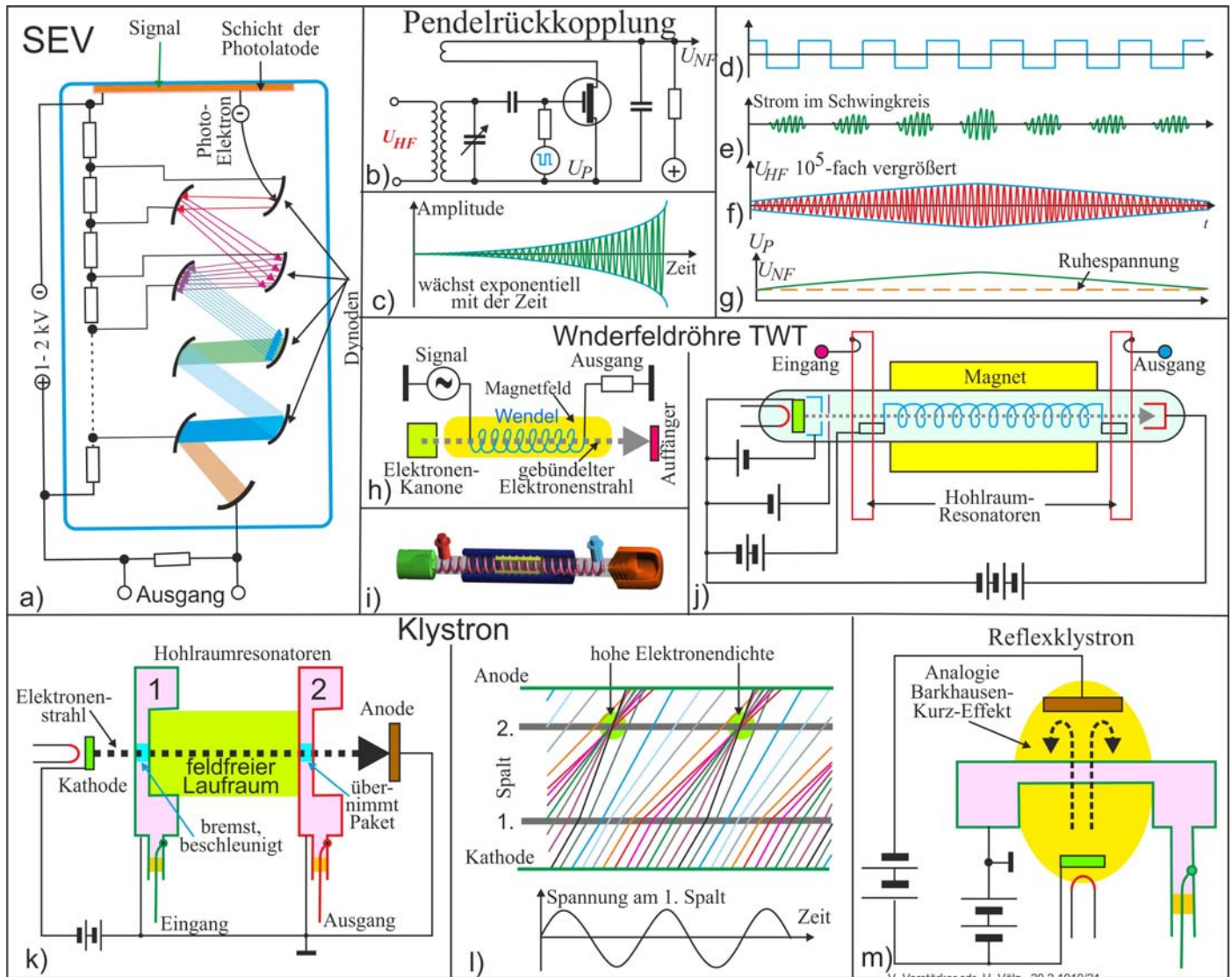


Bild 89. Beispiele für mehrfache Signalverstärkungen.

Das **Zwei-Kammer-Klystron**⁶⁵ (Triftröhre) wurde 1958 von W. T. READ erfunden. Es benutzt ähnliche Laufzeiteffekte wie das TWT. Im Wesentlichen besteht es aus einer Elektronen-Strahl-Kanone und zwei Hohlraum-Resonatoren (k). Die Elektronen durchfliegen nacheinander die beiden Resonatoren. Das aktuelle Feld im ersten Resonator beschleunigt oder bremst ihre Geschwindigkeit. Während der Laufzeit (in der Driftstrecke) überholen die schnellen Elektronen die langsamen und es entsteht ebenfalls eine *Dichtemodulation* des Elektronenstrahls (l). Im zweiten Resonator regnen die Elektronen-Pakete (bunche) die Resonanz⁶⁶ im bewirken eine deutlich verstärkte Schwingungen an, die dann ausgekoppelt wird. Das typische Kennzeichen sind auch hier die Elektronen-Pakete während der Laufzeit. Ein **Reflexklystron** (m) benötigt nur einen Hohlraum-Resonator. Durch eine Anode mit negativer Spannung werden die Elektronen ähnlich wie beim Barkhausen - Kurz-Effekt (s. Abschnitt ###) reflektiert. Dennoch entstehen dabei Elektronen-Pakte, die dann aber erneut und verstärkend auf den einzigen Resonator zurückwirken. Das Reflexklystron wird häufig als Oszillator für hohe Frequenzen verwendet. Es gibt auch **Mehrkammerklystrons** mit besonders hohen Verstärkungen und großer Bandbreite. Dabei erzeugen die hintereinander angeordneten Resonatoren unterschiedlich abgestimmte Triftstrecken. Die Leistungen der Klystrons reichen bis 1

⁶⁵ Griechisch *klýzein* anbranden; -tron Suffix zur Bezeichnung eines Gerätes, Werkzeugs.

⁶⁶ lateinisch *resonare* widerschallen, widerhallen, von *re-* wieder, zurück, *sonare* tönen, hallen

MW, Impulsleistungen sogar bis 100 MW Der dichtemodulierte Elektronenstrahl beim TWT und Klystrons enthält viele Oberwellen, Das ermöglicht leistungsfähige **Frequenzvervielfacher** für von 0,5 bis 500 GHz.

6.2. Wandlungen

Verstärker – und mittelbar auch Abschwächer bzw. Dämpfungen – bewirken nur die Veränderung von Messwerten, also Quantitäten und besitzen daher für Input und Output die gleiche Maßeinheit (Qualität). Folglich ist ihr Verstärkungsfaktor eine dimensionsfreie Zahl, die recht einfach mit einer Messung zu bestimmen ist. Bei der Wandlung und Visualisierung wird dagegen aus der Qualität des Inputs für den Output eine neue Qualität mit einer anderen Maßeinheit erzeugt. Dabei sind deren Messwerte meist relativ unwichtig. Vielfach dient eine der Qualitäten auch als typisches Kennzeichen für die Wandlung. Der Output wird gewöhnlich vom Folgesystem genutzt, z. B. einem menschlichen Sinn oder einer Elektronik. Die Inputqualität ist dann wichtig, wenn der Wandler Ähnliches wie für einen menschlichen Sinn erfassen soll. Die genannten Eigenschaften lassen Verstärker einfacher als Wandler erscheinen. Bei den Wandlern ist zuweilen auch eine zusätzliche Verstärkung erforderlich. Daher ist der Verstärker vor den Wandlern behandelt. Trotz allem gibt es sehr einfache Wandler, die nur aus einem Bauelement, dem Sensor oder Aktor bestehen. Beispiele sind Foto- und Leuchtdioden, komplexer sind bereits Mikrofone und Lautsprecher. Schließlich sind die Wandler äußerst vielfältig. Ganz grob lassen sich folgende Zwecke bei den Wandlern unterscheiden:

- einen Output für Sinne des Menschen erzeugen
- menschliche Handlungen (Sprache, Gestik) oder eine Technik erfassen
- etwas zu visualisieren oder hörbar zu machen
- ein Geschehen der Realität und deren Wirkung erfassen

Im Vergleich zu den Speichern erscheint es sinnvoll die sehr vielen Wandler mit der morphologischen Methode zu systematisieren (s. Abschnitt 5,5). Aber die über 60 verschiedenen Maßeinheiten des SI – s. [Völ96] und Bild 14 ff. – sind dafür zu umfangreich und selbst eine Zusammenfassung mit den jeweils abgeleiteten Einheiten oder gar eine Auswahl auf die 7 Basiseinheiten führt zu keiner geeigneten Matrix. Deshalb wird eine ähnliche Tabelle aus [Völ99] übernommen. Sie weist aus, welche Einflussgrößen (annähernd den Basiseinheiten ohne die Zeit) wie bzw. wodurch sie gemessen werden können.

		Widerstand	Kapazität	Induktivität	Gegeninduktivität	Spannung erzeugen	Halbleitereigenschaft
mechanisch	Druck, Zug	Dehnungsmessstreifen, Kontakt	Kondensator-membran	Luftspalt, Spulenlänge	Spulenabstand	Piezokeramik, Quarz	Kristallgitter-änderung
	Schwingung	Kohlemikro-phon	Kondensato-rmikrophon	Luftspalt, Spulenlänge	Spulenabstand	Schwingspule	Kristallgitter-änderung
	Ort, Bewegung	Potentiometer, Kontakt, Schalter	Plattenabstand	Luftspalt, Spulenlänge	Lage der Spulen	Induktion, elektr. Feld im Raum	Dehnungsmessstreifen
elektrisch		nichtlinearer Widerstand	elektrische. Permeabilität	Vormagneti-sierung	Vormagneti-sierung		Feld- und Tunneleffekt
magnetisch		Magnetdiode, Reed-Kontakt		magnetische Permeabilität	magnetische Permeabilität	Halleffekt	Magnetdiode
optisch		Photowiderstand				Photoelement	Photodiode, CCD
thermisch		Heiß-, Kaltleiter	Elektrische Permeabilität	magnetische Permeabilität	magnetische. Permeabilität	Thermoelement	Ladungsträgerzahl
chemisch		Stoffaufnahme	Stoffaufnahme			chemisches Potential	Stoffaufnahme

Das oben genannte Buch betrifft das Mensch-Technik-System, das häufig auch Mensch-Maschine-System bezeichnet wird. Die entsprechenden Zusammenhänge mit den Wandlern weist das übernommene und leicht geänderte **Bild 90** aus. Es enthält hierzu eine riesige Menge an Details. Dadurch kann hier Vieles stark gekürzt dargestellt werden. Jedoch auf Neuentwicklungen seit 1990 wird ausführlicher eingegangen. Bei der Nutzung der menschlichen Handlungen wird durch die Dreiteilung (links) auch die zu Zulässigkeit des Zugriffs bezüglich der privaten Sicherheit berücksichtigt.

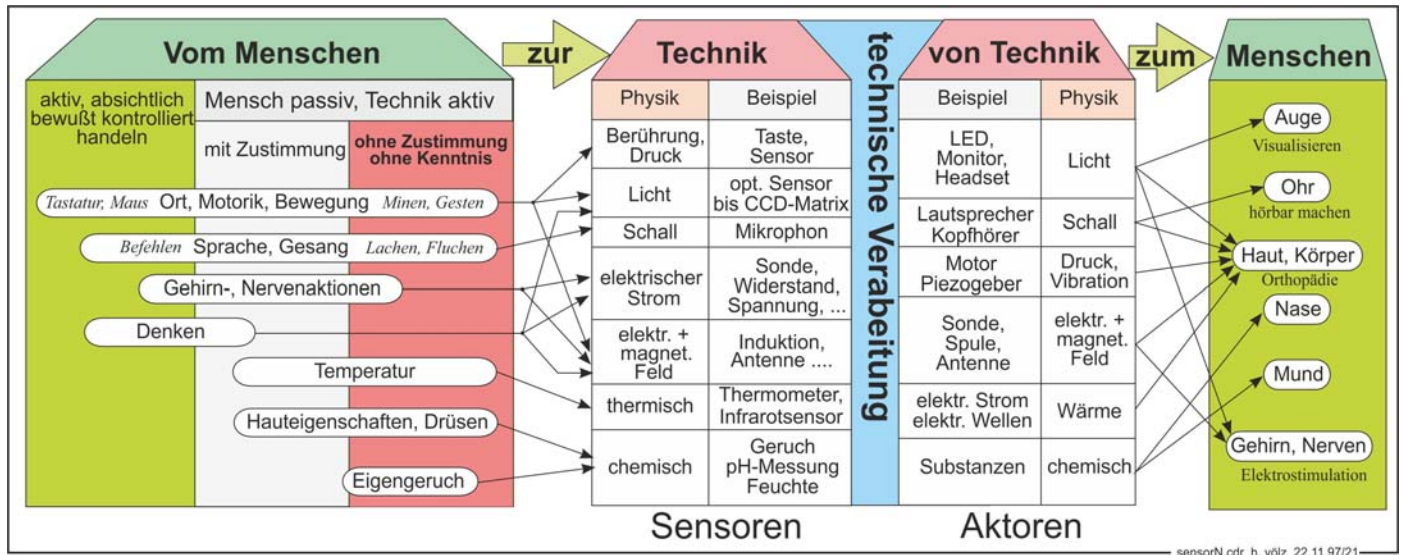


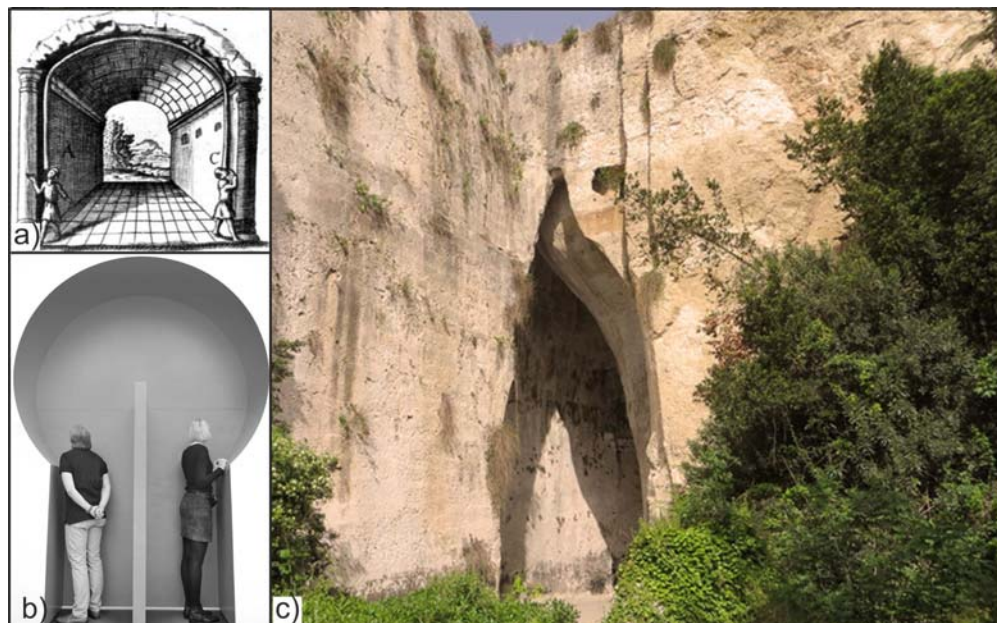
Bild 90. Überblick zu den Sensoren und Aktoren des Mensch-Maschine-Systems

6.2.1. Akustische Wandlungen

Wird von recht kurzen Schallsignalen abgesehen, so ist Schall nur als fortlaufendes Geschehen inhaltlich verständlich, insbesondere als Sprache oder Musik. Andernfalls ist er meist nur ein nicht interpretierbares Geräusch. Jedoch sein Nachhall oder Echo kann zusätzliche Aussagen zum Raum und dort Vorhandenes liefern. Das benutzen z. B. Fledermäuse mittels Ultraschall und Wale als Infraschall. Diese und ähnliche Signale ermöglichen auch analoge technische Anwendungen, die unten u. a. als Sonografie oder gar zur Visualisierung benutzt werden (s. Abschnitt ###). Mittelbar wurde der Schall früher auch für „Ungewöhnliches“, z. B.: für religiöse Zwecke benutzt. Über Kanäle, Rohre usw. konnte so scheinbar ein Heiligtum oder eine Wand sprechen und sogar Fragen beantworten. Recht früh wurden auch zufällig Flüsterecken, -bögen usw. entdeckt (**Bild 91a** und **b**). Delphi war der Sitz des Orakels der Erdgöttin Gaia. Das Zentrum war die oberste Priesterin Pythia, deren ekstatische Weissagungen, von den Priestern in Verse übersetzt wurden. Zu den Weissagungen kamen sogar Herrscher nach Delphi. In Kreta gibt es die Grotte „Ohr des Dionysos“ (c), die teilweise zur Erzgewinnung aus dem Gestein bearbeitet wurde. Ihre ungewöhnliche Akustik wird immer noch von Reisgruppen ausprobiert. Angeblich hat hier der Diktator von Syrakus, Dionysos seine gefangenen Feinde im Steinbruch schuften lassen und ihnen die Grotte nachts als Unterkunft gewährt. Aufgrund der besonderen Akustik soll er so abends ihre geflüsterten Gespräche belauscht haben. Auf ihn bezieht sich der Dionysos in Schillers Bürgschaft. Eine Erweiterung hierzu sind Schalltrichter um Warnungen usw. über *größere Entfernungen* hörbar zu machen. Hieraus entstand später das **Megaphon** mit elektrischem Verstärker und Trichter. Der **Input** für Schallwandlungen betrifft hauptsächlich die menschliche Sprache, den Gesang und die Musik. Als Sensoren werden unterschiedliche **Mikrofone** verwendet. Für Sonderanwendungen werden auch der Ultra- und seltener der Infraschall einbezogen. Das erfolgt vor allem in der Diagnostik u. a. auch zur Visualisierung und teilweise zur medizinischen Behandlung. Weitere Anwendungen betreffen Materialuntersuchungen und die Reinigung von Oberflächen. Für den Schall als **Output** wird fast nur durch mit Schwingspulen versehene **Lautsprechern** erzeugt, die dazu in verschiedene Gehäuse eingebaut werden. Lediglich für Hohe Frequenzen existieren auch andere Methoden mit Piezoeffekt

oder Kondensatormembran. Zum direkten Kontakt mit dem Ohr gibt es verschiedene **Kopf- und Ohrhörer**. Sehr kleine Ausführungen werden bei Hörgeräten für Hörgeschädigte eingesetzt. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Ausführungen für die drei Varianten zeigt **Bild 92**.

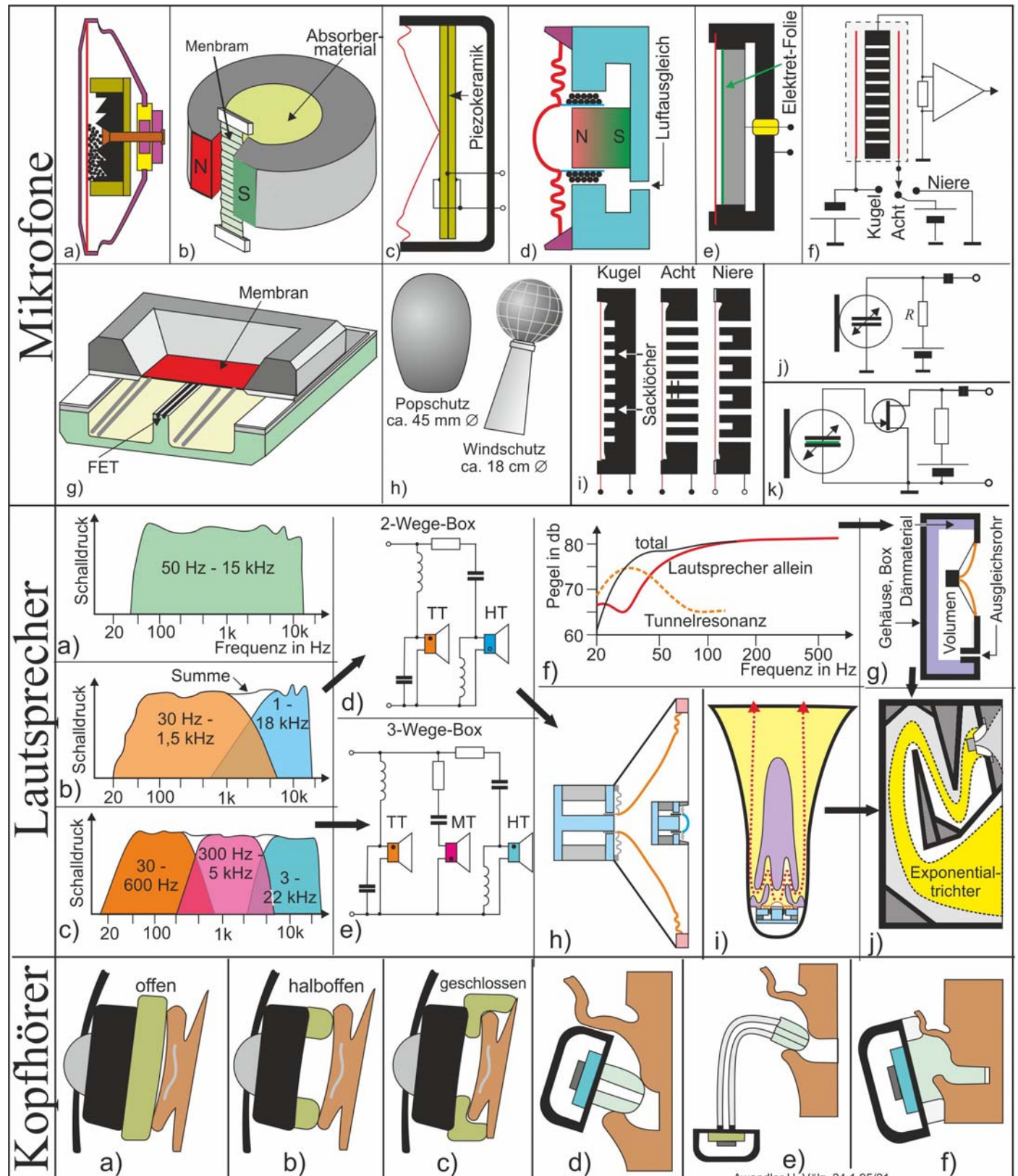
Bild 91. Lauschbögen (a, b) und Ohr des Dyonisos (c)



Während bei den **aktiven Mikrofonen** der Schall direkt in elektrische Energie gewandelt wird, steuern die *passiven* – ähnlich den Verstärkern – eine Hilfsenergie, z. B. bezüglich eines magnetischen oder elektrischen Feldes und sind daher empfindlicher. Das *Kohlemikrofon* (a) ist wohl das älteste und hat heute keine Bedeutung mehr. Es wurde bereits 1860 von Johann Philip Reis für sein Telefon benutzt. Bei ihm werden Kohlekörner lockerer oder dichter zusammengedrückt und so der Widerstand verändert. Beim *Kondensatormikrofon* (e, f, j, i, j, k) wird die Membran verbogen, die Kapazität C geändert und dadurch infolge der konstanten bleibenden Ladung Q die Spannung $U = Q/C$ verändert. Die Möglichkeit erkannte bereits 1863 William Thomson. Während die alte Betriebsvariante einen sehr großen Widerstand R (um $100\text{ M}\Omega$, j) verlangt, erfolgt heute eine unmittelbare Kombination mit einem FET (k). Dabei wird außerdem eine elektrisch polarisierte Gegenelektrode statt der äußeren Spannung verwendet (e). Ein großer Vorteil aller Kondensatormikrofone ist die unterschiedliche Gestaltung der Gegenelektrode. So lassen sich die verschiedenen Richtcharakteristiken erzeugen (i). Mit beidseitigen Membranen ist sogar ihre Umschaltung möglich (f). Bei dem magneto-dynamischen Typen (b, d) werden vom Schall Leiter im Magnetfeld bewegt um eine Spannung zu induzieren. Die veraltete Variante des *Bändchenmikrophons* (b) gilt als das erste hochwertige Studiomikrofon. Sie benutzt eine gefaltete dünne Folie im Magnetspalt. Ihre sehr geringen Spannungen werden mittels eines Transformators im Innern erhöht. Die *Tauchspulenvariante* (d) wird heute neben dem Kondensatormikrofon recht häufig benutzt. Ein heute wenig benutztes Mikrofon benutzt die *Piezoelektrizität* (c). Ein recht neues Mikrofon wurde mit der *Mikroelektronik* möglich (g). Hier wird der Kanalwiderstand eines FETs durch den Schall verändert. Für Sonderanwendungen wurden auch Mikrofonen mit *Lichtleitern* benutzt. Für besondere Richtcharakteristiken werden *Parabolspiegel*, *Schlitzrohre* usw. dem Mikrofon hinzugefügt. Der *Pop-* bzw. *Windschutz* (h) reduziert diese störenden Geräusche. Sie bestehen aus einer etwa 2 mm dicken schalldurchlässigen Schaumstoffschicht. Schließlich seien noch die *Körperschallmikrofone* genannt, die im direkten Kontakt mit dem Schallerzeuger verwendet werden.

Die Schallausgabe erfolgt recht unterschiedlich: direkt auf unsere Ohren, in kleine Räume, in große Säle oder als Openair. Daher müssen die Lautsprecher für die notwendige Leistung gestaltet werden. Anfangs entstanden viele Varianten. Dann hat sich das Tauchspulenprinzip (der elektrodynamische Lautsprecher) durchgesetzt. Sein Prinzip entspricht dem Mikrofon (d). Die Schallabstrahlung erfolgt über eine vorgesetzte Membran. Sein Prinzip wurde bereits 1898 vom Engländer Oliver Lodge erfunden, war aber zunächst kaum zu realisieren. Beim einfachen Lautsprecher (h) fehlt das zweite kleine, vorn eingefügte System. Es ist für höhere Frequenzen ausgelegt. Trotz großer Fortschritte ist der Lautsprecher immer noch das qualitativ schwächste Glied der Schallerzeugung. Auch deshalb werden oft zwei oder gar drei für verschiedene Frequenzbereiche ausgelegte

Lautsprecher kombiniert (a bis e). Damit kein akustischer Kurzschluss von der Rück- zur Vorderseite der Membran auftritt, sind Schallwände oder Gehäuse erforderlich. Mit einer kleinen Öffnung im Gehäuse kann durch Raumresonanz eine Erhöhung der Abstrahlung bei tiefen Frequenzen erreicht werden (f, g). Bassreflex und Tunnelresonanz sind andere Bezeichnungen. Mit einem exponentiell geformten Trichter erfolgt eine Anpassung an den Wellenwiderstand der Luft und eine Verstärkung der Lautstärke, besonders in der Achsrichtung. Für tiefe Frequenzen muss der Trichter bis zu mehreren Metern lang sein. Was durch eine komplexe Faltung erheblich verkürzt werden kann (i). Das Prinzip kann auch zusätzlich für den rückwertigen Schall benutzt werden (j).



Awandler H. Völz 24.1.95/21

Bild 91. Die wichtigsten akustischen Wandler, Weitere Details [Völ99]

Die Bezeichnung Lautsprecher wird nicht nur für das Bauteil (Chassis, System) verwendet, sondern auch unter Einbeziehung des Gehäuses. Bei Großveranstaltungen werden mehrere spezielle Lautsprechersysteme mit umfangreichem Zubehör benutzt. In diesen Fällen müssen für die Räume oder Orte angepasste Schallfelder (Schallausbreitungen) erzeugt werden. Das erfordert die räumlich verteilte Anordnung mehrerer Lautsprecher. Die entsprechende Anlage besteht dann aus mehreren **PA-Komponenten** (public address).

Für eine **individuelle Beschallung** muss der Schall bevorzugt oder ausschließlich unmittelbar den Ohren zugeführt werden. Das geschieht mit **Kopfhörern**, die auf das Außenohr, die Ohrmuschel gedrückt werden (a bis c). **Ohrhörer** sind statt so klein, dass sie den Schall direkt im Gehörgang abstrahlen. Insbesondere für Gehörgeschädigte erfolgt das sogar so, dass es kaum für andere Menschen sichtbar ist. U. a. bei mangelhaftem Mittelohr (Hammer, Amboss, Steigbügel) erfolgt eine recht spezielle Schallzuführung direkt auf den Schädel, also mittels Knochenleitung. Bei sehr starken Hörschädigungen ist es seit geraumer Zeit sogar möglich, den Hörnerv (Nucleus cochlearis bzw. das Hörzentrum) mittels Elektroden rein elektrisch zu stimulieren. Dabei erübrigt sich ein Schallerzeuger. Vielmehr wird eine batteriebetriebene **Innenohr-Prothese** als Implantat unter die Haut in der Nähe des Ohres eingepflanzt.

Kopfhörer werden aus mehreren Gründen benutzt. Teilweise ist durch sie eine besonders hohe Qualität, insbesondere bei **Kunstkopf-Stereofonie** zu erreichen. Ein erfreulicher Grund ist es, dass so Schallstörungen für andere vermieden werden. Aber auch für den eigenen Hörgenuss können äußere Störgeräusche weitgehend unterdrückt werden. Mit speziell ausgelegten Kopfhörern lassen sich sogar externe Geräusche weitgehend kompensieren. Das ist bei Fernkraftfahrern sehr beliebt geworden. Es konnte sogar belegt werden, dass dennoch die notwendigen Verkehrssignale sehr gut gehört werden [Völ5extra]. Unabhängig davon werden drei Variante unterschieden: der **offene** Hörer (a) lässt zusätzlichen Umweltschall ins Ohr gelangen. Bei ihm geht also der akustische Kontakt zur Umgebung kaum verloren, wird jedoch erheblich durch den Kopfhörerschall verdeckt. Weitgehend wird er dagegen mit der **geschlossen** Variante (c) eingeschränkt. Den Mittelweg beschreitet der **halboffene** Betrieb (b). Eine besondere Art ist der **Infrarot-Kopfhörer** mit eigener Batterie und einer drahtlosen Signalübertragung. Viele weitere Details für alle Schallvarianten in [Sku54], [Völ99].

6.2.2 Bildvergrößerung und Visualisierung

Vom Schall können mehrere Aspekte in den optischen Bereich übertragen werden. In beiden Fällen treten Swingungen auf. Doch es gibt deutliche Unterschiede: Während beim Schall longitudinale Änderungen der Luftdichte existieren sind es beim Licht transversale elektromagnetische Wellen. Außerdem treten deutlich andere Frequenzbereiche und Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf, beim Licht $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s, Schall in Luft ≈ 440 m/s. Während beim Schall, der Mechanik usw. immer von Wandlungen und Verstärkungen gesprochen wird, werden beim Licht Vergrößerung und Verkleinerung benutzt. Schließlich kommt noch hinzu, dass in der Optik je nach der Anwendung drei Modelle benutzt werden:

- Bei der **Strahlenoptik** wird nur die geradlinige Lichtausbreitung mit Brechungen an Grenzflächen von Materialien benutzt. Das ist besonders typisch für optische Abbildungen mit Linsen und Spiegeln **Bild 92**.
- Die **Wellenoptik** verwendet die Front von elektromagnetischen Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Hiermit lassen sich u. a. Interferenzen und Beugungen gut erklären (b). Das betrifft umfangreich für die Holografie zu, die hier aber nicht behandelt wird. Das übliche Licht, etwa einer Glühlampe oder der Sonne, besteht aus einer Vielzahl kurzer Schwingungszüge, oft unterschiedlicher Frequenzen und zufälligen Schwingungsrichtungen. Teilweise müssen auch die Polarisation und Farbe des Lichts berücksichtigt werden. Die wichtigsten Details enthält u. a. [Völ05].

- In der **Quantentheorie** besteht das Licht aus Energiepaketen, die als Photonen interpretiert werden und mit der Lichtfrequenz ν und der Planck'schen Konstante h die Energie $E = h \cdot \nu$ besitzen. Auch sie wird hier nicht weiter berücksichtigt.

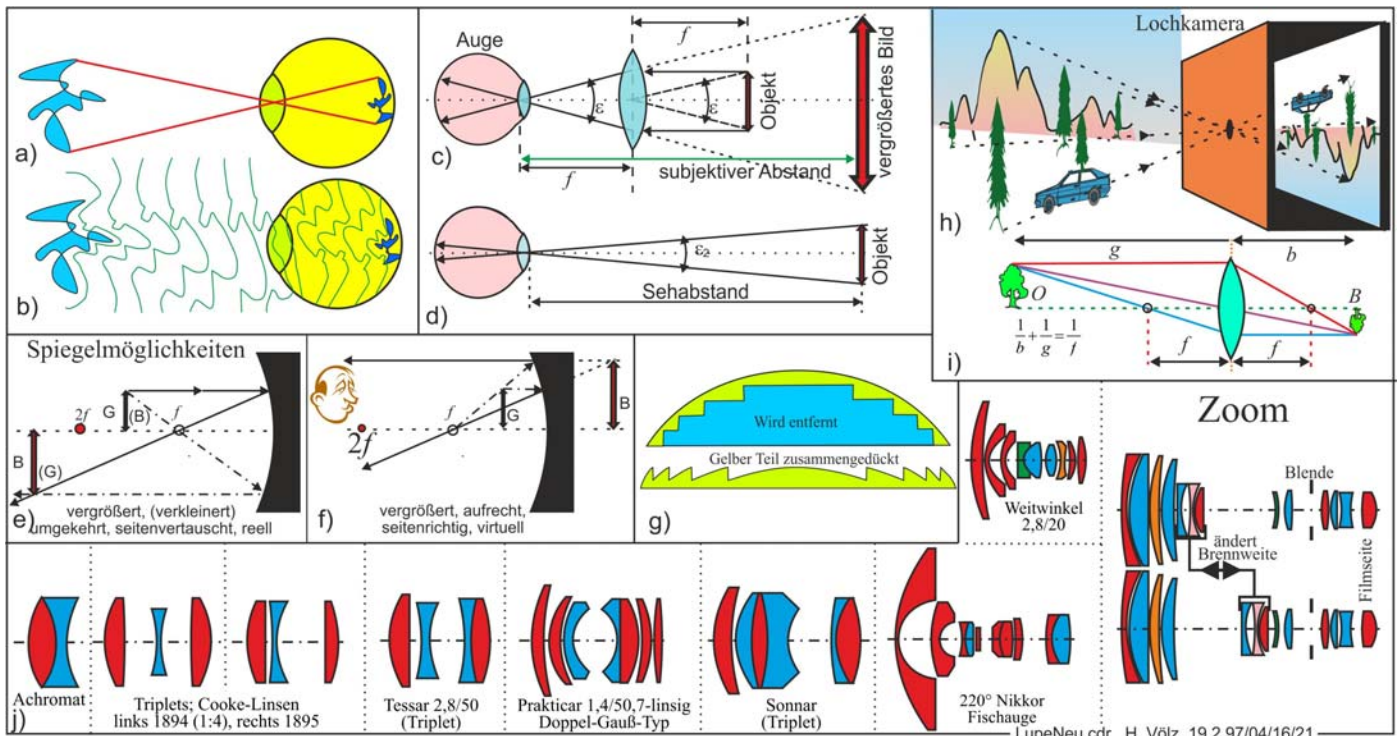


Bild 92. Wichtige Eigenschaften von Lupen, Linsen, Spiegeln und für die Fotografie.

Linsen sind meist kreisförmig gestaltete und optisch durchlässige Gebilde mit vorwiegend kugelförmig gekrümmten Oberflächen. Denn nur sie lassen sich mit einfachen Technologien exakt herstellen (schleifen). Die **Lupe** ist eine sehr gebräuchliche Anwendung zur vergrößernden Betrachtung (c). Ihre Linse wird ungefähr im Abstand ihrer Brennweite f vom Auge gehalten. Vom Objekt aus, das sich ebenfalls etwa im Abstand f befindet, gehen dann die Lichtstrahlen parallel zur Linse hin und werden dort zueinander hin umgelenkt. Dabei entsteht der Öffnungswinkel ϵ . Werden nun die Lichtstrahlen zwischen Auge und Linse darüber hinaus weiter verfolgt, so ergibt sich im optimalen Abstand das virtuelle, aber subjektiv gut sichtbare Bild des vergrößerten Objektes. Würde sich das Objekt ohne Linse in diesem Abstand befinden, so entstünde ϵ_2 und das kleinere Objekt (d). Wie alt das Prinzip der Lupe oder des Brennglases ist, belegt eine ein geschliffener, plankonvexer Bergkristall von 640 v.Chr., der in Ninive gefunden wurde. Er hat ca. 40 mm Durchmesser und 5 mm Dicke und besitzt die Brennweite $f = 114,3$ mm. Auch Lucius Annaeus Seneca beschreibt 63 n. Chr. die vergrößernde Wirkung einer mit Wasser gefüllten Kugel (*Schusterkugel*). Das Prinzip soll Kaiser Nero (Claudius Drusus Germanicus Caesar) beim Lesen benutzt haben. Heute sind Linsen in vielen Varianten und Anwendungen allgegenwärtig: Brillen, Fernrohre, Fotoapparate, Videorecorder, Projektoren, Displays, Scheinwerfer, Mikroskope, Beamer, Headsets usw., auch für Sehbehinderte. Teilweise werden sie auch für Infrarot, Ultraviolett und Röntgenstrahlung verwendet.

Eine technologische Abwandlung der Sammellinse ist die **Fresnel-Linse** (g). Rein formal könnte sie aus einer nur einseitig konvexen Sammellinse entstanden sein. Von ihr wird der untere blaue Teil kreisförmig herausgefräst. Dann wird der blaue Rest flach zusammengedrückt. Technologisch wird jedoch die recht unregelmäßig erscheinende Oberfläche in eine gut durchsichtige Plastikfolie gepresst. So entsteht ein flaches Blättchen, das genauso wie eine Sammellinse wirkt und daher gut mit Scheckkarten usw. aufbewahrt werden kann, Derartige sehr handlichen Linsen gibt es bis etwa A5-Größe. Notwendig ist dabei aber, dass weitaus mehr Stufen als in (g) erzeugt werden. Die Fresnel-Linse ist aber nicht mit der **Zonen-Linse** zu verwechseln. Sie besteht aus abwechselnd durchsichtigen und undurchsichtigen Kreisingen und entsteht immer bei der Holografie. Ihr großer

Vorteil ist, dass sie für alle Lichtfrequenzen herstellbar ist. Daher wurde sie z. B. beim ROSAT-Satelliten zur Erfassung der Röntgenstrahlung verwendet.

Ähnlich wie Linsen können auch (parabelförmig) gekrümmte **Spiegel**-Flächen wirken. Der wichtige **Hohlspiegel** entspricht näherungsweise einer Sammellinse. Im Gegensatz dazu wird das Licht aber reflektiert und die Abbildungen hinter der Linse werden dann rückwirkend in Richtung des ankommenden Lichtstrahls erzeugt (e). Es besteht auch die Möglichkeit zur Vergrößerung (f) mit einer virtuellen Abbildung. Sie wird u. a. der Stirnspiegel bei der Untersuchung des Kehlkopfs usw. benutzt. Weitere Varianten werden beim Spiegelteleskop (s. u.) behandelt.

Der Ursprung für die **Fotografie**⁶⁷ dürfte die Lochkamera (h) bzw. **Camera obscura**⁶⁸ sein. Erstmals dürfte sie im philosophischen Buch „Mo Jing“ in Nordchina im Kapitel Optik etwa 300 v. Chr. erwähnt sein. Dabei ist auch beschrieben, wie das Bild entsteht und warum es auf dem Kopf steht. Bereits deutlicher beschrieb Aristoteles (384 - 322 v. Chr.) in seiner „Problemata“ die Erscheinung und zwar bezüglich der Abbildung der Sonne. In geringer Abwandlung verwendeten arabische Gelehrte das Prinzip zur Beobachtung von Sonnen- und Mondfinsternissen. Eine ausführlichere Beschreibung gab Ibn al-Haitham (965 - um 1040). 1490 lieferte Leonardo da Vinci (1452 - 1519) weitere Details. Mit einer Linse statt des Loches verbesserte sie dann 1550 Girolamo Cardano. Das Abbildungsgesetz zeigt (i), Durch die Kombination verschiedener Glassorten und das Zusammenfügen mehrerer unterschiedlicher Linsen sind viele spezielle Objektive entstanden, die fehlerarme Bilder, unterschiedliche Brennweiten und Auflösungen ermöglichen. Die wichtigsten Kameraobjektive sind in (j) aufgelistet. Besonders erwähnt seien das Weitwinkel- und Tele- sowie Zoom-Objektiv mit einstellbarer Brennweite. Für umfangreiche weitere geschichtliche und inhaltliche Details zur Fotografie, wie Blende, Öffnung, Verschluss, Belichtungszeit, Filme (schwarz-weiß, farbig usw.), Filmformate, Zubehör usw. sei auf [Völ05] verwiesen.

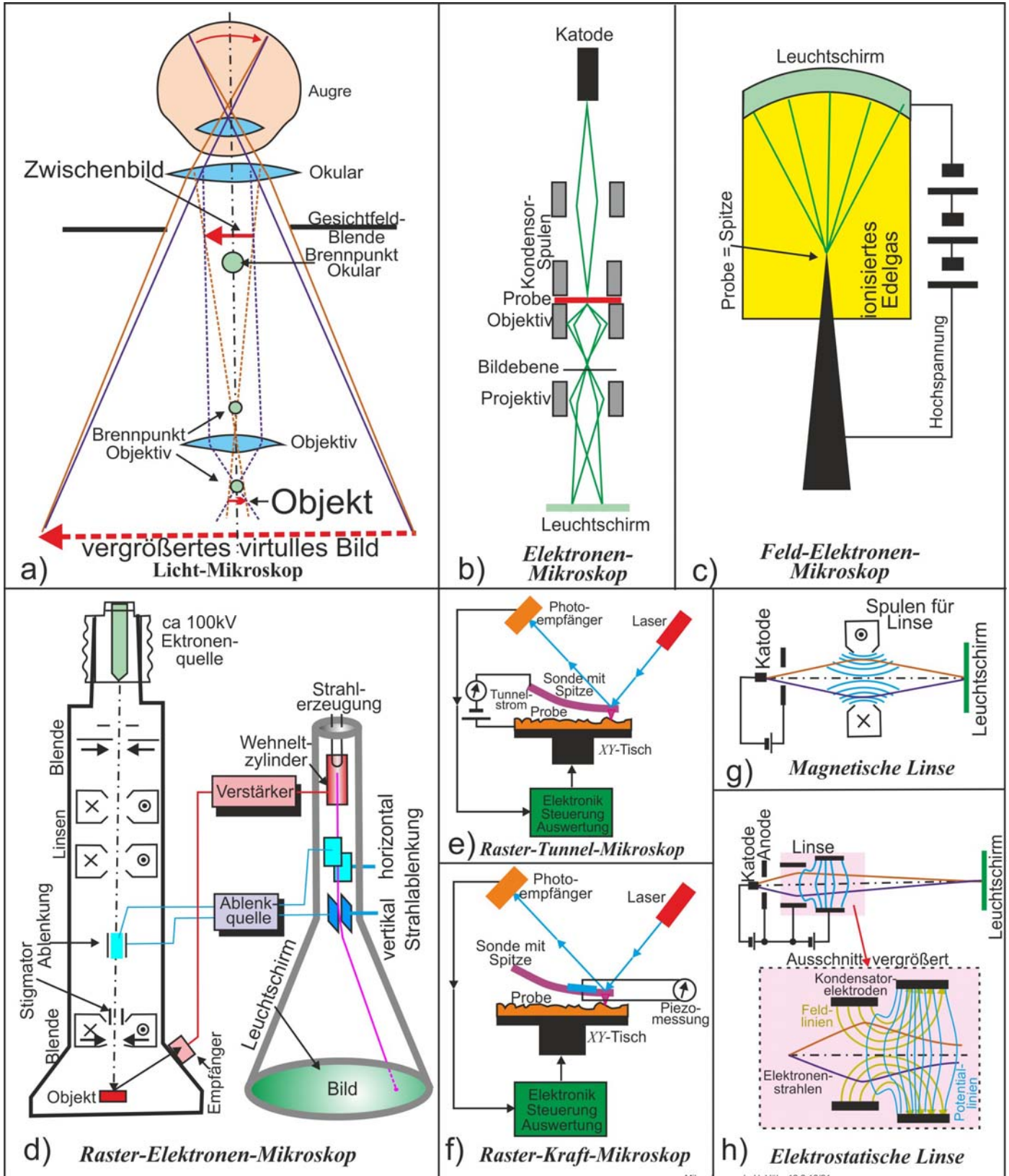
Die Lupe ermöglicht nur Vergrößerungen bis etwa 10-fach. Wesentlich größere Werte erreichen **Mikroskope**. Die Idee so etwas mit zwei Linsen zu erreichen entwickelte 1538 G. Fracastoro, verwirklichen konnten es aber erst die Holländer Johannes und Zacharias Janssen 1590 mit einem zusammengesetzten Mikroskop. Dazu entwickelte 1869 Ernst Abbe die theoretischen Grundlagen. Den Namen Mikroskop erhielt das mit Objektiv und Okular ausgestattete Mikroskop erst Anfang des 17. Jh. und zwar in Anlehnung an das ältere „Teleskop“ (s. u.). Seine Funktionsweise mit den dazugehörigen Strahlengängen zeigt **Bild 93a**: Mit dem Objektiv wird vom Objekt ein deutlich vergrößertes und reelles Zwischenbild erzeugt. Mit dem Okular wird es ähnlich wie bei der Lupe nochmals vergrößert betrachtet. Durch das Wechseln des Objektivs und/oder Okulars sind Vergrößerungen von etwa 10- bis fast 1000-fach möglich. Die Obergrenze der Auflösung ist dabei infolge der Lichtwellenlänge auf etwa 0,2 µm begrenzt. Sie wird als Abbe-Limit bezeichnet. Inzwischen kann sie mit komplexen Interferenzmethoden und Beleuchtungstechniken noch deutlich unterschritten werden.

Die Ideen für ein **Elektronenmikroskop** stammen von Ernst August Friedrich Ruska (1906 – 1988). Sie wurden 1931 von Max Knoll an der TH Berlin-Charlottenburg vorgestellt. Der Elektronenstrahl (b) wird mit dem Kondenser (als Quasilinse) gut gebündelt. Für den Elektronenstrahl sind auch Objektiv und Okular durch magnetische (g) oder elektrostatische (h) Linsen ersetzt. Schließlich wird mit dem Projektiv das vergrößerte Objekt auf dem Bildschirm sichtbar. Auch eine Belichtung von chemischem, fotografischem Material ist möglich. Für die Auflösung wirkt aber nicht die Größe der Elektronen, sondern ihre Wellenlänge begrenzend. In Abhängigkeit von der Spannung U , welche die Geschwindigkeit v bewirkt, der Elektronenmasse m_0 und der Planck-Konstante h gilt

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{m_0 \cdot 5,93 \cdot 10^7 \sqrt{U \text{ in Volt}}}.$$

⁶⁷ Griechisch **Foto** von *pháos, phos* bzw. *photós*, Licht, Glanz, Helle und Sonnenlicht, *pháinein* sichtbar machen, sehen lassen, *graphie* von *gráphein* kerben, (ein)ritzen, schreiben und zeichnen, sowie *graphie* Schrift, Darstellung.

⁶⁸ Lateinisch **obscura** dunkel



Mikroskope. cdr H. Völz 12.2.16/21

Bild 93. Die wichtigsten Varianten der Mikroskope.

Wesentlich anders arbeitet das **Feld-Elektronen-Mikroskop** (c). Es wurde erstmalig 1955 gebaut und besitzt eine extrem feine Spitze. Auf ihr wird das sehr kleine Objekt gelagert. Durch eine sehr hohe Spannung beim Leuchtschirm werden Elektronen mit Feldemission von der Spitze abgesaugt und gelangen geradlinig, aber sich verbreiternd zum Leuchtschirm. Das zu analysierende Objekt beeinflusst dabei die Emission und so entsteht das sehr stark vergrößerte Bild.

1953 entwickelten McMullan und Oatley das **Rasterelektronenmikroskop** REM (d). Technisch wurde es erst um 1965 nutzbar. Ein sehr stark gebündelter Elektronenstrahl trifft auf die Oberfläche des Objektes und erzeugt dort Sekundärelektronen, die zum Empfänger gelangen. Durch

die Ablenkquelle wird Oberfläche des Objektes abgerastert und parallel dazu der Elektronenstrahl einer Bildröhre (später Monitor) geführt. So entsteht zeitlich nacheinander ein Oberflächenbild des Objektes. Analog zu diesem Verfahren gibt es zwei Vorgänger als rein mechanische Varianten. Bei ihnen wird die Oberfläche des Objektes mit einer Sondenspitze ($\approx 1\text{nm}$) abgerastert. Beim **Raster-Tunnel-Mikroskop** (RTM, e) wird das über den Tunnelstrom ($1\text{ pA} - 10\text{ nA}$ bei einigen mV) gesteuert und dabei die Bewegung der Spitze registriert. Das **Raster-Kraft-Mikroskop** (STM, f) erfasst dagegen über ein Piezoelement die Bewegung der Spitze (e). Beide Varianten wurden auch für Methoden der Datenspeicherung erprobt.

Im Gegensatz zu den Lupen und Mikroskopen ist es oft auch wichtig, weit entfernte Objekte vergrößert zu betrachten. Dazu wurden Fernrohre und **Teleskope**⁶⁹ entwickelt. Die wichtigsten Varianten zeigt **Bild 94**. Sehr eingeschränkt leisten das auch Fotoobjektive (s. o.). Besonders einfach ist das **Galilei-Fernrohr** (a). Es benötigt nur eine Sammellinse als Objektiv und eine Zerstreuungslinse als Okular. Die Sammellinse bereitet nur die Abbildung des weit entfernten Gegenstandes seiten- und höhenvertauscht vor. Ihr Brennpunkt liegt dabei etwa im Auge. Die Zerstreuungslinse erzeugt dann das scharfe und richtig stehende Bild. Das einfache Prinzip ist preiswert herzustellen, jedoch nicht sehr leistungsfähig. Es wird bevorzugt für wenig anspruchsvolle Anwendungen eingesetzt. Das sind vor allem Opern- und Theatergläser, die auch teilweise einfach Fernglas und bei höheren Leistungen **Feldstecher** genannt werden. Bei Operngläsern betragen die üblichen Vergrößerungen 3-fach, bei Feldstechern 6- bis 10-fach. Ein Vorteil ist das geringe Gewicht $\approx 300\text{ g}$ gegenüber sonst bis zu $1,5\text{ kg}$. Teilweise sind sie auch für Transport gut zusammenlegbar. Bei einäugiger Bauweise heißt das Galilei-Fernrohr auch **Monokular**. Eine Spezialanwendung ist das **Zielfernrohr**.

Das **Kepler-Fernrohr** (b) benutzt zwei Sammellinsen und ist dem Galilei-Fernrohr deutlich überlegen. Das Objektiv erzeugt dabei ein reelles Zwischenbild, das doppelt verkehrt, d. h. auf dem Kopf stehend und seitenverkehrt, also um 180° gedreht ist. Das Okular wirkt dann wie eine Lupe vergrößernd. Fast immer wird das Zwischenbild im Strahlengang mit einem Umkehrprisma (c) zurückgedreht. In (b) wurde es zur Vereinfachung der Darstellung weggelassen. Bei Großferngläsern besteht das Objektiv aus zwei bis fünf Linsen. Für das Umkehrprisma werden zwei oder drei einfache Prismen zusammengesetzt. Das Okular kann aus drei bis sechs Linsen bestehen. Für eine hohe Lichtstärke geht der Objektivdurchmesser oft deutlich über 50 mm hinaus. Es existieren sowohl gut handhabbare, als auch Großferngläser, die mit Stativen genutzt werden. Ferner gibt es Zoomferngläser so genannte **Spektive** mit ausziehbaren Tubus, bei denen die Vergrößerung von 15- bis 50-fach frei einstellbar ist. Eine Sonderausführung sind die **Periskope** (f). Im Beispiel erfolgt die Bildumkehr durch zusätzliche Linsen. Die bis zu mehreren Metern langen senkrechten Tubusse (Objektarme) lassen den Beobachter unsichtbar bleiben. Das ist z. B. in Schützengräben und beim getauchten U-Boot nützlich. Auch hier existieren unterschiedliche Linsenanordnungen. Mit großen Abständen zwischen den beiden Eingangsobjektiven ist eine verbesserte Tiefensicht möglich. Das Gegenteil erfolgt bei den Theatergläsern um das Bühnenbild besser räumlich vorstellbar zu machen.

Für die praktisch unendlich fernen Sternbilder entstanden für die Astrophysik wenige Jahrzehnte vor 1900 die **Teleskope** mit Spiegeln. Die drei wichtigen Ausführungen zeigt (e). Dabei werden besonders große Eingangsspiegel für die Bildhelligkeit und sehr lange Brennweiten für die Vergrößerung nutzbar. 1947 entstand das 5-Meter-Teleskop von Mount Palomar. 1975 folgte ein 6-Meter-Spiegel für das russische Selentschuk. In den 1980er-Jahren folgten größere, aber **segmentierte Spiegel**. Ein Beispiel zeigt (d). Eine Weiterführung sind dann Felder mit vielen elektronisch verkoppelten Teleskopen. Als Sonderausführung gibt es auch Teleskope mit rotierenden und daher parabelförmigen **Flüssigkeitsspiegel**. Seit einiger Zeit existieren ferner Teleskope für **Infrarot, Ultraviolett, Radio- und Röntgenstrahlung**. In stark vereinfachter Abwandlung werden Spiegeloptiken auch in der Fotografie benutzt.

⁶⁹ Der Begriff Teleskop wurde erst in der Neuzeit gebildet, Griechisch *téle* fern und *skopéin* beobachten, ausspähen. Im Altgriechischen gab es schon *teleskópos* weithin schauend,

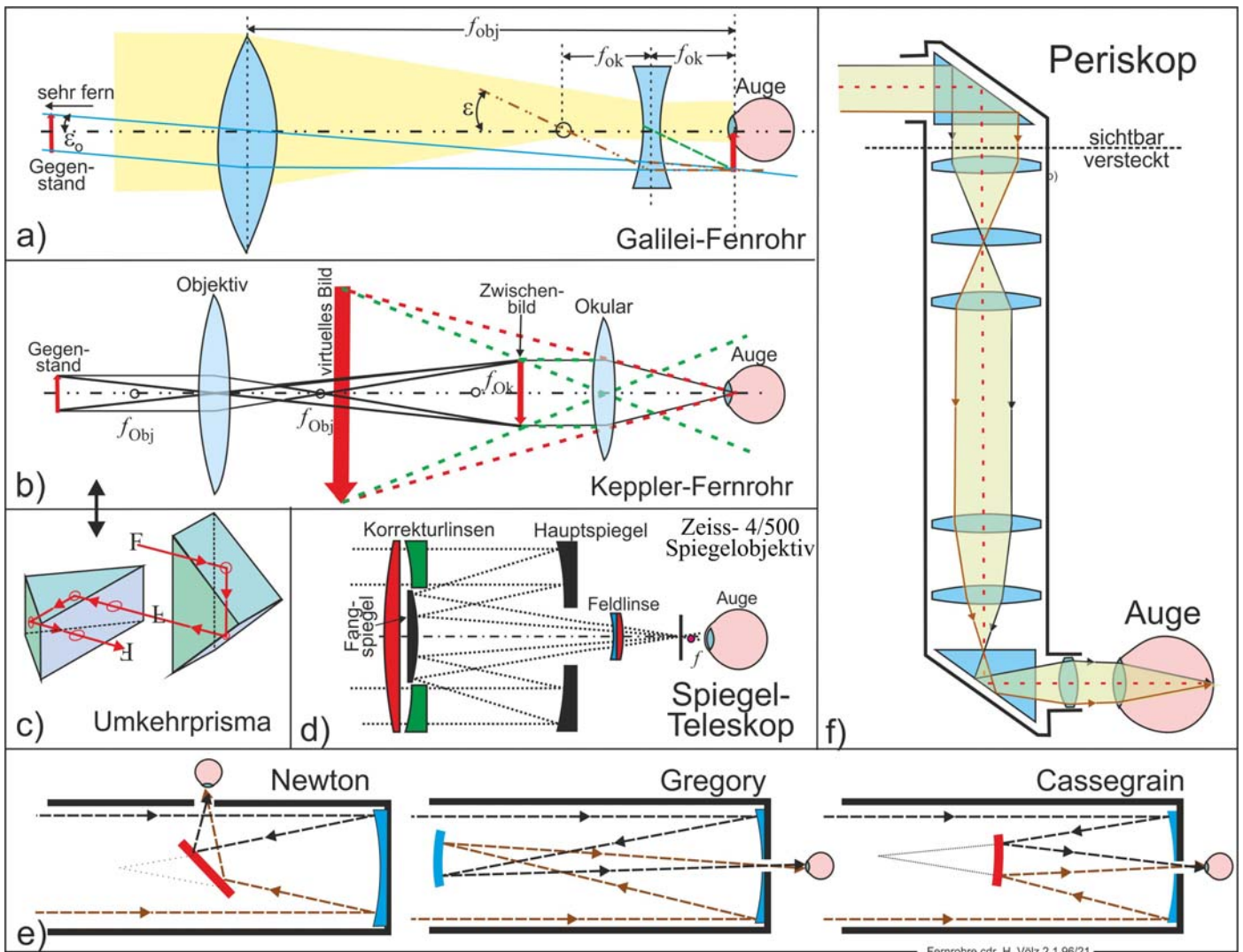


Bild 94. Die wichtigsten optischen Anordnungen für Fernsicht: Ferngläser und Teleskope.

Außer den Licht- und Elektronenstrahl-Mikroskopen gibt es noch weitere Varianten zur Sichtbarmachung bzw. **Visualisierung** oder Bildgebung, die mit anderen physikalischen Verfahren arbeiten. Eine **Röntgenstrahlung** entsteht, wenn schnelle Elektronen auf Materie treffen. In einem meist kleinen Brennfleck erfolgt eine starke Abbremsung, wodurch eine Strahlung mit einer Wellenlänge von 10^{-8} bis 10^{-12} m (10 nm bis 1 pm) entsteht. Bis etwa 1925 wurde die Strahlung mittels einer Gasentladung bei einem Gasdruck von 0,05 bis 0,5 bar erzeugt **Bild 95a**. Dabei trafen positive Ionen auf die Katode und die Röntgenstrahlung tritt durch eine Bohrung aus. Bereits 1895 erzeugt Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) die erste Röntgenaufnahme von den Handknochen seiner Frau. Heute werden stark gebündelte Elektronenstrahlen auf eine rotierende Wolfram-Anode gestrahlt (b). Die Betriebsspannung reicht von 50 bis 400 kV. Die Anode erhitzt sich am Brennfleck (0,1 bis 1,5 mm) auf ≈ 2500 °C. Deshalb ist Rotationskühlung notwendig. Die Röntgenstrahlung tritt dann vorwiegend durch ein Beryllium-Fenster, selten durch Glas aus. Von der eingesetzten Energie wird nur etwa 1% in Röntgenstrahlung umgesetzt. Da die Röntgenstrahlung sich immer geradlinig ausbreitet und nicht ablenkbar ist, erfolgen alle Abbildungen im Durchlicht (c).

Um 1960 entstand die **Computertomografie**⁷⁰ (CT). Sie wurde aber erst 1972 durch den amerikanischen Physiker Allan M. Cormack und dem britischen Ingenieur Godfrey N. Hounsfield nutzbar. 1972 gab es das erste CT-Gerät, ab 1974 kommerzielle CT-Systeme mit Sofortbildrekonstruktion. 1979 erhielten beide den Nobelpreis für Medizin. Mittels Röntgenstrahlen wird die örtlich

⁷⁰ Tomografie griechisch *tomo* Schnitt und *graphein* schreiben, etwa synonym mit Schnittbild- oder Schichtaufnahme-verfahren

unterschiedliche Durchlässigkeit der Gewebearten bestimmt (d). Ein fächerförmig gebündelter Röntgenstrahl wird dabei in kleinen Schritten um den Körper herum bewegt (d). Der Patient wird also nicht nur aus einer Richtung durchstrahlt, sondern nacheinander komplett rundherum aus allen Richtungen abgetastet. Auf einem Teilkreis gegenüber der Röntgenquelle sind Detektoren angebracht, welche die ankommende Restenergie messen. Zusätzlich wird der Körperteil in der runden Öffnung (Röhre) des Computertomografen längs vorgeschoben. Mit sehr großem mathematischen Aufwand wird erst danach aus allen Aufnahmen die Rekonstruktion der Gewebeverteilung in 1 bis 8 mm dicken Schichten berechnet. Mit zusätzlichen Computerberechnungen sind sogar 3D-Bilder möglich. Eine Kopfuntersuchung dauert etwa zehn, die Erfassung des Unterleibs rund 30 Minuten. Zur besseren Abgrenzbarkeit ausgewählter Strukturen (Gefäße, Darm etc.) muss bei vielen Untersuchungen zu Beginn ein jodhaltiges Kontrastmittel in eine Vene gespritzt werden.

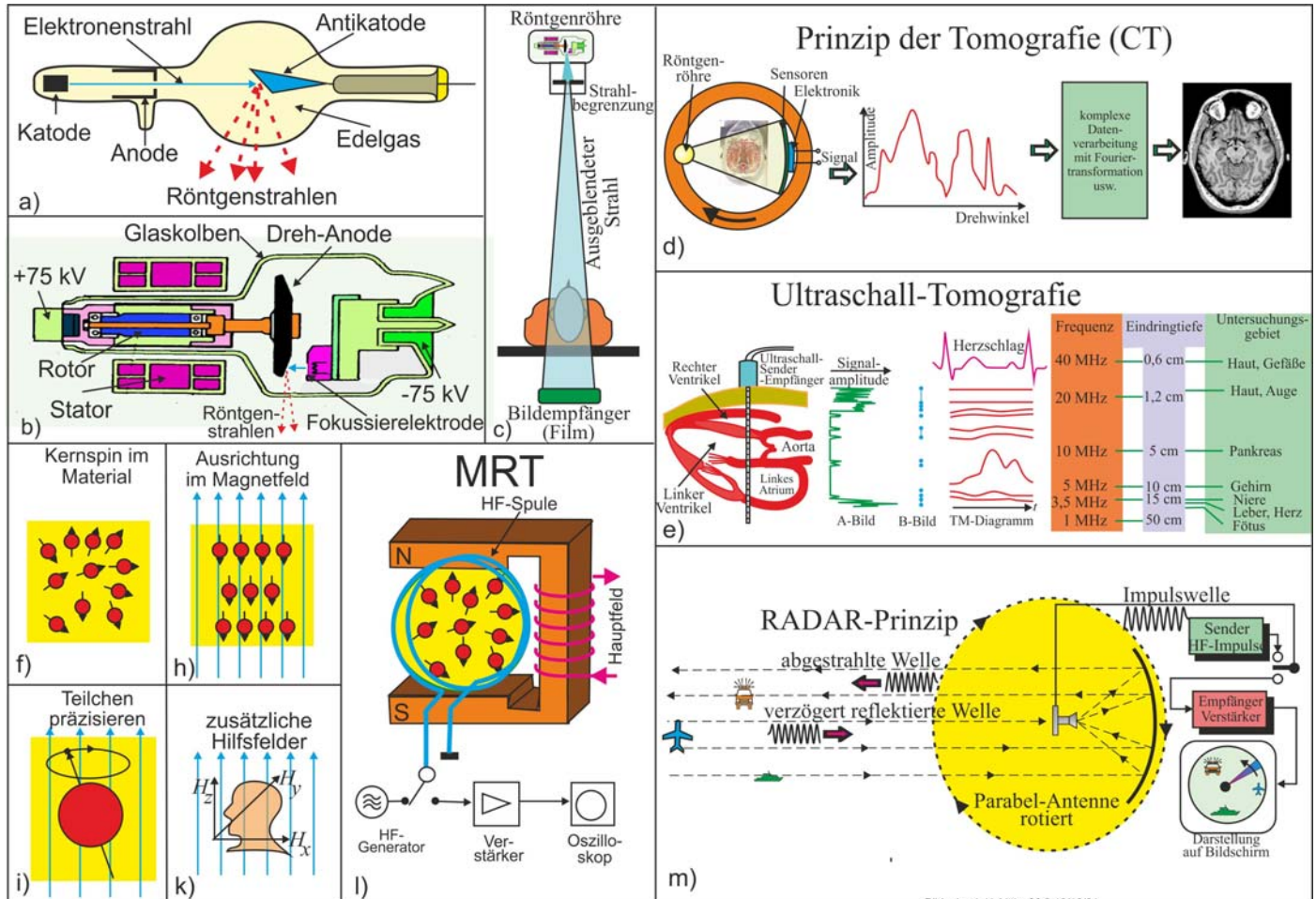


Bild 95. Ausgewählte Verfahren für komplexe Visualisierungen

Eine deutlich einfachere Variante der Tomografie arbeitet mit **Ultraschall** (e). Hierbei wird eine Sonde, die zugleich den Schallsender und -empfänger enthält, nur individuell durch den Arzt zielgerichtet bewegt. Im Geräte werden dabei die Einzeldaten gespeichert und anschließend richtig zusammengesetzt. Der Ursprung dieser **Sonifikation** war die militärische **Ortung von U-Boten** mit Ultraschallwellen im Wasser. Doch die damalige Energie war so groß, dass benachbarte Fische zerborsten. Erst deutlich später wurde das Verfahren zur **Aufdeckung von Materialfehlern**, wie Hohlräume, Risse usw. in Werkstoffen und Geräten eingesetzt. Auch für die **Reinigung** von Oberflächen bei Optiken, Brillen usw. wird Ultraschall breit angewendet, ja selbst zum Zähneputzen hat es sich bewährt. Dabei entstehen an den Oberflächen kleine Flüssigkeitsblasen, die zerplatzen und dabei den Schmutz mitreißen. Zum Hörbarmachen von Ultra- und Infraschall ist eine **Frequenztransponierung** notwendig. Heute erfolgt das mühelos digital. Doch bei der Analogtechnik war die Magnetbandspeicherung mit Änderung der Transportgeschwindigkeit erforderlich. Eine sehr spezielle Anwendung ist die **Ultraschall-Holografie**. Dabei wird eine Referenzwelle von Ultraschall

dem Geschehen in den Raum hinein gestrahlt. Sie interferiert mit Reflexionen an den Objekten. Die so entstehenden Schalldruckknoten werden mit einem bewegten Mikrophon gescannt und aufgezeichnet. So entsteht ein „Akustisches Hologramm“, das optisch betrachtet werden kann und dabei sonst kaum zu gewinnende Aussagen über die einzelnen Schallquellen liefert.

Weitaus komplexer arbeitet das **MRT** (Magnet-Resonanz-Tomografie), auch MRI (magnet resonance imaging) oder NMR (nuclear magnetic resonance Spektroskopie), bzw. Kern-Resonanz, paramagnetische Kernresonanz oder **Kernspin**-Tomografie genannt (f - j). Es wurde im September 1971 von Paul C. Lauterbur erfunden und ist seit den 1980er Jahren im klinischen Einsatz. Dabei wird keine Röntgenstrahlung oder Radioaktivität benutzt, aber für den Patienten ist eine enge Röhre erforderlich. Weiter wird ein sehr starkes Magnetfeld benutzt, das die Spins – Eigendrehmomente von Wasserstoffkernen, Protonen usw. – im Gewebe ausrichtet (f, h). Dabei wird eine Kreiselbewegung (Präzession) des Spins hervorgerufen (i). Die dazugehörige Larmorfrequenz hängt vom Magnetfeld ab und beträgt z. B. 42 MHz etwa 1 Tesla. Ein zusätzlich eingestrahelter kurzer Impuls bewirkt dann ein Schlingern, Umgeklappen. Bei der Rückkehr in den Ruhezustand (Relaxation) senden die Protonen ein HF-Signal aus. Seine Intensität und Verzögerung wird gemessen. Ein zusätzliches geringeres Gradienten-Magnetfeld (k) ermöglicht die räumliche Zuordnung der empfangenen Signale. Insgesamt müssen die Magnetfelder jedoch recht kompliziert verändert werden und erzeugen dabei stark klopfende Gräusche. Aus allen Messwerten kann vor allem die gewebeabhängige Dichteverteilung berechnet werden. Die Differenzierung der Gewebe kann durch den Einsatz spezieller Kontrastmittel (v. a. Gadolinium) verbessert werden. Die notwendigen hohen Magnetfelder bis über 10 Tesla fordern supraleitende Spulen und eine starke Abschirmung in der Umgebung. Was u. a. ein Entfernen von Geld, EC-Karten, Schlüsseln, Metallimplantaten, Herzschrittmachern usw. voraussetzt. Mit stark wachsender Leistungsfähigkeit wurde die Geschwindigkeit der Messungen erheblich gesteigert. So ist heute auch eine **funktionelle Tomografie** (fMRT) möglich. Sie gestattet vielfältige Veränderungen, z. B. Abläufe im Gehirn, bei der Durchblutung usw. zu verfolgen. Im detaillierten Aufbau gibt es heute mehrere Varianten und spezielle Anwendungen.

Bei der **Positronen-Emissions-Tomographie** (PET) wird eine leicht radioaktiv „markierte“ Verbindung (Tracer) benutzt, die bei Stoffwechselprozessen vorkommt. Das typische ^{18}F -Fluor-desoxyglukose (FDG) spritzt der Arzt dem Patienten an jenen Ort (Organ), der untersucht werden soll. Alternativ können beispielsweise auch Aminosäure-Analoga verwendet werden. Der Tracer zerfällt und erzeugt dabei γ -Strahlung. Dabei werden die zwei Protonen (γ -Quanten) in entgegengesetzte Richtungen abgestrahlt. Zur Analyse ist das Objekt rings von Detoren umgeben. Jeweils zwei gegenüberliegende Detektoren empfangen dabei korreliert. Jedes so gemeinsam empfangene Signal weist den Ort zwischen ihnen und die gemessene Energie aus. Viele sich schneidende Linien ergeben schließlich ein Bild der jeweiligen örtlichen Stoffwechselrate. Daran ist u. a. zu erkennen, in welchen Regionen des Körpers ein Tumor wächst.

Eine gewisse Ähnlichkeit zu den Tomografien besitzt das **Radar** (Radio Detection and Ranging). Früher wurde es auch **Radio Aircraft Detection and Ranging** genannt. Anfangs war die deutsche Bezeichnung „Funkmeßtechnik“ üblich. Erste Versuche zur Ortung mit Radiowellen führte Christian Hülsmeyer bereits 1904 durch. Sie gerieten aber in Vergessenheit. So gilt heute der schottische Physiker Sir Robert Alexander Watson-Watt (1892 – 1973) als Erfinder. Er erforschte damit Reflexion von Radiowellen in der Meteorologie (1919 Patent). 1935 erfolgte erstmals die Radar-Ortung von Flugzeugen im Meterwellenbereich. Dafür war die Erfindung des Magnetrons an der Universität Birmingham Anfang 1940 ganz wesentlich. Heute werden hauptsächlich unterschieden: Das **Impulsradar** mit kurzen Impulsen konstanter Frequenz und dazwischen der Empfang des Echos über die gleiche Antenne und das **Dauerstrichradar** CW (continuous wave) mit Frequenzmodulation und konstanter Amplitude. Beim letzten wird der Doppler-Effekt zur Geschwindigkeitsmessung ausgenutzt. Das Prinzip des Impulsradars zeigt (m). Der Sender erzeugt die auszustrahlenden Schwingungsimpulse. Sie werden mit unterschiedlicher Verzögerung von den einzelnen

Objekten reflektiert und nach dem Empfang verstärkt. Da die Parabolspiegel-Antenne rotiert, ermöglichen die rückkehrenden Impulse ein Bild der Umgebung. Dabei sind für dort vorhandene Objekte mehrere Aussagen möglich: Raumwinkel bzw. Richtung, Entfernung und Relativbewegung sowie deren Geschwindigkeit mittels Doppler-Effekt. Bei guter Auflösung können aus den Konturen z. B. der Flugzeugtyp usw. abgeleitet werden. Deshalb müssen Radarantennen eine stark ausgeprägte Richtungscharakteristik aufweisen. Die Breite des Strahles ist proportional der Wellenlänge und umgekehrt proportional zur Breite der Antenne. Zur Vermeidung großer Antennen bei mobilen Geräten wird daher ein Mikrowellenradar eingesetzt. Der Dopplereffekt wird analog bei Geschwindigkeitsmessung im Autoverkehr sowie in der Natur mittels Schall u. a. bei Fledermäusen und Walen genutzt.

6.3. Schaltungen

Mit dem Kapitel 6 ist die Kybernetik eingeführt. Der Fliehkraftregler in Bild 65 ist dabei ein historisch wichtiges Beispiel. In der Kybernetik ist der Unterschied von **Steuerung und Regelung** zu beachten. Mit **Bild 96** soll er am Beispiel einer optimalen Raumheizung verdeutlicht werden. Bei der Steuerung (a) werden die Uhrzeit und Außentemperatur gemessen. Mit der Kenntnis ob Sommer oder Winter wird dann gemäß den Messwerten und einer Tabelle die Heizung ein- bzw. ausgeschaltet. Durch diese Maßnahme (Steuerung) dürfte sich häufig eine leidlich „günstige“ Raumtemperatur einstellen. Völlig anders funktioniert die Regelung. Bei ihr wird die Temperatur im Raum gemessen und je nach dem ob sie zu hoch oder zu niedrig ist, wird die Heizung aus- oder einschaltet. Während bei der Steuerung relativ oft die Raumtemperatur ziemlich gut optimal ist, muss bei der Regelung *immer* erst eine hinreichend deutliche Abweichung auftreten, bevor Ein- oder Ausschalten geschieht. So treten in beiden Fällen Abweichungen auf. Das ist bei der Regelung eines Kühlschranks gut bekannt. Fortlaufend treten alle Temperaturen zwischen 8 und 12 °C auf. Die gewünschte Solltemperatur von 10 °C ist dabei sogar die Ausnahme. Durch eine gute, aber sehr aufwändige Steuerung mit Einbeziehung vieler Parameter wäre jedoch Besseres zu erreichen. Als Kompromiss entstand daher die **Regelung mit Störwertaufschaltung**. Um sie besser zu verstehen, wurde sie in (e) der Steuerung in (c) und der Regelung in (d) schematisch verallgemeinert gegenübergestellt. Das zu Beeinflussende (die Heizung) wird durch einen Stoff-Energie-Fluss (rot) ersetzt. An die Stelle der Beeinflussung mit dem Schalter tritt ein Regler für die Stoff-Energie-Ströme. Für ihn zeigen (h) und (j), dass er quasi ein Verstärker (s. Abschnitt 6.1, Bild 71c und 73c) mit vertauschten Eingängen entspricht. So wird schließlich in (e) deutlich, dass die Regelung ein Pendeln um den gewünschten Wert mit Abweichungen bewirkt. Ergänzend dazu ermittelt dann die Steuerung aus den Störungen einen Wert zur weiteren Korrektur. So kann der gewünschte Sollwert immer sehr viel genauer eingehalten werden. Ein Beispiel für die heute übliche Erzeugung von hochstabilen Gleichwerten zeigt (f), vgl. [Völ66].

Weitgehend unabhängig ist die Steuerung auch andersartig nützlich einzusetzen. Wird nämlich der gelbe Messwert in (c) bzw. blaue Sollwert in (f) absichtlich gesteuert verändert, so folgt dem auch die rote Ausgangsspannung. Das geschieht sogar weitgehend unabhängig davon, wie sich die grüne Eingangsspannung durch Störungen ändert. So lassen sich recht genau **gewünschte Spannungsverläufe** erzeugen.

Die typische **Rückkopplung** entstand bereits 1920 mit der Einführung der Elektronenröhre. Inzwischen sind drei Hauptfälle zu unterscheiden (**Bild 96a,b**; s. S. 108):

- Das *zurückgeführte Signal* u_r kann entweder von der Ausgangsspannung u_a oder dem Ausgangsstrom i_a abgeleitet werden. Hierdurch sind Spannungs- oder Strom-Rückkopplung zu unterscheiden.
- Das *Eingangssignal* u_i entsteht aus dem eigentlichen Eingangssignal u_e durch Addieren oder Subtrahieren mit u_r , also gilt $u_i = u_e \pm u_r$. Hierdurch sind Mit- oder Gegen-Kopplung zu unterscheiden.

- Die zurückgeführte Spannung besitzt (erhält) eine Phasenverschiebung φ gegenüber des Ausgangssignals. Beispiele für erzeugte Induktivitäten und Kapazitäten beim Operationsverstärker in Bild 75. Außerdem wird hierauf auch noch bei den Oszillatoren eingegangen.

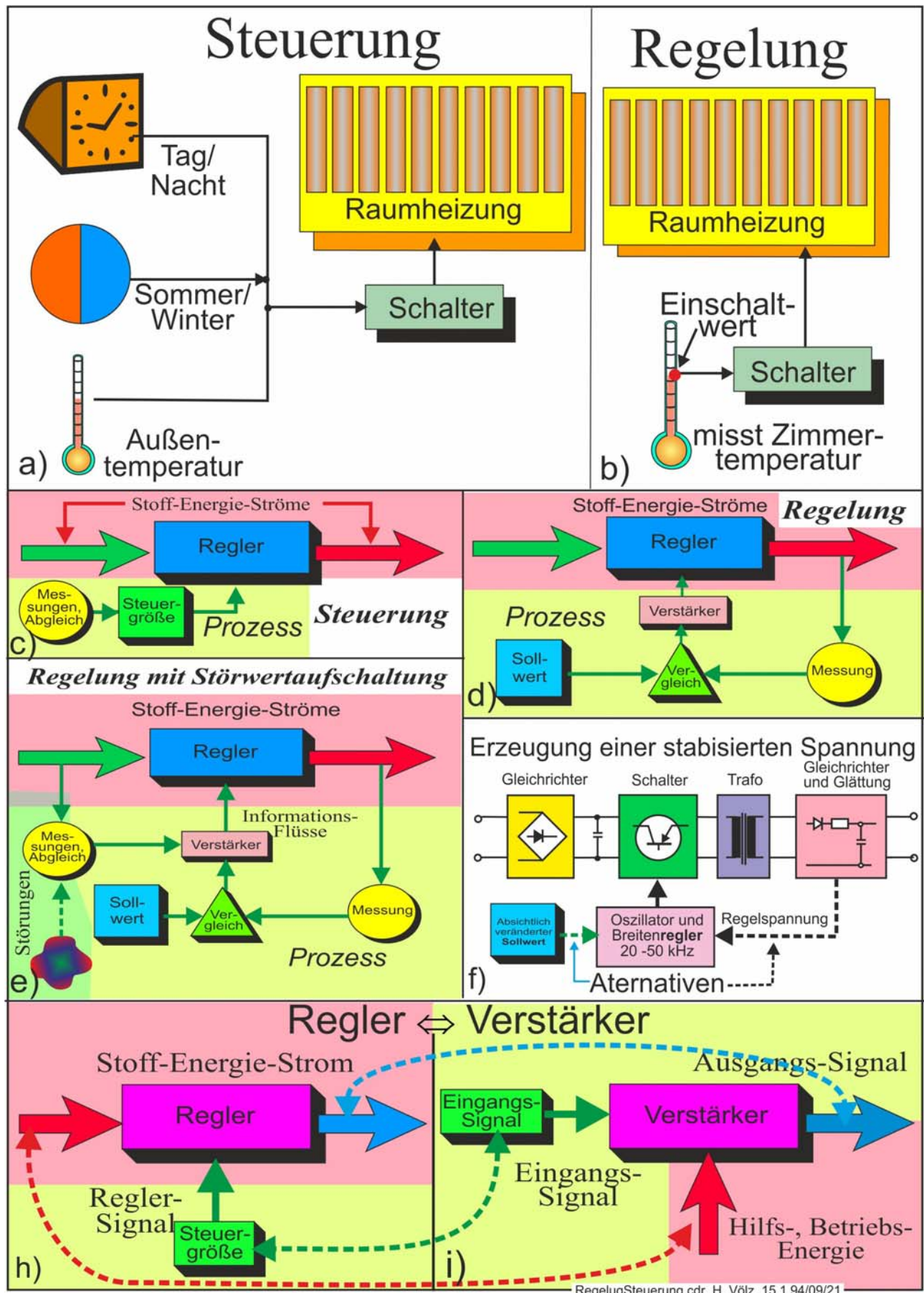


Bild 95. Möglichkeiten der Steuerung und Regelung.

Viele Anwendungen der Rückkopplung erfolgen zur Reduzierung der nichtlinearen Verstärkerkennlinie (Bild 96c und vgl. Bild 71h und 73g). Dazu ist eine Gegenkopplung erforderlich und es sinkt dabei deutlich die Verstärkung. Durch eine kombinierte Strom-Mitkopplung und Spannungs-Gegenkopplung kann damit der ausgangsseitige Innenwiderstand R_i des Verstärkers verändert werden. Hierzu zeigt (d) das Schaltungsprinzip und (e) eine typische Schaltung. R_i kann dabei Null oder sogar negativ werden. Das wird z. B. benutzt, um die Verluste bei der nachfolgenden Schaltung deutlich zu mindern. So können durch einfaches Parallelschalten des Ausgangswiderstandes die Dämpfungen von Leitungen erheblich reduziert werden. Andererseits ist auch möglich durch die so bewirkte Dämpfung unerwünschte Eigenschwingung von Lautsprechern erheblich zu senken [Völ59].

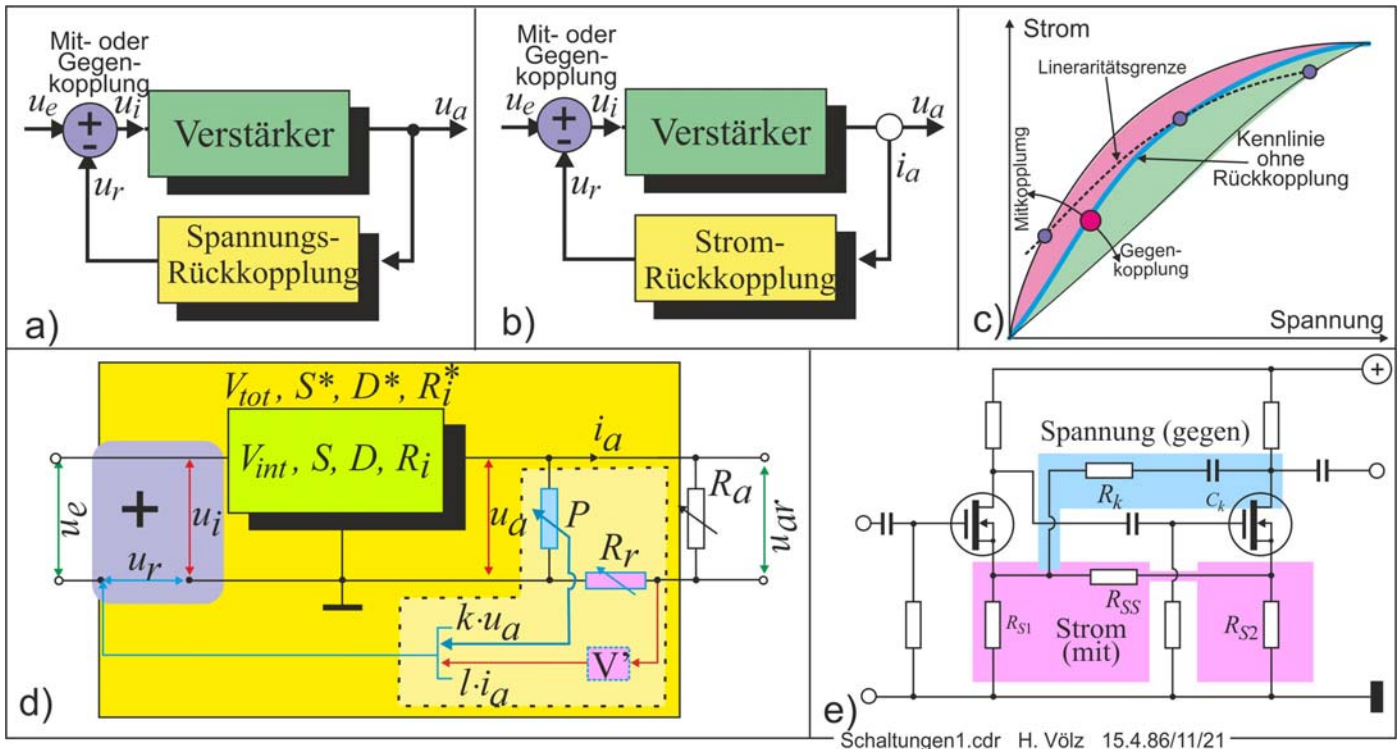


Bild 96. Prinzipien der Rückkopplung, Wirkung bei Kennlinien und Beispiele

Periodische Schwingungen treten recht häufig auf und hängen vielfach mit den Resonanzen⁷¹ von Objekten zusammen, u. a. bei Gläsern, Hohl-, und Lufträumen, Kristallen, Membranen, Oberflächen, Quarzen, Saiten, Stäben und Töpfen. Der Schwingkreis aus Induktivität und Kapazität ist ihr elektromagnetisches Pendant. Eine externe Anregung der Eigenschwingung kann sogar zerstörerische Wirkungen erzeugen. Deshalb darf über eine Brücke nicht im Gleichschritt marschiert werden. Eine durch Ressourcen sich selbst begrenzende periodische Schwingung ermöglicht die Rückkopplung. Derartige Schaltungen existieren in vielen Varianten und werden **Oszillatoren**⁷² genannt. Recht gut einsichtig sind die mit Schwingkreisen aufgebauten elektromagnetischen Varianten (**Bild 97f**). Zwischen ihre R und L „schauelt“ dann die Energie hin und her. Für die weiteren Betrachtungen ist eine Gegenüberstellung mit Verstärkern wichtig (j) und (k). Es ist aber relativ wenig bekannt, dass die Eigenschwingung von Oszillatoren stets durch die selektive Verstärkung der stets vorhandenen und breitbandig thermischen Rauschspannung entsteht. Das wurde bereits bei der Pendelrückkopplung angewendet und ist im Zusammenhang mit Bild 89b bis (g) erklärt. Daher erübrigt sich die Eingangsspannung des Verstärkers. Bei der Einführung der RC- und Phasenschiebergeneratoren traten daher in den 1950er Jahren zuweilen beachtliche Probleme auf. Denn bei ihnen gibt es kein Pendeln zwischen Energiearten zu erkennen, dazu fehlt eine Induktivität. Die wahrscheinlich erste andere Erklärung gab es in [Völ56] durch den Übergang vom selektiven

⁷¹ Lateinisch *resonantia* Widerhall

⁷² Lateinisch *oscillare* sich schaukeln, *oscillatio* das Schaukeln, *oscillum* Schaukel

Verstärker (a) zum Oszillator. Mit Zunahme der Rückkopplung wird die Selektivität der Schaltung immer größer (c), um dann schließlich zur (scheinbaren) Schwingungserzeugung überzugehen. Das lässt sich gut über die Ortskurve der RC-Glieder ableiten (b). Etwas schwieriger ist es beim Phasenschiebergenerator (d) zu verstehen. Bei ihm muss der mehrstufige RC-Tief- oder -Hochpass dafür irgendwo die Phase um 180° drehen (e). Für diese Frequenz erfolgt dann eine positive Rückkopplung. Ganz ohne selektive Bauelemente kommt schließlich der Rechteckgenerator (g) aus. Bei ihm wird fortlaufend, aber abwechselnd einer der beiden Transistoren gesperrt und so entsteht die Rechteckschwingung. Werden in der Schaltung die beiden Kondensatoren durch Widerstände ersetzt so entsteht der Flipflop oder binäre Speicher. Bei ihm kann sich nur ein Zustand für U_1 oder U_2 dauerhaft einstellen (h). Ein Umschalten muss extern erzwungen werden. Prinzipiell lässt er sich auch aus logischen Schaltungen aufbauen (i), vgl. Bild 74.

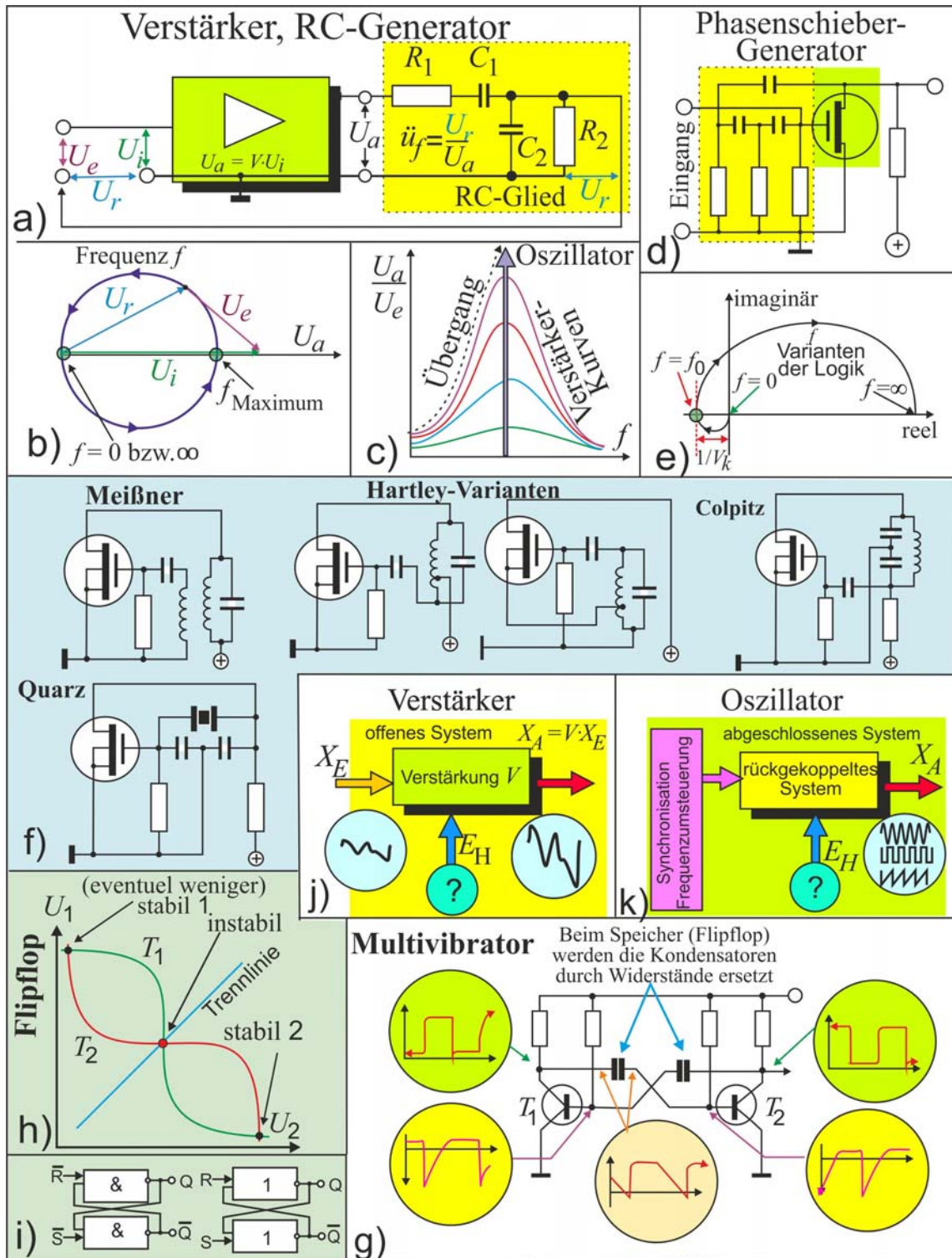


Bild 97. Beispiele für Oszillatoren

Periodische Schwingungen (Oszillationen) treten auch häufig als biologische **Rhythmen**⁷³ auf, wie Puls, EEG, Tag-Nacht- oder Zwei-Minuten-Rhythmus, beim parametrischen Verstärker und MRT. 95f bis j. Mehrere Beispiele zeigt Bild 35. Alle Bio-Rhythmen sind für einen effektiven Ablauf des Lebens als Taktgeber wesentlich, Das wurde aber erst ab etwa 1990 mittels der Rechentechnik deutlich. Im Althochdeutschen steht *ritmusen* für eine gleichförmig abgemessene Bewegung; im 18. Jh. für zeitliches Ebenmaß, gleichmäßige Gliederung eines Ton- oder Bewegungsablaufes und eine entsprechenden Wiederkehr von Vorgängen. Der dagegen abweichende **Takt**⁷⁴ hat mehrere Bedeutungen. Der Begriff kommt im 16. Jh. für eine tastende Berührung ins Deutsche. 1524 taucht er erstmalig für die Uhr des Straßburger Münsters auf, wo ein Engel den Takt zu den Glocken schlägt. Wenig später erscheint er bei den musikalischen Noten als Taktstrich für die kleinste musikalische Einheit. Anfang des 17. Jh. tritt er auch in der Verslehre für die kleinste metrische Einheit (Hebungen und Senkungen der Stimme) und später für den regelmäßigen, durch die Hemmung ausgelösten Schlag der Uhren. Im 19. Jh. wird er für viele technische Einrichtungen, wie den Viertaktmotor, benutzt. Schließlich wird er auch als feines Gefühl für Anstand und Schicklichkeit sowie als Taktik bei Spielen und beim Militär (Strategie) benutzt.

Ludwig Klages (1872 - 1956) unterschied besonders deutlich Rhythmus und Takt [Kla34]. Der Takt ist unveränderlich, nicht anpassungsfähig, exakt festgelegt. Er wirkt auf uns ermüdend und anstrengend, ist betont technisch (Periode und Frequenz). Dagegen betont der Rhythmus das biologische, musikalische Nachbild eines Grundmaßes. Er enthält immer ein „individuelles“ Schwan-ken um den Takt, weicht ständig vom Takt ab, besitzt ihn aber als Mittelwert. Der Takt wiederholt nur, ist das Zeitmuster des Mechanischen; der Rhythmus erneuert sich ständig, ist die Logik des Lebendigen, gliedert die Zeit, aber zerteilt sie nicht wie der Takt. In Analogie hierzu scheint sich auch eine Sprachentwicklung für *Periode*⁷⁵ (mehr technisch, exakt) und *Zyklus*⁷⁶ (mehr zeitlich unbestimmt, aber geschichtlich) zu entwickeln.

Oszillatoren mit der Frequenz f_0 können auf eine extern zugeführte Frequenz f_z gezwungen (*synchronisiert*) werden. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden. Nur bei einer relativ geringen Differenz Δf tritt das sofort und zuverlässige ein: $f_0 - \Delta f < f_z < f_0 + \Delta f$. Das ist der Fangbereich. Ist die Synchronisation⁷⁷ aber bereits erfolgt, so bleibt sie auch bei größeren Abweichungen erhalten (Halte- auch Mitnahmebereich genannt).

6.4. Speicher

In Bild 66 ist **Speichern** als eine besondere Eigenschaft der Kybernetik ausgewiesen. Doch sie ist viel mehr. Bereits der Beginn von Kapitel 3 zeigt, dass die Ständigkeit der Naturgesetze, Konstan-ten usw. eigentlich eine Speicherung sein muss. Auch für das Erkennen von Änderungen bei den Objekten ist sie unabdingbar. Daraus ergibt sich dann unmittelbar, dass sie auch die unabdingbare Voraussetzung für jegliches Wahrnehmen von Zeit ist (vgl. Bild 34). Speichern besitzt also eine sehr umfangreiche und grundlegende Bedeutung und Anwendungsbreite. Das gilt vor allem im Deutschen, wo der Begriff besonders weit gefasst genutzt wird. Deshalb ist er mit Bild 22 am Bei-spiel der langfristigen Lagerung von Äpfeln eingeführt. Daraus ist dann das technische Strukturbild abgeleitet. Es besteht vorwiegend aus Aufzeichnung, Speicherzustand und Wiedergabe. Dennoch existieren viele Varianten. Der einfache Fall ist die minimale Speicherung, bei der nur die Wieder-

⁷³ Griechisch *rhythmós*, Lateinisch *rhythmus*. gleichmäßige, taktmäßige Bewegung, Im Althochdeutschen steht *ritmusen* für gleichförmig abgemessene Bewegung; im 18. Jh. für zeitliches Ebenmaß, gleichmäßige Gliederung eines Ton- oder Bewegungsablaufes, gleichmäßige Wiederkehr von Vorgängen.

⁷⁴ Lateinisch *tactus* Berührung, Gefühlssinn, Gefühl, *tangere* (*tactum*) berühren, beeindrucken, Tonfall der Rede

⁷⁵ Griechisch *periodos* Umhergehen, Gang um etwas herum, Kreislauf der Zeit und der Gestirne, regelmäßige Wie-derkehr in der Zeit, Zeitabschnitt, abgerundeter Redesatz, Abteilung im Vers. Lateinisch *periodus* Kreislauf, gegliederter Satz und Satzschlusszeichen

⁷⁶ Griechisch *kyklos* Kreis, Umkreis, Rad, kreisförmiger Gegenstand, Kreislauf Lateinisch *cyclos* Kreis, astronomi-scher Zeitkreis, Erd-, Sonnen-, Mondkreis

⁷⁷ Griechisch *synchronos* gleichzeitig, von gleicher Dauer und Zeit; Griechisch *chronos* Zeit

gabe des Speicherzustandes existiert (Bild 24). Wie extrem umfangreich jedoch die Speicherung vorkommt, zeigt das Inhaltverzeichnis der dreibändigen, etwa 2500 Seiten umfassenden Ausgabe [Völ03] bis [Völ05] mit Bild 24. Mit den beiden folgenden Tabellen sind dann die acht geschichtlichen Etappen der Speicherung mit ihren Eigenschaften sowie ihren Vor- und Nachteilen kurz aufgelistet. Nur auf diesen Grundlagen ist nämlich unser Gedächtnis zu verstehen und beim Erkennen der Realität gut einzuordnen sowie in GG, KZG und LZG zu klassifizieren (Abschnitt 3.1). Bei den Prognosen des Abschnittes 3.4 wurde deutlich, dass eine neue Speicheretappe immer dann ziemlich genau auftritt, wenn die letzte Etappe zu 85% ausgeschöpft ist (vgl. Bild 43c). Hierauf wird im Folgenden noch zusätzlich eingegangen. Während Prognosen zumindest teilweise gültig und damit auch nützlich sind, gibt es kaum analoge Rückrechnungen (Abschnitt 3.5 und Bild 45). Daher ist für Aussagen über die Vergangenheit die Speicherung unumgänglich. Mit den Tokens (Bild 55) ist weiter gezeigt, das mit dem Übergang zur Schrift eine besonders leistungsfähige Art der Speicherung begann. Im Kapitel 5 ist dann gezeigt, dass **Wissen** eine sehr spezielle Speicherung von Fakten und Geschehen ausschließlich in unserem Gehirn ist (Bild 58 und 63).

Bis um 1995 war die Kapazität von Speichern immer viel zu klein (s.u. Bild 100). Daher musste das notwendige Volumen für die einzelne Speicherzelle von 1 Bit systematisch reduziert werden. Mittels der Informationstheorie ist eine Grenzabschätzung möglich **Bild 98a** Das Volumen einer Speicherzelle ist in (b) als Grenz-Volumen deutlich hervorgehoben. Bei der Wiedergabe muss sie eine hinreichende Energie bereitzustellen, deren Berechnungsweg (a) zeigt. Allgemein existieren für 1 Bit energetische Stufen, die vor allem durch Quanten oder ausgewählte Teilchen, wie Atome oder Elektronen gegeben sind. Ferner sind auch Begrenzungen durch thermische Effekte möglich. Für sie folgt die minimale Energie aus der Shannon-Kanalkapazität (nächster Abschnitt)

$$C = B \cdot \text{ld} \left(\frac{P_n + P_s}{P_n} \right).$$

Darin bedeuten B die Bandbreite des Kanals, P_s die Leistung des Signals und P_n die Leistung der Störungen (noise). Mit der Boltzmann-Konstante $k \approx 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K und der absoluten Temperatur T gilt für rein thermisches Rauschen

$$P_n = k \cdot B \cdot T.$$

Wenn der Störabstand der Signalleistung das z -fache der Rauschleistung $P_s = z \cdot P_n$ ist, dann gilt

$$C = B \cdot \text{ld} (1+z).$$

Für das Verhältnis von Signalleistung zur Kanalkapazität folgt somit

$$\frac{P_s}{C} = k \cdot T \cdot \frac{z}{\text{ld}(1+z)} \quad \text{in } \frac{\text{J}}{\text{Bit}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\text{W}}{\text{Bit/s}}.$$

Aus der Reihenentwicklung folgt die beidseitige Begrenzung zu

$$\frac{z}{\text{ld}(1+z)} = \frac{1}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{3} - \frac{z^3}{4} \pm \dots} \quad \text{gilt } 1 < \frac{z}{\text{ld}(1+z)} \rightarrow 1 \quad \text{für } z \rightarrow 0.$$

Der Grenzwert für $z \rightarrow 0$ bedeutet zwar, dass das Nutzsignal im Vergleich zur Störung extrem klein ist. Shannon hat aber gezeigt, dass auch unter solchen Bedingungen zumindest theoretisch eine fehlerfreie Übertragung für 1 Bit möglich ist. Jedoch ist dafür eine unendlich lange Dekodierzeit erforderlich. Also gilt (vgl. [Scz29] und [Völ82], S. 44ff):

$$\frac{E}{\text{Bit}} \geq k \cdot T \cdot \ln(2).$$

Der Wert lässt sich auch quantentheoretisch für ein 2-Bit-System herleiten [Völ82]. Bei etwa Zimmertemperatur, also 300 K ergeben sich so die Werte

$$E/\text{Bit} \geq 3 \cdot 10^{-21} \text{ J} \cong 5 \cdot 10^{11} \text{ Hz} \cong 5 \cdot 10^{-22} \text{ cal} \cong 26 \text{ mV}$$

Damit ist die Energie für Bild 98 bestimmt.

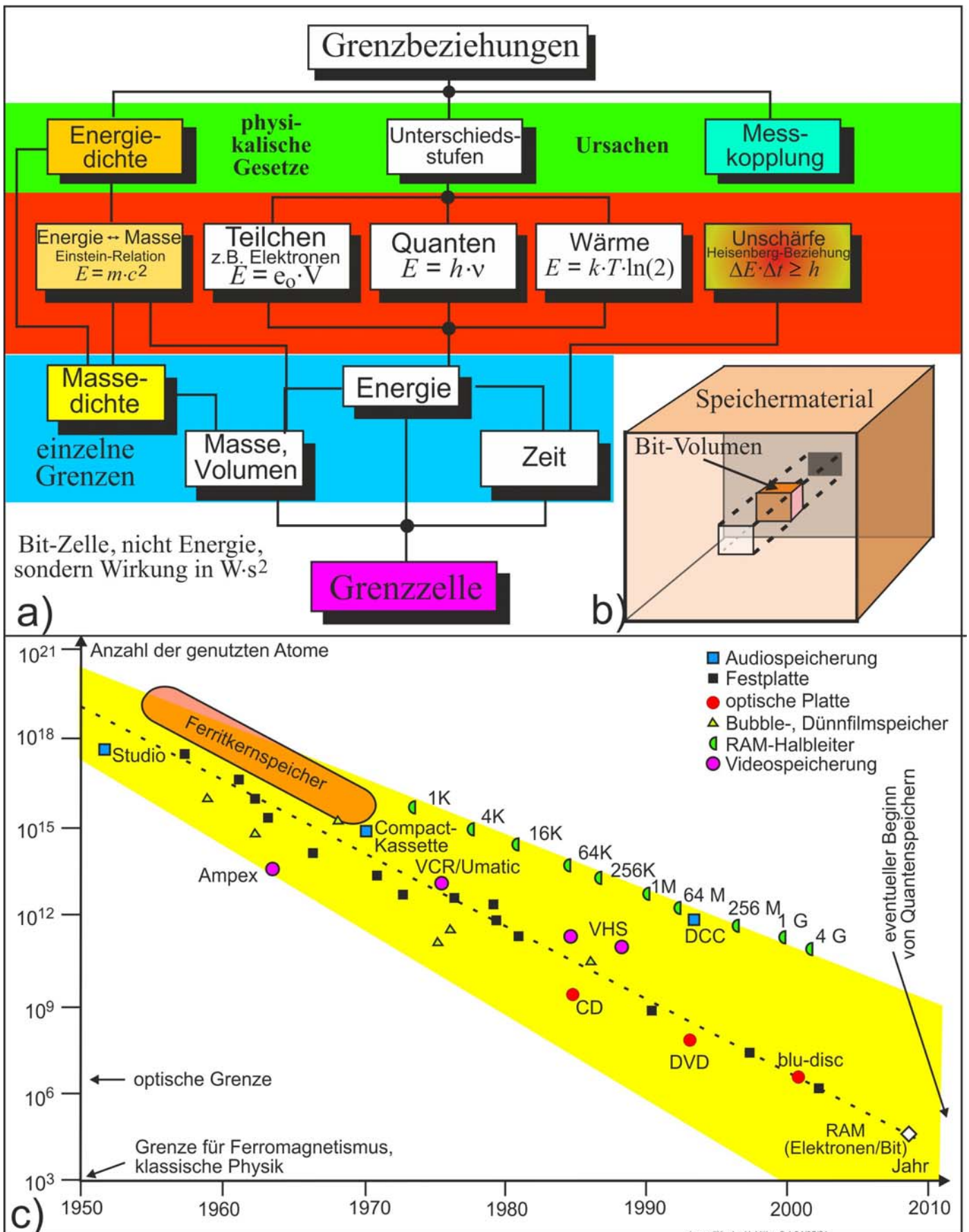


Bild 98. Zur Bestimmung der Grenzzelle (a) und den geschichtlich erreichten Werten

Die Größe des minimalen Volumens folgt aus der maximal möglichen Energiedichte im Material, also im Prinzip aus der Einsteinrelation $E = m \cdot c^2$. Jedoch selbst bei Atomkraftwerken sind nur weitaus geringere Werte nutzbar. Nach vielen technischen Abschätzungen (Kondensator-, Magnet-

Energie usw.) ergibt sich $E_{\max}/V \leq 0,5 \text{ J/cm}^3$ [Völ67]. Das entspricht etwa der Grenze der klassischen Physik mit ca. 1 000 Atomen. Eventuell ist für einen Speicher auch die **Masse** zu beachten. Dafür kann dann die Massedichte von Festkörpern zu etwa 1 bis 10 g/cm^3 angenommen werden. Bei der Aufzeichnung muss die Energie in die Grenzzelle eingebracht werden und sollte bei der Wiedergabe möglichst vollständig zurück gewonnen werden können. Dabei tritt aber zumindest die Heisenberg-Unschärfe auf. Deshalb wird die Zeit $\Delta t \geq \Delta E \cdot h$ benötigt und es folgt

$$\Delta t \geq \frac{h \cdot \ln(1+z)}{k \cdot T \cdot z} \geq \frac{5 \cdot 10^{-11}}{T}.$$

Bei Zimmertemperatur $T \approx 300 \text{ K}$ und dem Störabstand $z \approx 60 \text{ dB}$ (1:1 000) folgen so etwa 10^{-13} s .

Recht ähnliche Produktbildungen wie $\Delta t \cdot \Delta E$ treten auch in anderen Zusammenhängen auf. Für digitale Logikschaltungen ist es z. B. das Produkt aus Schaltzeit mal Energie. Bei der Speicherung ist aber ähnliches kaum beachtet worden. So wundert sich z. B. Schrödinger, dass bei der Genetik die Nukleinsäuren (DNS) mit ihren geringen Energieschwellen hinreichend lange stabil sind [Sch51]. Wird jedoch die technisch betrachtet, sehr langsame Duplikationszeit (ca. 2 000 Sequenzen/s) berücksichtigt, so entstehen Werte, die durchaus mit der Erfahrung übereinstimmen.

Grenzen existieren aber nicht nur für die Speicherzelle, sondern auch bei den Speicherprozessen. So muss bei der Aufzeichnung die entsprechende Energie exakt in das kleine Volumen der Speicherzelle hinein konzentriert werden und darf dabei keine Nachbarzelle beeinflussen. Das leistet selbst ein Magnetkopf mit seinem sehr engen Spalt von deutlich weniger als ein μm nur ungenügend. Denn die Länge seines Spaltes (die Spurhöhe auf dem magnetischen Material) ist kaum unter einem mm nutzbar. Von allen erdenklichen Verfahren, dürfte aber nur die Lichtfokussierung noch bessere Werte ermöglichen. Für eine Optik mit der Apertur A_n beträgt bei der Wellenlänge λ der Durchmesser des Brennflecks $D \approx 0,6 \cdot \lambda / A_n$ und seine Länge $L \approx \lambda \cdot A_n$. Das Brennvolumen ist daher unabhängig von der Apertur und beträgt

$$V_{Br} \approx \lambda^3.$$

Bereits mit sichtbarem Licht ist damit ein Volumen möglich, das (heute) kaum von einem technisch genutzten Verfahren erreicht zu erreichen ist. Mit der Frequenz ν des Photons und der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ folgt für die Energie eines Photons

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Bei der Bündelung auf das Brennvolumen V_{Br} herrscht dann dort die Energiedichte

$$w = \frac{E}{V_{Br}} = \frac{h \cdot c}{\lambda^4}, \text{ also gilt } \lambda = \sqrt[4]{\frac{h \cdot c}{w}}.$$

Mit einer hinreichend kurzen Wellenlänge wären daher theoretisch beliebig hohe Energiedichten erreichbar. Daher gilt für die optische Aufzeichnungsdichte keine theoretische Grenze. Aber wegen der maximal möglichen Energiedichte des Speicherzustandes von $w \approx 0,5 \text{ J/cm}^3$ folgt dann eine Grenzwellenlänge von 25 nm, also fernes ultraviolettes Licht. Mit dem daraus folgenden Volumen von 500 nm^3 ergäbe sich die Speicherdichte von $\approx 10^{22} \text{ Bit/m}^3$. Obwohl für die Halbleiterlithographie Strichbreiten unter 20 nm möglich sind, dürfte wegen der weitaus dickeren Halbleiterschichten auch auf längere Sicht kein so kleines Volumen erreichbar sein. Für die Zukunft bestehen also noch erhebliche Reserven. Dabei ist aber zu beachten, dass die einzelnen Speicherzellen auch voneinander isoliert sein müssen und Zuleitungen benötigen.

Bei der **Wiedergabe** ist eine energetische Kopplung mit dem Speicherzustand erforderlich. Damit Nachbarzellen nicht miterfasst werden, ist auch hier die hohe räumliche Konzentration notwendig. Maximal kann dabei die gesamte Energie des Speicherzustandes zurück gewonnen werden. Dann wird jedoch automatisch der Speicherzustand zerstört. Eine nicht zerstörende Wiedergabe kann folglich nur deutlich weniger Energie, nämlich bis zu einer Stabilitätsschwelle E_0 nutzen. Wegen des Wirkungsgrades der Wiedergabewandler wird die wirklich genutzte Energie noch zusätzlich

Zu den einzelnen eingekreisten Zahlen sind noch einige Ergänzungen nützlich. Die ersten vier sind Hauptgruppen der Speicher, die weiteren notwendige Ergänzungen:

- ① Die kleinste Kapazität besitzen immer noch die **Halbleiterbausteine** (blau), die erst ab etwa 1975 verfügbar sind. Neben den dRAM wird heute der Flash sehr umfangreich benutzt.
- ② Als **primäre Speicher** (lila) werden hier die Arbeitsspeicher von Rechnern betrachtet. Eigentlich sind sie erst mit der Entstehung des Heimcomputers (ab ca. 1975) und des Personal-Computers (ab 1981) vorhanden. Diese Entwicklung bewirkt den steileren Anstieg der Kurve um 1985. Doch der Speicherausbau in den Großrechnern verlief vorher ähnlich. Hier wurden dann aber zunächst Elektronenröhren verwendet.
- ③ **Sekundäre** (braun) oder früher **interne** Speicher betreffen den gesamten Speicherausbau eines Rechners. Heute sind das vor allem Festplatten. Sie besitzen immer eine deutlich längere Zugriffszeit als die primären Arbeitsspeicher. Genau deshalb sind sie hierfür bereits beachtlich durch Flash ergänzt.
- ④ Für umfangreiche Anwendungen und Backups sind oft wesentlich größere Speichereinrichtungen erforderlich (rot). Sie benötigen einen eigenen Stellplatz oder sogar spezielle Räume. Heute werden dabei überwiegend Datenbanken mit Robotern (**tape-libraries**, Magnetbandarchive) angewendet, die dann bei Bedarf die einzelnen Medien aus einem großen Lager entnehmen und dem Speichergerät zuführen. Sie können als Weiterentwicklung der ganz frühen externen Speicher von Großrechnern angesehen werden und setzen deren Tendenzkurve ab etwa 1975 fort.
- ⑤ **Datenbanken** (blau) erfassen unter einem weitgehend einheitlichen Gesichtspunkt viele Fakten und Dokumente für Recherchen zusammen. Sie sind daher besonders groß. Das Bild enthält je eine Kurve für die typischen Mittelwerte und für größte Datenbanken.
- ⑥ Aufschlussreich sind auch die weltweit **verkauften Festplatten** (grün), die wohl weitgehend für das Internet eingesetzt werden.
- ⑦ Sie kennzeichnet den aktuell weltweit vorhandenen **elektronischen Datenbestand** (oben, blau). In der letzten Zeit wurde dabei der Bestand auf Papier deutlich überschritten.

Für die Entwicklung des **Speicherpreises** gilt **Bild 100**. Infolge der unterschiedlichen Währungen und des abnehmenden Geldwertes existiert dabei eine Unsicherheit. Dennoch ist der stetig sinkende Wert in Dollar/MByte deutlich ausgeprägt. Ein Bruch tritt dennoch unvermittelt um 1995 ein (a). Bis dahin war immer viel zu wenig Speicherkapazität verfügbar.

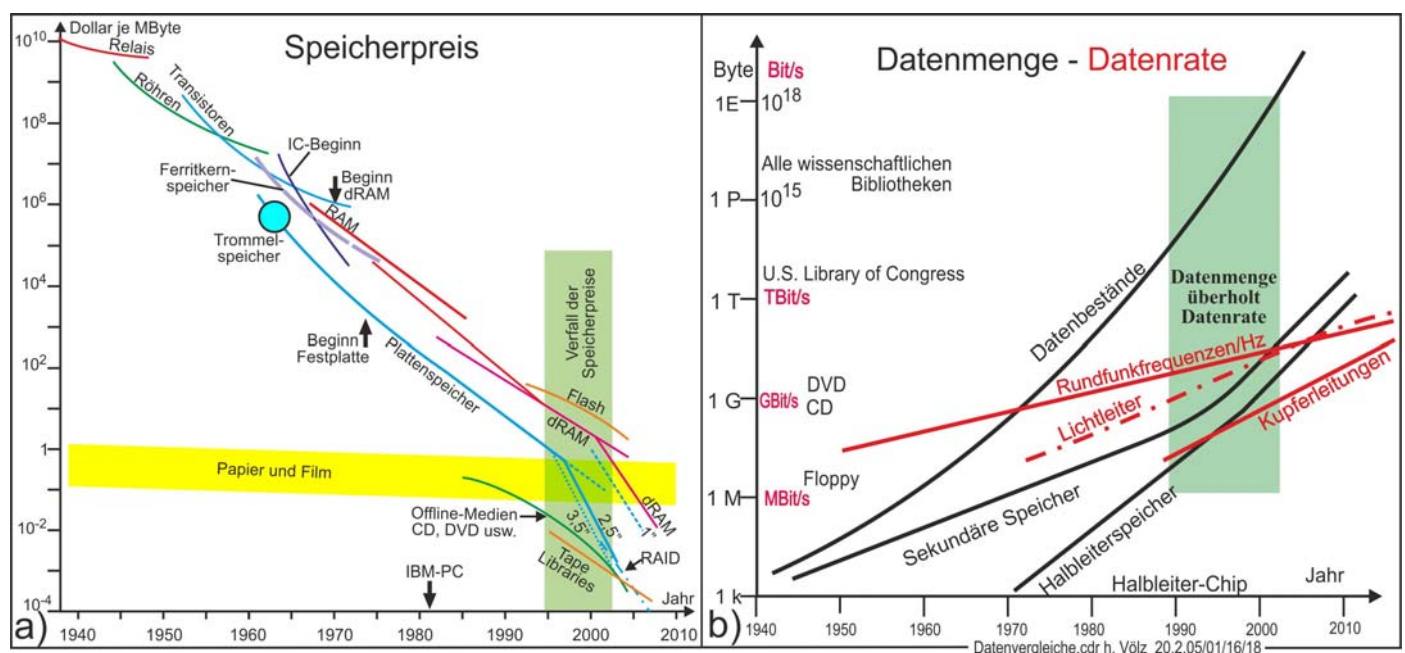


Bild 100. Zeitliche Änderung des Byte-Preises (a) und der Datenrate (b). Aus (a) folgt, dass der Bit-Preis bis 1995 logarithmisch gleichbleibend jährlich um 1:0,7, insgesamt also auf $1:10^{10}$ sinkt.

Ab 1955 wurden ziemlich unvermittelt mehr als ausreichend viele Speicher produziert. Kurzfristig stark schwankende Preise und ihr schnelleres Sinken waren die Folge. Doch hiermit fallen zufällig (?) weitere Größen zusammen: Einmal ist es das Zusammentreffen mit dem Papierpreis (grün). Aber auch ab hier nehmen die Datenbestände stärker zu als die Datenraten (b). Die Konsequenzen sind noch nicht bekannt. Damit gekoppelt ist auch der nächstwichtige Kennwert, die **Zugriffszeit**. Sie steht aber, wie ich wohl als erster bereits 1967 mit **Bild 101a** zeigte, in hoher Korrelation zur Speicherkapazität [Völ67]. So ergeben sich Flächen innerhalb denen der jeweilige Speicher einigermaßen effektiv zu realisieren ist. Daher ist die geschichtliche Darstellung nur für drei Zeiten erfolgt. In b) sind drei typische Zugriffsgrenzen zu erkennen. Der manuell menschliche Zugriff beginnt bei etwa 1 s, (grün) und der durch mechanischen Antrieb (Festplatte und Magnetband) bei ms. Der elektronische beginnt schon vor bei μ s. In den Bildern sind auch nichttechnische Verfahren und weitere Grenzen eingetragen, die hier jedoch nicht wesentlich sind.

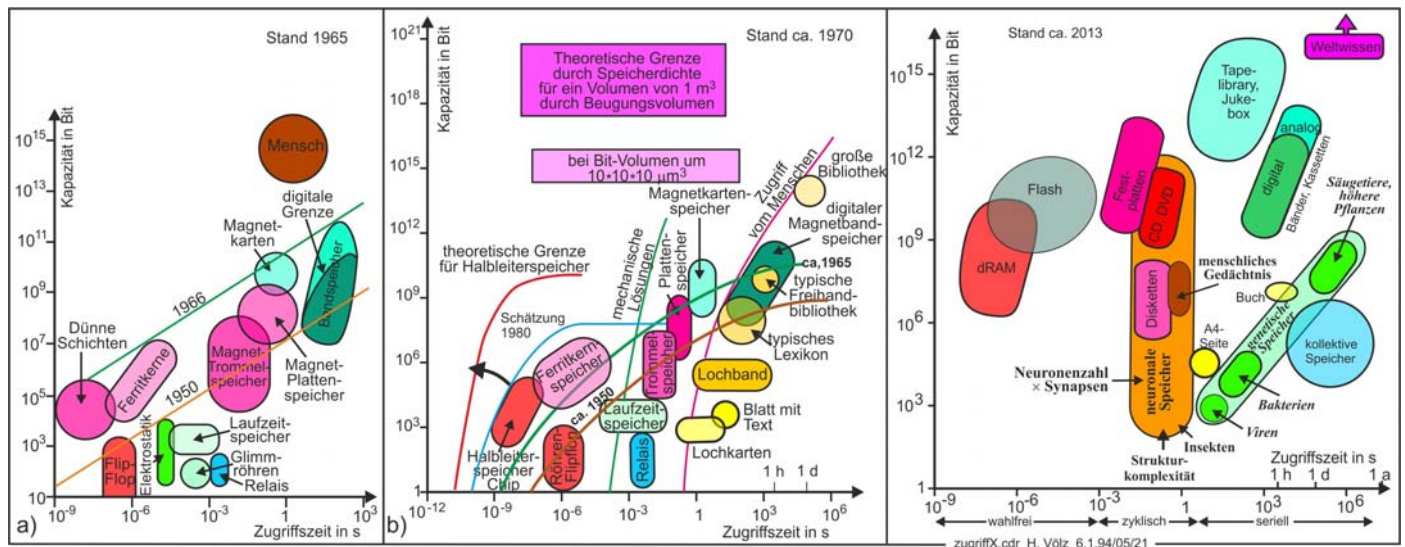


Bild 101. Die Speicherkapazitäts-Zugriffsflächen für 1965, 1970 und 2013.

Die meisten Speicher sind aus vielen, gut voneinander isolierten Speicherzellen für 1 Bit aufgebaut, die dann für die Aufzeichnung und Wiedergabe auch einzeln angesteuert werden müssen. Zuweilen werden dabei auch mehrere Zellen zu einem Speicher-Wort zusammen gefasst und dann gemeinsam angewählt. Für die Auswahl bei der Speicherung und Wiedergabe sind fünf unterschiedlichen Zugriffsprinzipien zu unterscheiden. Im **Bild 102a** sind dabei auch einige Beispiele genannt:

1. Die **Daten** werden selbst bewegt und zwar zu den Speicherzellen hin bzw. von ihnen zurück. Dafür gibt es unterschiedliche Prinzipien. Relativ einfach ist die Codierung (Entscheidung) über *Multiplexer* (b). Aufwändiger ist die *Matrix*auswahl über Zeile und Spalte (c). Sie kann durch eine Zwischenspeicherung gemäß RAS (row address memory) und CAS (column a.m.) auch nacheinander über buffer erfolgen (d).
2. Die **Aufzeichnungs-** und **Wiedergabe-Einrichtungen** werden an den Ort der Speicherzelle bewegt. (e) blau).
3. Das **Material** (Medium), welches die Speicherzellen trägt, wird bewegt (rot).
4. **Schaltungen** und **Material** werden bewegt.
5. **Alles ruht**. Es gibt entweder keine eigentlichen Speicherzellen. Bei der Holgrafie sind Daten irgendwie über das Speichermedium verteilt. Beim assoziativen Speicher (CAM content address memory) erfolgt die Wiedergabe über den Inhalt der Speicherzellen (s. u.).

Benötigt das Speichermedium für den Zugriff eine getrennte, zusätzliche Aufzeichnungs-, Wiedergabeeinrichtungen, dann liegt ein **Offline-Medium** vor, das eine bessere Archivierung mit geringerem Volumen je Bit ermöglicht. Ist dieser Zugriff aber mit eingebaut, so ist es ein **Online-Medium**. Offline-Medien, das meist schnelleren Zugriff ermöglicht (e=.

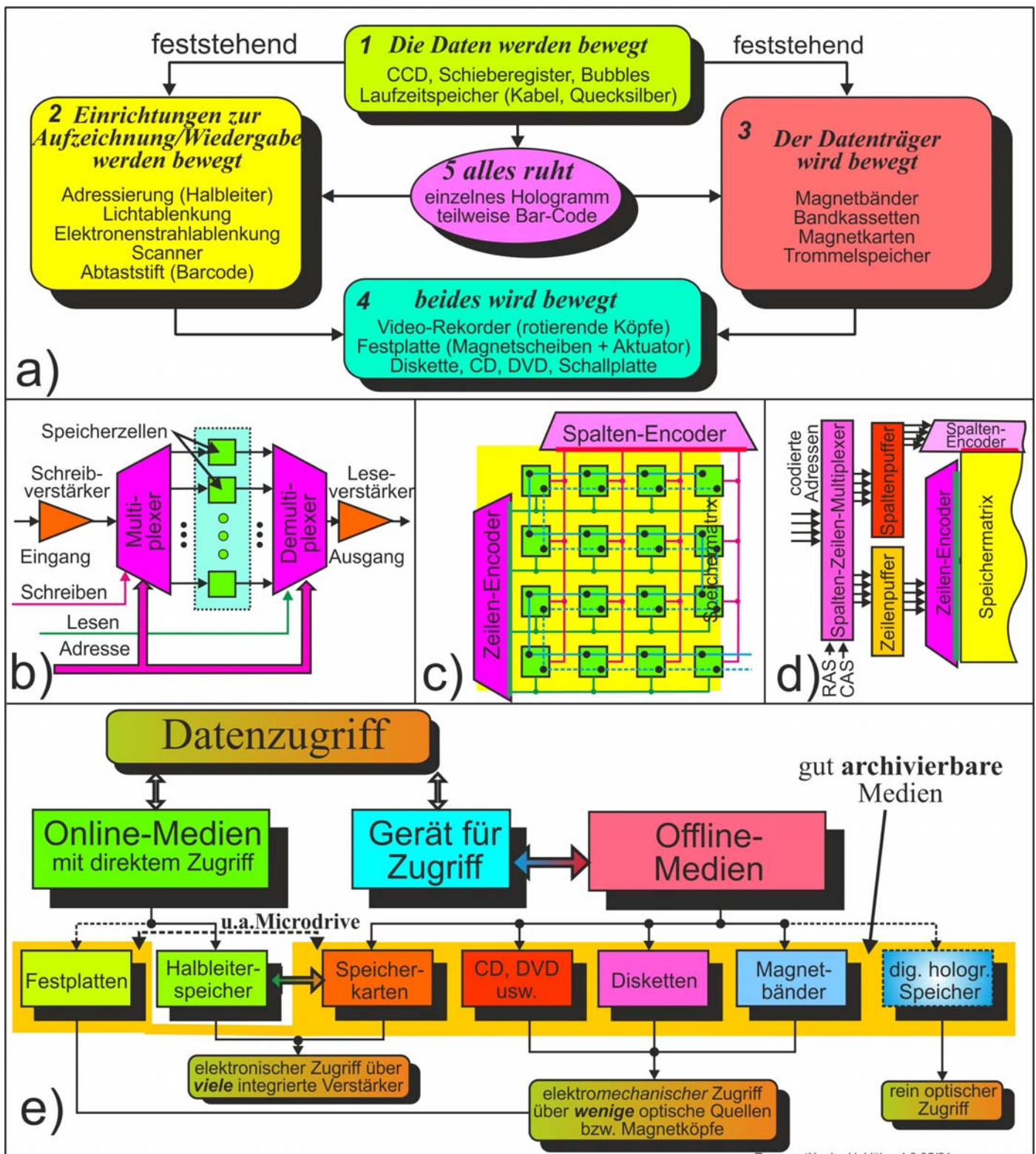


Bild 102. Zugriffsarten auf die einzelnen Speicherzellen eines Mediums.

Eine stark vereinfachte Erklärung des Prinzips der **Holografie** ist mittels **Bild 103a** möglich. Beobachter an verschiedenen Orten (A oder B) können durch ein Fenster unterschiedliche Ausschnitte der Realität betrachten. Zur weiteren Erklärung muss zuvor die übliche Strahlenoptik durch die Wellenoptik ersetzt werden. Dann wandert die Lichtfront der Realität durch das Fenster hindurch zum Beobachter. Wird nun diese Lichtfront im Fenster gespeichert, so enthielte sie fast die gesamte Realität. Wäre die Speicherung unterschiedlich durchsichtig, so könnte ein sie durchdringendes Licht die Wellenfront im Fenster ersetzen. Das Problem der Holografie besteht jedoch darin, einen entsprechenden Speicher zu realisieren. Das erfordert aufwändige Interferenztechniken, auf die hier nicht weiter eingegangen sei. Die Folge ist aber, dass jeder Teil des Hologramms das Bild des voll-

ständigen Raumwinkels der Beobachter enthält. Auch jeder abgeschnittene Teil der Speicherung enthält alles weiter. Dadurch wird jedoch mittelbar das Fenster kleiner und es sinkt die Auflösung des zu Sehenden. Das demonstriert (b).

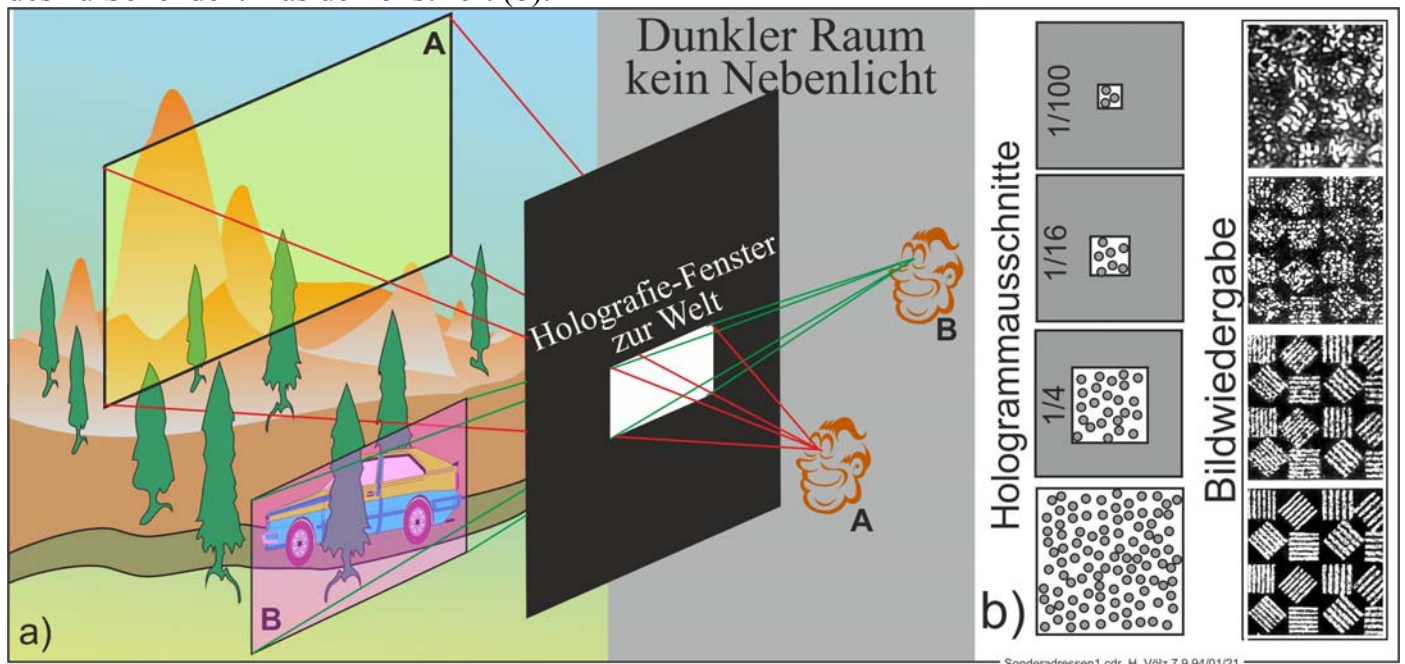


Bild 103. Stark vereinfachte Beschreibung der Holografie.

Bei den heute üblichen großen Datenmengen reichen die üblichen sequentiellen Suchverfahren oft nicht mehr aus. Dafür entstand bereits in den 1950er Jahren der *assoziative*⁷⁸ **Speicher** mit voll parallelem Zugriff auf all seine Daten. Hierfür wurde der Name CAM (content access memory) als Gegensatz zum anderen SAM (serial addressable memory) geprägt. Seinen prinzipiellen Aufbau zeigt **Bild 104**. Zu einem Datensatz gehört eine Zeile. Die gesamte Tabelle enthält Spalten für unterschiedliche Eigenschaften, die nur teilweise in die Suche einbezogen werden. Außerdem werden dabei der Schlüssel- und Zusatzteil unterschieden. Mit der folgenden Tabelle wird das Prinzip erklärt. Sie sei der Auszug aus einer großen Datenbank für eine Partnersuche und enthält die wichtigsten persönlichen Daten der Suchenden. Von einer Frau werden nun z. B. unverheiratete, männliche Personen im Alter von 25 bis 35 Jahren mit dem Hobby Foto gesucht. Mit der entsprechenden Maske brauchen dann nur die gelben Spalten berücksichtigt zu werden. Wo dabei dann Übereinstimmung mit der Suchanfrage besteht wird in der Spalte Marke ein „*“ gesetzt. Jede Speicherzelle verlangt hierbei leider 10 Bit.

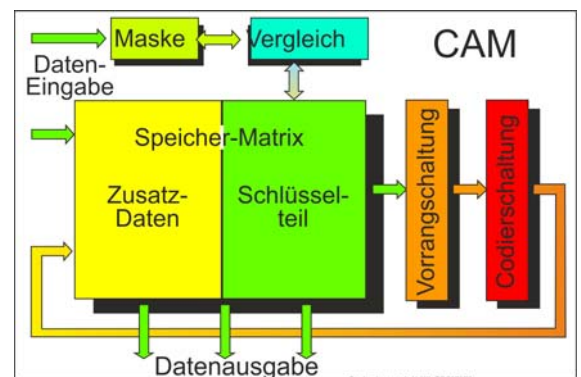


Bild 104. Grundstruktur eines assoziativen Speichers

Nr.	Name	weiblich	Alter	ledig	Kinder	Hobby	Marke
45	Meyer	0	30	0	0	Theater	
46	Müller	1	35	1	1	Briefmarken	
47	Schulze	0	27	1	2	Foto	*
48	Altmann	0	40	1	0	Foto	
49	Schmidt	1	30	0	2	Reisen	
50	Lindner	0	28	1	0	Foto	*
Maske	×	0	25 – 35	1	×	Foto	

⁷⁸ Lateinisch *ad-* hin, zu und *socius* Gefährte.

Für die **Gültigkeit** (Haltbarkeit) der Daten sind in **Bild 105** drei Fälle unterschieden. Einmal werden Daten im Laufe der Zeit einfach ungültig bis unbrauchbar und sie werden daher durch neue ersetzt (a). Dann altern die Speichermedien und werden unzuverlässig. In (b) ist der übliche Nutzungsbereich in einem etwas gespreizten Zeitraum (gelb unterlegt) ausgewiesen. Verlängerungen der Haltbarkeit sind teilweise mittels Fehlerkorrektur möglich. Drittens altern die Geräte und werden durch neue, bessere ersetzt. Die alten werden als „moralisch“ unbrauchbar ausgewechselt. Hierdurch können an sich noch gültige Daten leider infolge neuer Codierungen usw. nicht mehr zurückgewonnen werden. Der hierbei meist relativ kurze gültige Zeitraum ist durch „|“ gekennzeichnet. zum Vergleich ist unten in (b) aufgezeigt, in welchen Zeiträumen ansonsten Daten gültig sind.

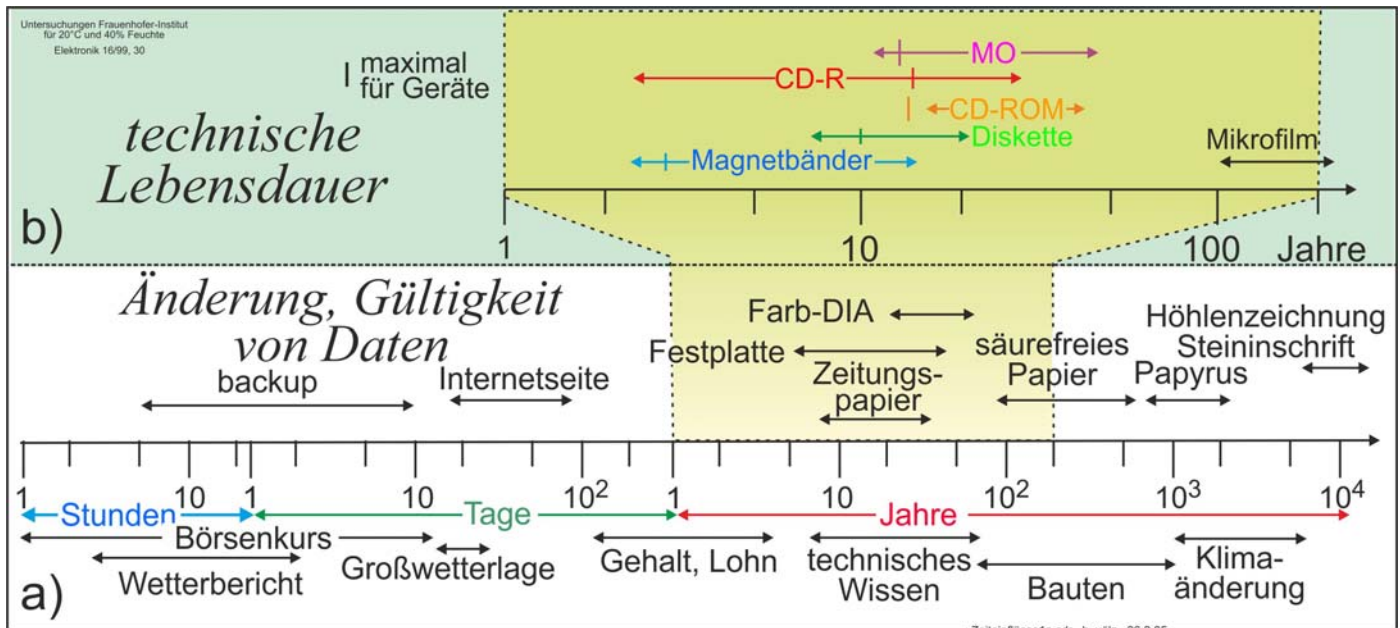


Bild 105. Die Haltbarkeit (Gültigkeit) von Daten.

Die Geschichte der menschlich externen Speicherung beginnt mit der Schrift und den Höhlenbildern (s. Bild 55 – 57). Der Beginn der technischen Speicher beginnt weitreichender mit dem Aufheben von Werkzeug, in dem der Gebrauch gespeichert ist. Bereits 1847 wies P. J. Proudhon darauf hin, dass alle menschlichen Werkzeuge zugleich Träger und Instrumente des Wissens sind. Wenn vom Druck abgesehen wird, dann entstehen die ersten Datenspeicher ab 1850 mit der Fotografie. Die folgende, umfangreiche Entwicklung fasst **Bild 106** zusammen. Sie ist oben nach den drei Medientypen: Bild, Film und Ton unterteilt und dann im gelb unterlegten Bereich für Bild und Ton detaillierter dargestellt. Im unteren Bildteil ist für die Medien ab etwa 1940 jener Zeitbereich ausgewiesen, in dem sie massenweise genutzt wurden. Nach ihrer Einführung endeten einige recht plötzlich, was durch die Totenköpfe gekennzeichnet ist. Ungewöhnlich verkürzt erscheint die Anwendung vor allem bei den optischen Speichern (CD, DVD usw.) und den Disketten. Eigentlich haben bis heute nur drei Varianten überlebt: die elektronischen Speicher, die digitalen Magnetband-speicher für Archive und die Festplatten mit einem schnelleren Zugriff. Die letzten beiden schrumpfen aber bereits beachtlich durch die elektronischen Speicher. So sank der Anteil der Festplatten am weltweiten Speichervolumen von etwa 70 % um 2000 auf 15 % bereits um 2017. Trotz vieler Ansätze – s. [Völ07] ab S. 661 – sind aber auch einstweilen keine neuen Speichervarianten – etwa quantenphysikalische – zu erwarten. Das alles ist eigentlich recht erstaunlich, denn es gab ja Zeiten, wo alle nur erdenklichen Methoden für Speicher genutzt wurden. So konnte um 1970 Lerner eine Zusammenstellung mit über 30 Varianten ausweisen [Ler79].

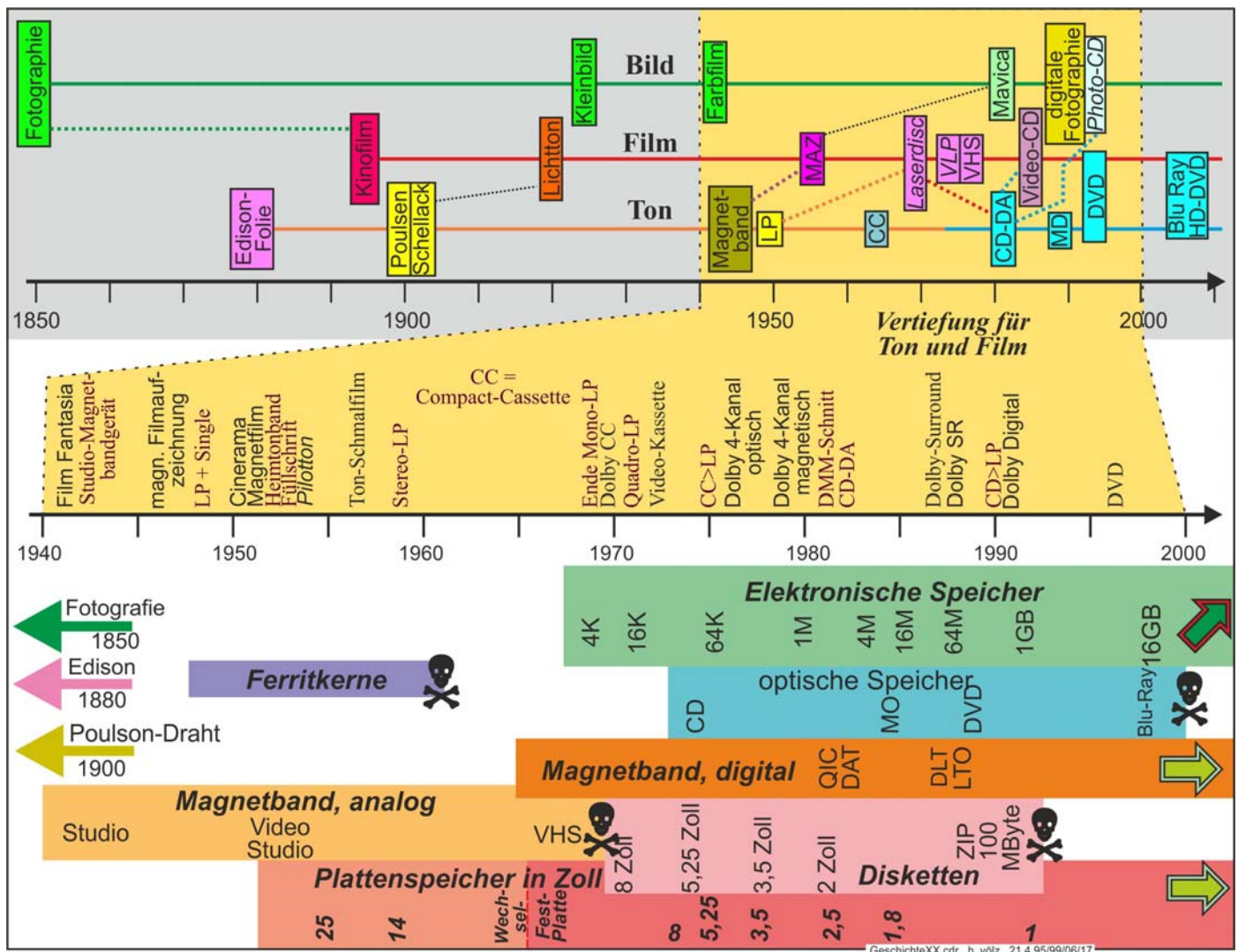


Bild 106. Überblick zur geschichtlichen Entwicklung der technischen Speicher.

Heute existieren bestenfalls noch die folgenden fünf Medientypen. Eigentlich werden davon nur noch die Medien 2. bis 4. umfangreich benutzt. Die anderen beiden sind im Prinzip leicht zu ersetzen. Es gibt jedoch außertechnische Gründe dafür, dass sie und insbesondere 5. noch weiterbestehen:

1. **Direktmedien**, die vorwiegend ohne besondere Hilfsmittel betrachtet werden, wie Zeitungen, Bücher und Bilder. Im erweiterten Sinn sind hier auch die Mikrofiche einzuordnen. Sie haben den Vorteil, dass sie sehr lange beständig sind und gut zu archivieren sind sowie keine „neuartigen“ Wiedergabeverfahren erfordern. Stets genügt eine relativ einfache Lupe. Die wichtigste Varianten Buch hat immer noch seinen hohen kulturellen Wert und besteht immer noch, obwohl es schon mehrfach tot gesagt wurde. Es ist direkt lesbar und auch unterwegs lesbar. Sie fehlen absichtlich im Bild 106.
2. **Elektronische Speicher** besitzen den Vorteil sehr schneller Wiedergabe und meist auch Speicherung. Inzwischen erreichen sie sogar fast die Speicherkapazitäten der anderen Verfahren. Als Flash bleiben inzwischen die aufgezeichneten Daten auch ohne Spannungsversorgung oder Refresh über lange Zeit erhalten und können auch beliebig oft wiedergegeben werden. Allerdings sind sie bei der Aufzeichnung deutlich langsamer. Neben mehreren wenig bedeutsamen Varianten sind noch die ROM (read only memory) wichtig. Ihnen werden gleich bei der Produktion die erforderlichen Daten unveränderlich eingepreßt. Vielleicht sind die elektronischen sogar das einzige Medien, das langfristig oder gar ewig überlebt.
3. **Festplatten** sind die gebräuchlichsten Medien für sehr große Speicherkapazitäten bis zu vielen TByte. Sie enthalten rotierenden Magnetplatten und auf die notwendige Spur bewegte

Köpfe. Das bedingt immer einen gewissen Verschleiß, so dass ihre typische Lebensdauer bei grob 10 bis 20 Jahre liegt. Außerdem sind sie deutlich langsamer als die elektronischen Medien, aber für die meisten Daten noch hinreichend schnell genug. Sie lassen sich leicht zu großen Speichersystem mit zuweilen tausenden von Gräten zusammenfassen. So verwenden sie u. a. die größten Datenbanken der Welt. Es ist nicht anzunehmen, dass sie in absehbarer Zeit durch andere Medien ersetzt werden.

4. Das **Magnetband** wurde schon mehrfach für tot erklärt. Es ist aber für einige Anwendungen in seiner digitalen Form immer wieder unersetzbar geblieben. Es besitzt mit Abstand die höchste Speicherdichte, ist vergleichsweise äußerst preiswert und sehr langfristig zu lagern. Noch immer werden Bänder aus dem letzten Krieg in der Erde gefunden und können dann wiedergegeben werden. Viele tausende Bänder können in einem Archiv so gelagert werden, dass ein Roboter das Band mit den gewünschten Daten zu einer Lesestation transportiert. Das dauert zwar vergleichsweise lange Zeit, ist aber bei vielen Archivdaten oft mehr als ausreichend. Schließlich ist das immer noch viel schneller als in einer sehr gut geführten Bibliothek für Bücher.
5. **Rotierende Medien wie CD, DVD und blue ray** werden immer noch benutzt, obwohl ihre Speicherdaten als eigentlich überholt sind. Und relativ leicht offline zu gewinnen sind, bz durch elektronischen Medien ersetzbar sind. Vielleicht gilt dabei der gleiche Grund wie bei Schallplatten „Man hat etwas „nostalgisches“ in der Hand, kann es pflegen und verschenken“. Außerdem sind sie wie Bücher ihrer Inhalts wegen gut verkäuflich.

Langfristig dürften daher nur die elektronischen Speicher Bestand haben. Das wird sogar noch durch die zunehmenden Verfahren der Datenkomprimierung verstärkt. Daher ist es unverständlich, dass in den Lehrbüchern und Vorlesungen der **Elektronik** Speicher so gut nie vorkommen. Die Grundlagen der Elektronik gehen von den *kombinatorischen* und *sequentiellen* Schaltungen aus. Allerdings werden sie je nach Autor oft auch etwas anders bezeichnet (**Bild 107a**). Aus ihnen werden dann die weiteren elektronischen Schaltungen bis zum Computer usw. abgeleitet. (b). Die Speicher erscheinen dabei nur als ein Beispiel unter anderen. So geht sogar die entscheidenden Eigenschaft des Speichers, nämlich die Begründung der Zeit und nur so mögliche Kenntnissen über die Vergangenheit völlig verloren. Sie wird einzig als Parameter für elektrische Signale benutzt.

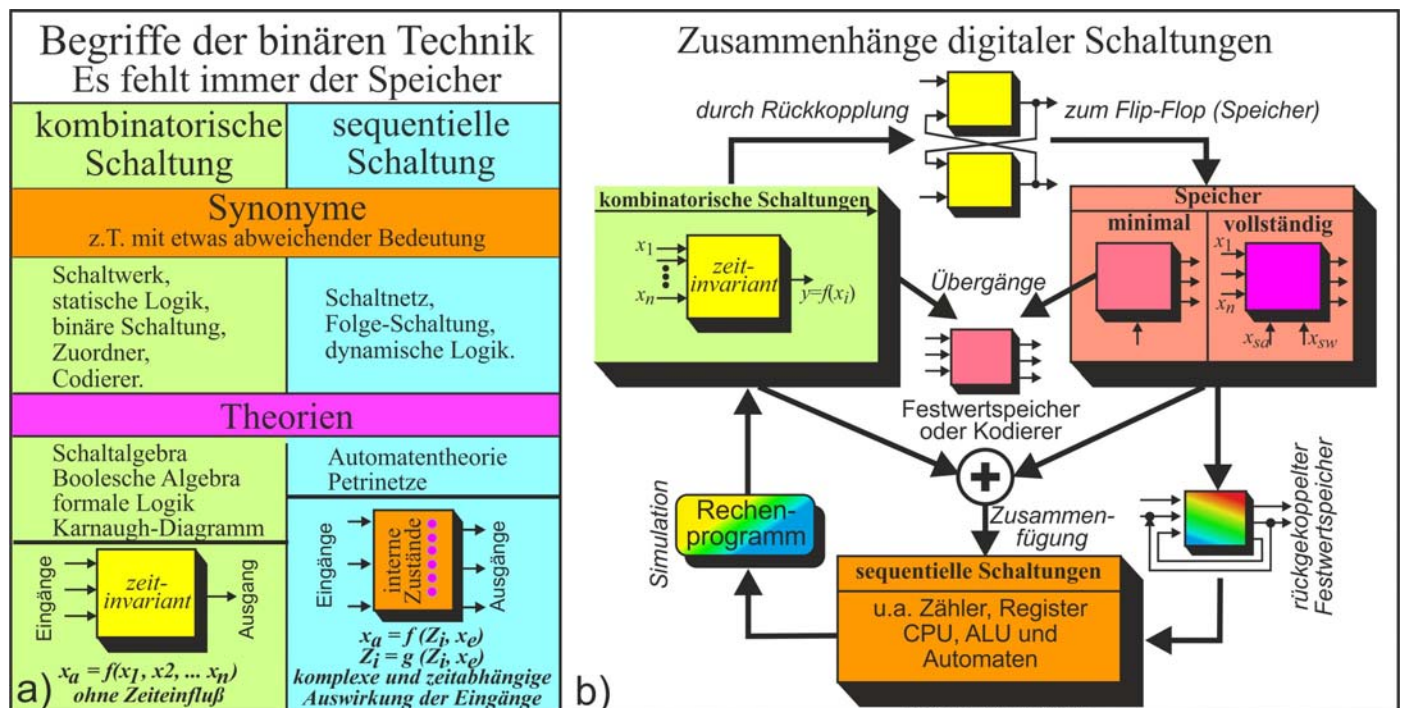


Bild 107. Die elektronischen Grundsaltungen kennen keinen Speicher.

Zum Abschluss der Speicherung ist es noch sinnvoll, auf die acht Speicheretappen der Tabellen von Seite 37 einzugehen. Dabei sei auch noch daran erinnert, dass jede Etappe neben ihren Vorteilen auch erhebliche Nachteile besitzt, die sogar sehr zerstörerisch sein können. Die Aussagen der voranstehenden Bilder zu den Speicherdaten ermöglichen nämlich erst ein tieferes Verständnis von **Bild 108**. Dabei geht (a) wesentlich auf [Kap72] zurück. Bei ihnen ist deutlich die 85%-Regel zu erkennen (vgl. Bild 43 und zugehörnden Text). Die dann folgenden Etappen gehen auf eigene Abschätzungen zurück [Völ19]. Die Sättigung folgt mittelbar aus Bild 99 und die stark zunehmende Datenkompression. Der nicht direkt sichtbare Übergang zur achten Etappe, der vernetzten Speicherung, ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet. Wesentlich hierfür ist der umfassende und immer schneller werdende Zugriff auf alle Daten. Er steht in mittelbaren Zusammenhang zum Preisverfall der Speicherung um 1995 gemäß Bild 100.

Den fundamentalen Zusammenhang mit der Zeit zeigt noch einmal (c). Hierbei sei an das Problem der Rückrechnung (Abschnitt 3.5 und Bild 46) und der subjektiven Vergangenheit (Bild 37) erinnert. Die Grenzen der Prognose (Abschnitt 3.4) und der Rückrechnung betreffen auch den Laplace'schen Dämon (Bild 10).

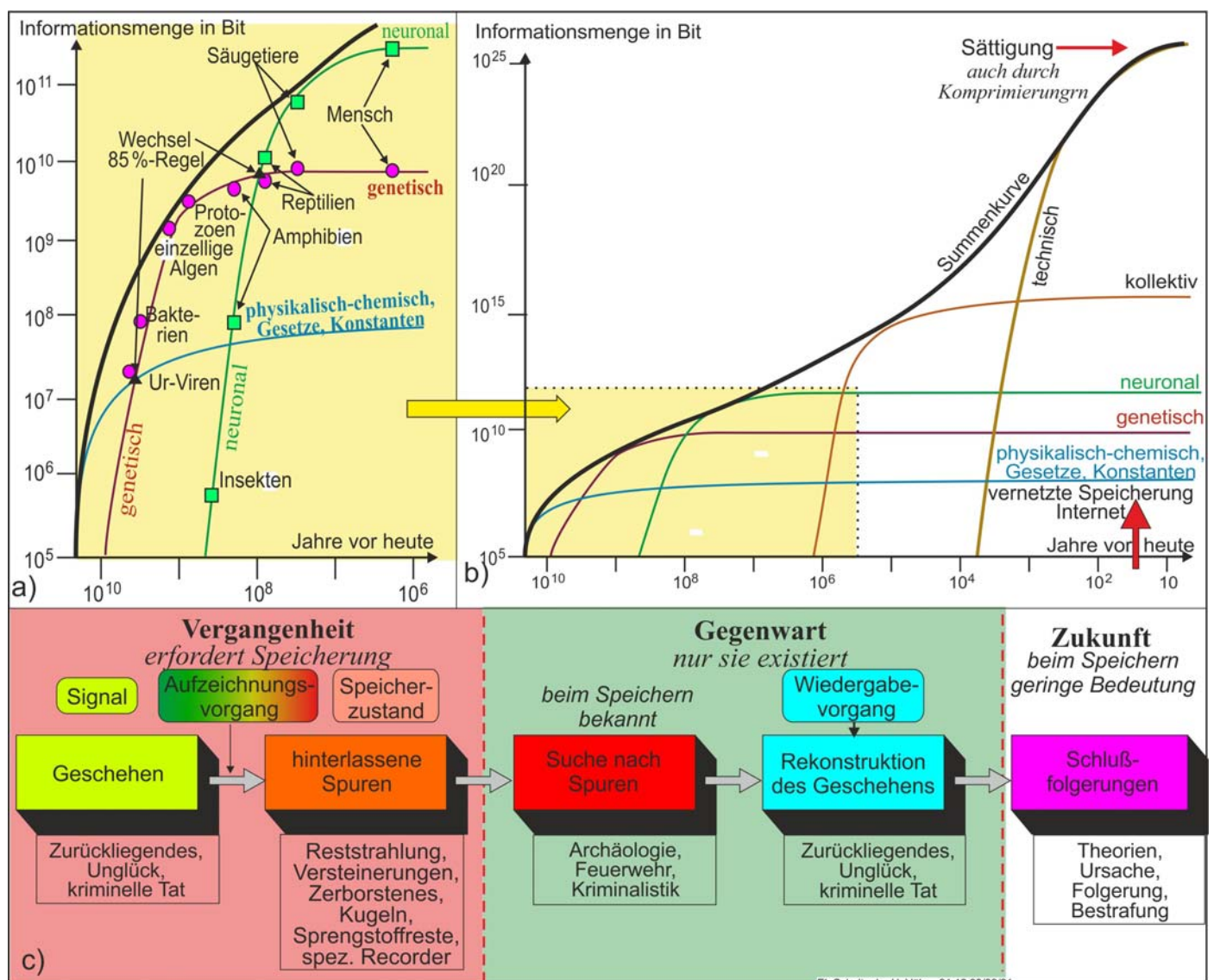


Bild 108. Zeitlicher Verlauf der acht Speicheretappen und der Zusammenhang mit der Zeit.

6.5. Information

Der Begriff „Information“⁷⁹ kam vom Griechischen und Lateinischen im 15. Jh. ins Deutsche. Lange Zeit hieß dann der Hauslehrer Informator. Jedoch in allen Lexika des 19. Jh. fehlt Information vollständig. Erst Norbert Wiener verwendet ihn wieder erneut und zwar innerhalb der von ihm begründeten Kybernetik, jedoch ohne eine Erklärung. Einen zumindest teilweise brauchbaren Hinweis enthält lediglich das folgende Zitat [Wie48] S. 192:

„Trotzdem ist die Energie, die für eine einzelne (geistige H.V.) Operation verbraucht wird, beinahe verschwindend gering und bildet nicht einmal ein angemessenes Maß der Funktion selbst. Das mechanische Gehirn scheidet nicht Gedanken aus »wie die Leber ausscheidet«, wie frühere Materialisten annahmen, noch liefert sie diese in Form von Energie aus, wie die Muskeln ihre Aktivität hervorbringen. Information ist Information, weder Stoff⁸⁰ noch Energie. Kein Materialismus, der dieses nicht berücksichtigt, kann den heutigen Tag überleben.“

Mit der Entwicklung der Rechentechnik wurde Information immer mehr im Sinne Datenverarbeitung (Informationstechnik) benutzt. Bald wurde auch die Arbeit von Claude Elwood Shannon einbezogen [Sha76] und sogar als zentrale Arbeit zur Informationstheorie angesehen. Doch die Arbeit enthält im Original das Wort überhaupt nicht, sondern nur „communication“, und betrifft auch nur die Effektivität der Datenübertragung. Bald entstanden viele Publikationen, ja dicke Bücher, über und zur Information. Es gab jedoch keinen Versuch zu einer „brauchbaren“ Definition. So wurde das Wort immer mehr und schließlich hauptsächlich im folgenden Sinn benutzt:

„Wir erhalten Information über“ oder „Er übermittelt mir Information (zu)....“ usw.

Hierbei betrifft Information: Aussagen zu, Wissen über, Inhalte von Etwas, also meist einem Objekt oder Geschehen und das kann dabei fast alles sein! Daher kann dann Information auch nur noch sehr mittelbar auf das obige Zitat bezogen werden. Der umgangssprachliche Gebrauch des Wortes „Information“ hat sich offensichtlich seit Wieners Einführung erheblich geändert.

In den beiden umfangreichen Bücher zur Information [Völ82] und [Völ83], die leider nur in einer 300er Auflage erscheinen durften, versuchte ich wohl erstmalig und auf der Grundlage des obigen Zitats eine brauchbare Definition. Ausführlicher erfolgte das dann 1994 mit [Völ94]. So wurden Stoff, Energie und Information die drei sich überlappenden und ergänzenden Beschreibungsmodelle der Realität (**Bild 109a**). Das verbeulte grüne Gebilde soll die Realität möglichst ohne jegliche Assoziation darstellen. Es gibt auch Bereiche, die mit keinem der Modelle erklärt werden können und andere welche von einem Modell beschrieben werden können, die es aber in der Realität nicht gibt. Information ist dann besonders nützlich, wenn die anderen beiden Modelle zu umständlich, zu komplex werden. Der Übergang zwischen Stoff und Energie erfolgt nur teilweise mittels des gemeinsamen Energieträgers (b). Zur beispielhaften Vertiefung existiert (d). Für einen Verbrennungsmotor ist der Energieträger Benzin. Aus ihm wird mittels des Systems, dem Motor, Energie gewonnen. Doch dabei bleibt ein Rest von nicht benutztem Stoff zurück, z. B. als Abgas usw. Als oberer Grenzwert gilt für derartige Umwandlungen die Einsteinformel $E = m \cdot c^2$. Darin bedeuten E die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit. Dabei entsteht der Informationsträger. Dieser Begriff stellte sich später als sehr unglücklich (ja eigentlich falsch) heraus. Denn er trägt nicht die Information, dann wäre sie ja ein Objekt! Er ist die Ursache für den Prozess der Information. So wurde daraus **Informer** gebildet. Für die Formeln oben in (a) gehören dann auch die Ableitungen zur elementaren Speicherzelle ab S. 111 und im Kontext von Bild 98. Doch auch der (obere, grüne) Rest braucht einen eigenen Namen, zunächst wurde ähnlich unglück-

⁷⁹ Griechisch *typos*, *morphe*, *eidos* und *idea*. *informare* bedeutet etwas eine Form geben. Lateinisch *informatio*, *informationis* Auskunft. Später Bildung mittels Unterrichten, Belehren, Erklären usw., aber auch etwas Gestalten.

⁸⁰ Im Original steht „matter“, was im Kalten Krieg (absichtlich?) falsch als philosophische Materie mit dem Gegensatz zu Bewusstsein übersetzt wurde und damit kein Drittes (Information) zuließ. Ich wählte daher Stoff [Völ91].

lich „Getragenes“ gewählt. Endgültig wurde aber **Informat** gebildet. So lautet nun die **Definition** der Information (e):

*Information ist ein dreistufiger kybernetischer Prozess, bei dem ein **Informer** als Ursache auf ein **Informationssystem** einwirkt und dabei im System selbst und/oder dessen Umgebung das **Informat** erzeugt.*

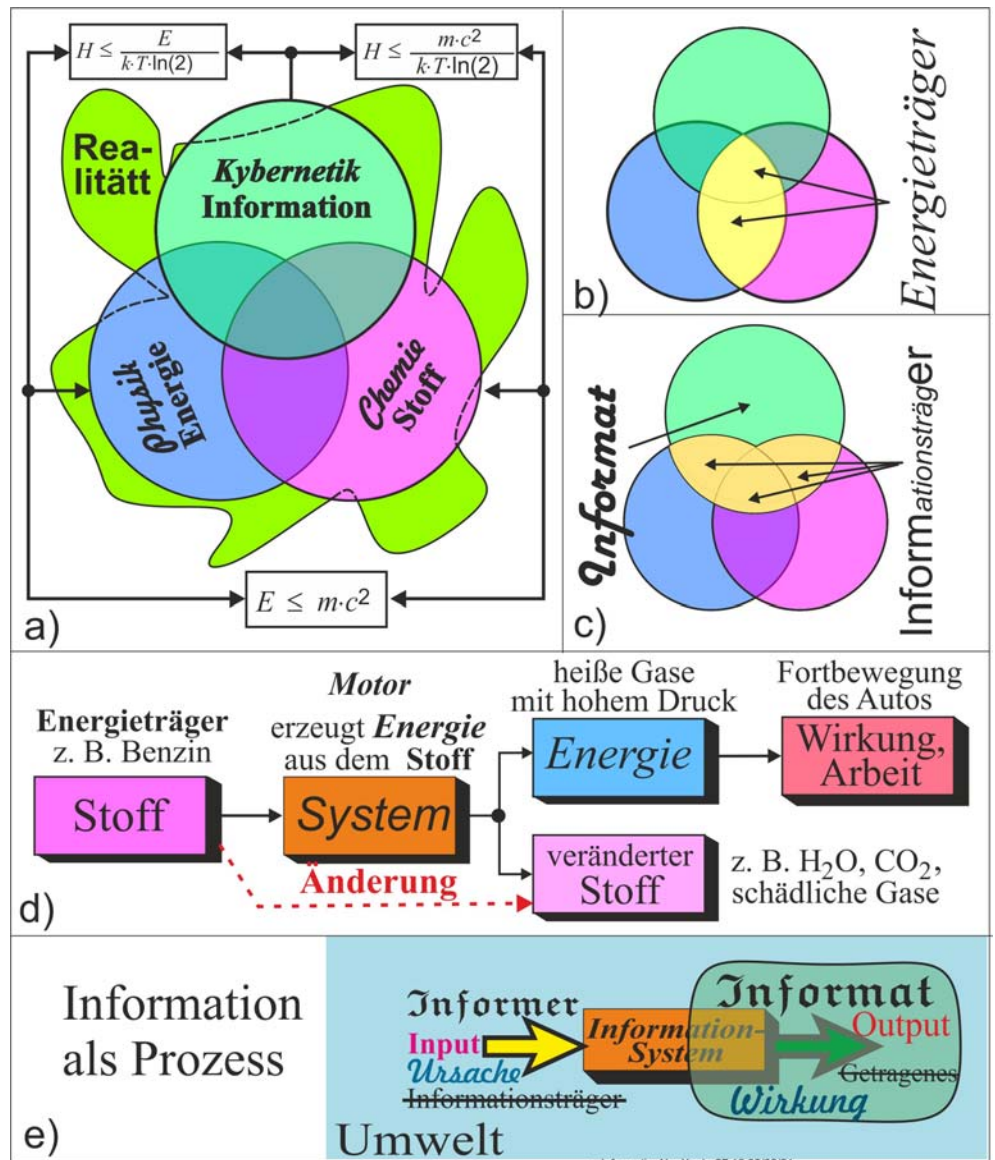


Bild 109. zur Einführung und Definition von Information,

Aus der Definition folgt somit erneut das frühere Bild 66d. Der Prozess der Information erfasst dabei aber meist keine physikalischen oder sonstigen Gesetze. Im Sinne der kybernetischen Analogiebetrachtungen genügen vollauf die Beschreibung des Vorganges, seine Erscheinung oder sein Ablauf. Dabei ist allerdings zu beachten, dass im Prozess sich alle drei Teile gegenseitig bedingen. Wenn z. B. ein und derselbe Informer auf ein anderes System einwirkt, dann entsteht fast immer auch ein anderes Informat. Dafür ist ein Verweis auf die kybernetischen Schaltungen (vgl. Abschnitt 6.3 und 6.4) nützlich. Wenn das System ein Mensch ist, dann entsteht aus den verschiedenen Informaten in seinem Gehirn das **Wissen**, so wie es Bild 58 und 66d ausweisen. Da jedoch zuweilen eine unklare Trennung zwischen Information und Wissen auftritt, sei hier die geschichtliche Entwicklung der Begriffe nach dem deutschen Google als **Bild 110** eingefügt. Wissen ist deutlich älter als Information jedoch Information ist weitaus umfassender und erreicht ab etwa 1970 eine fast gleiche Häufigkeit. Das ist aber noch nicht in (e) deutlich sichtbar. Hierzu müssen erst alle ihre zusätzlichen Anwendungen einbezogen werden. Das erfolgte mit Buchstabenvorsätzen zunächst noch relativ unvollständig in [Völ14], dann weitgehend vollständig in [Völ17]. Die letzte Fassung fand wohl erstmalig größere Beachtung. Das wird u. a. deutlich in einer sehr positiven Rezension der Computer-Zeitschrift c't, deren Ende lautet [Sch18]:

Als Ergebnis liefert Völz tatsächlich etwas in mancher Hinsicht Überfälliges: eine diskurstaugliche Definition der Information. Sein Buch ist eine beeindruckend klare wissenschaftliche Abhandlung, in der keine Aussage unbelegt bleibt.

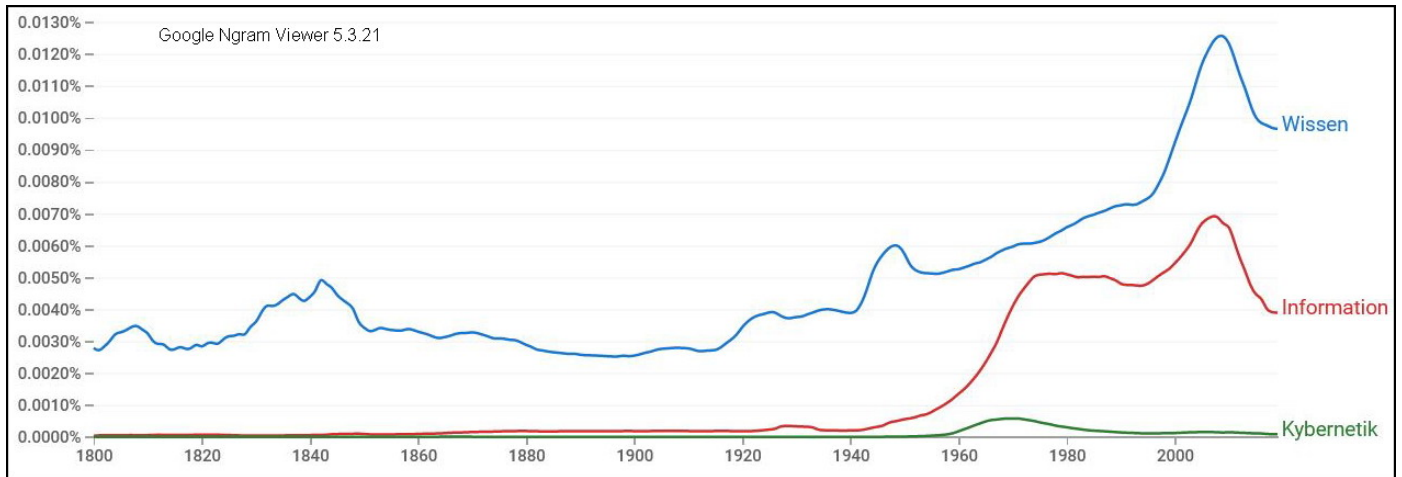


Bild 110. Häufigkeiten von *Wissen*, *Information* und *Kybernetik* in Google Ngram.

6.5.1. Die Informationsarten

Inzwischen sind noch wenige, kleine Ergänzungen hinzugekommen und so entstand schließlich das **Bild 111** auf der folgenden Seite. Der grundlegende Informationsprozess befindet sich rechts auf dem hellblauen Umwelthintergrund. Dabei ist als primärer Informer ein Apfel als spezielles Beispiel gewählt. Das vereinfacht die Einführung der **Z-Information** (von Zeichen) mit ihrem Bezug zur *Semiotik* im Abschnitt 2.1 und speziell dem Bild 7. So werden fast alle Möglichkeiten der Semiotik für die Informationstheorie gut nutzbar. Als Folge ist es aber auch sinnvoll, dem grundlegenden Prozess nach Bild 109e einen ergänzenden Buchstaben zuzuordnen. Da hierbei die Wirkung grundlegend ist, wurde **W-Information** gewählt.

Es folgt dann die **P-Information**. Dabei wird die Speicherung einbezogen und weil der gespeicherte Inhalt bis zur Wiedergabe nur potentiell vorhanden ist, wurde das **P** gewählt. So können auch jene Prozesse erfasst, welche die Vergangenheit und/oder Zukunft einbeziehen.

Die nächste sehr umfangreiche Möglichkeit ist die **S-Information**. Sie ist umfassender als die formal schon immer zur Information gehörenden fundamentalen Arbeit von Shannon [Sha76]. Die allgemeine Übertragung ermöglicht es auch, bei großen Entfernungen Information anzuwenden. Zusätzlich können in Kombination mit der Speicherung auch Fehlererkennung, -korrektur und alle Arten der Komprimierung, ja sogar die Kryptografie einbezogen werden. Das sei kurz mit **Bild 112** (s. S. 127) beschrieben. Darin ist oben eine anschauliche Variante der Datenübertragung gezeigt. Darunter befindet sich die schematische Darstellung mit der Codierung und Decodierung, welche möglichst effektiv gestaltet sein soll. Details dazu enthält Unterabschnitt 6.5.3.

Für eine **Fehlerbehandlung** werden dem zu übertragenden Signal mit einem Algorithmus genau definierte Zusatzdaten als Redundanz hinzugefügt. Bei der Wiedergabe sind dann zwei Fälle zu unterscheiden. Die *Fehlererkennung* zeigt nur an, dass bei der Übertragung eine Störung aufgetreten ist. Bei der *Fehlerkorrektur* wird die Redundanz so ausgewertet, dass möglichst viele Fehler wieder rückgängig gemacht werden können.

Bei der **Komprimierung** werden spezielle Algorithmen eingesetzt, welche die zu übertragende Datenmenge reduzieren. Die *verlustfreien* Verfahren benutzen Redundanzen in der Datei, um ihre Größe zu mindern. Dafür sind mehrere, recht unterschiedliche Verfahren entwickelt worden. Doch auch hier existieren zwei Grundsätze. Die *verlustfreien* Verfahren nutzen Methoden, die sich bei der Wiedergabe so umkehren lassen, dass wieder die Originaldatei entsteht. Codierung und Decodierung müssen daher reziprok sein. Zum Teil werden dabei auch auf der Sende- und Empfangsseite komplette Datensätze gespeichert, die nur abzurufen sind. Damit sind dann extrem große Datenreduzierungen zu erreichen. Im extremen Fall reichen Bit aus, nämlich indem auf beiden Seiten sehr lange Texte gespeichert bereitstehen und nur abgerufen werden müssen. Völlig anders ist die *verlustbehaftete* Komprimierung. Für sie ist ein Modell des Empfängers erforderlich. Mit ihm wird entschieden, was er nicht wahrnehmen oder verwerten kann, und das wird einfach weggelassen.

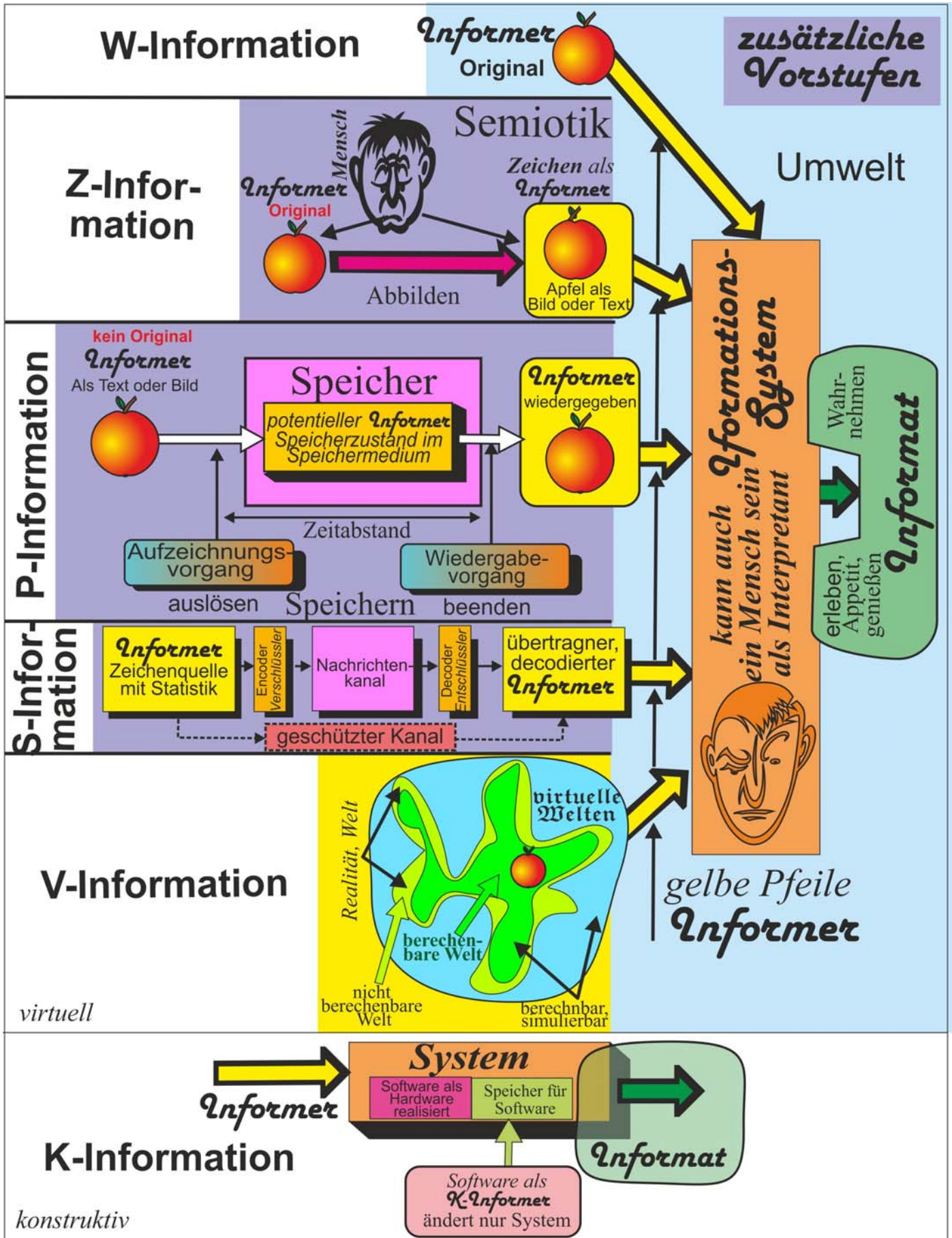


Bild 111. Die Informationsarten unterscheiden sich vor allem durch die Vorverarbeitungen (lila).

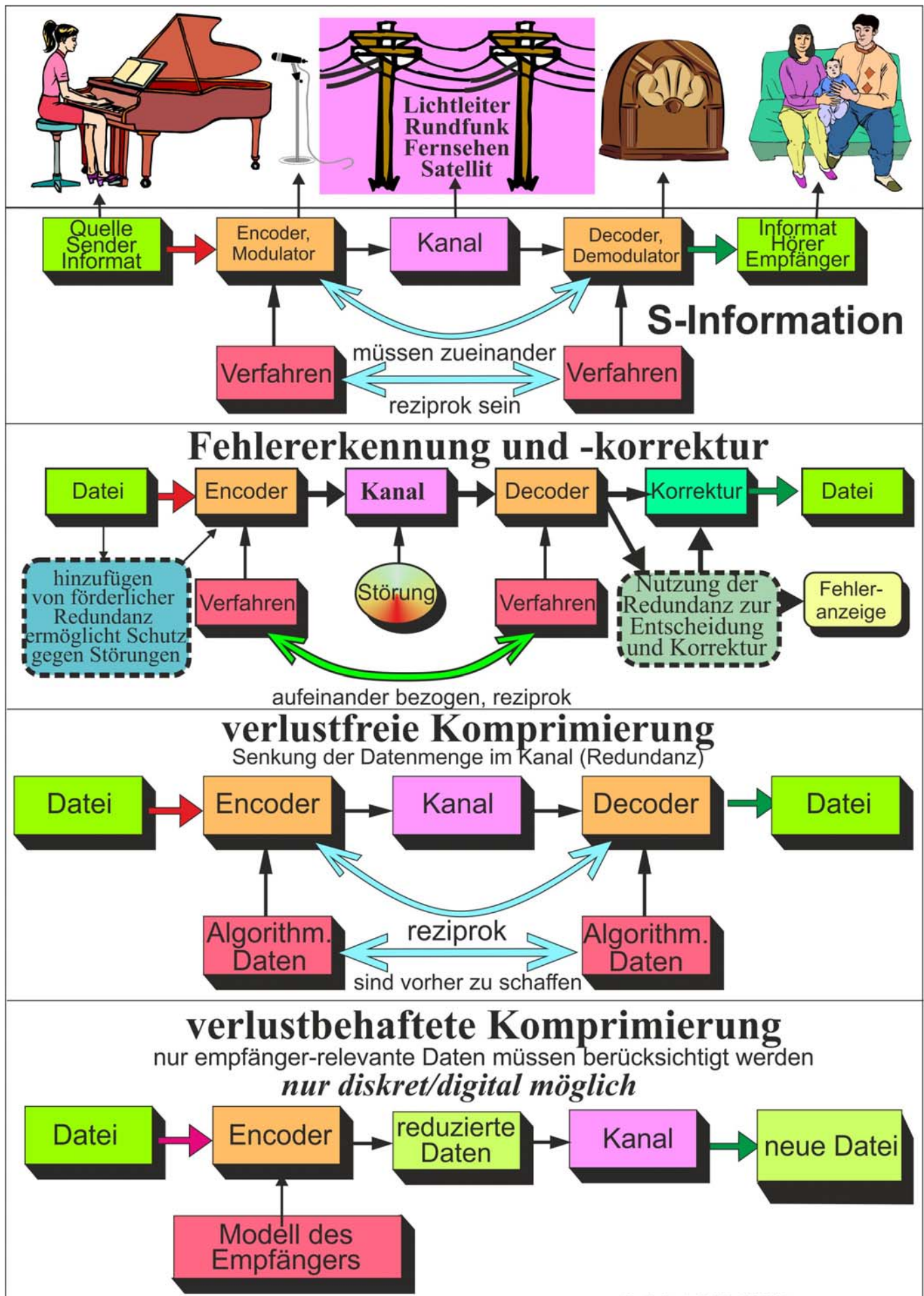


Bild 112. Die wichtigsten Verfahren bei der S-Information als Datenübertragungen.

Neben den zuvor behandelten Fällen hat auch die **Kryptografie** eine gewisse Bedeutung erlangt. Sie ermöglicht es, Daten gegen feindlicher Zerstörung zu schützen und für andere geheim zuhalten. Typische Fachbegriffe hierfür sind u. a. Vertraulichkeit, Integrität, Authentizität, Nichtabstreitbarkeit, Anonymität u. d. Wasserzeichen. Werden die Daten über einen üblichen Kanal übertragen werden, so können dort Feinde unbemerkt die Daten abzweigen oder unbemerkt fälschen oder gar zerstören. Daher werden die Daten verschlüsselt – also codiert – sodass sie nicht lesbar sind. Dieser Schlüssel wird nur den zulässigen Empfänger aus einem geheimen Kanal zur Decodierung mitgeteilt. Neben dieser Variante (1) gibt es eine (2). Sie benutzt eine öffentliche Schlüsselbank, die zusammengehörende öffentliche und geheime Schlüssel enthält. Wenn nun jemand seinem Partner eine Botschaft übermitteln, dann besorgt er sich dessen öffentlichen Schlüssel zur Codierung. Diese kann dann der Empfänger nur mit seinem, nur ihm bekannten geheimen Schlüssel decodieren. Die **Steganografie** (3) wird vor allem zum Schutz von Bildern benutzt. Dabei wird dem Bild ein kaum sichtbares Muster so hinterlegt, dass es auch nach jedem Kopieren. Teilen usw. wieder auffindbar ist. Weitere Details s. [Völ07a] S. 432ff.

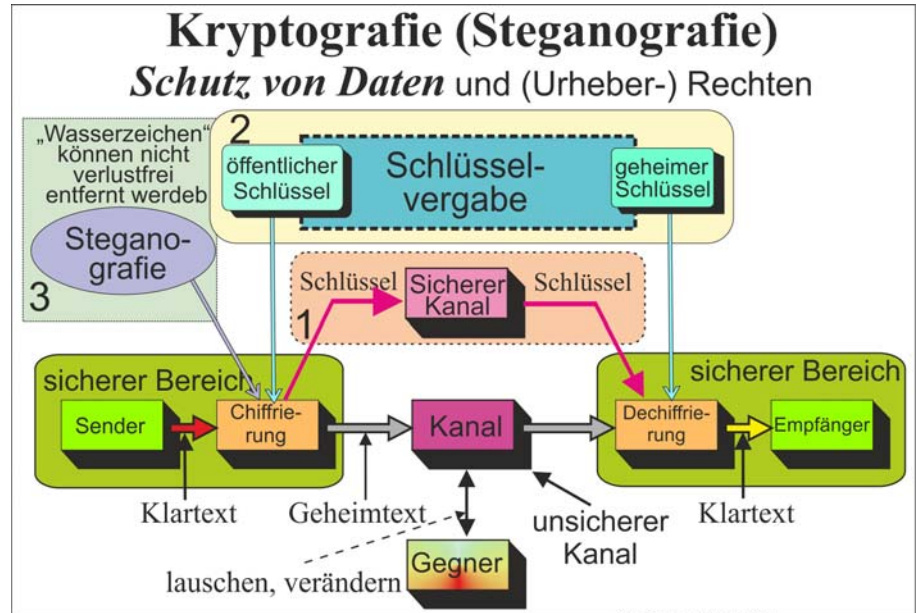


Bild 113. Die drei Arten der Kryptografie

Damit ist die sehr große Anwendungsbreite von Information auch kurz inhaltlich beschrieben. Die beiden letzten Informationsarten in Bild 111 weichen von dem Schema etwas ab, denn sie benötigen auch die *elektronische Rechentechnik* und werden erst weiter unten beschrieben. Hier ist aber zuvor noch Wichtiges zur Shannontheorie, speziell seiner Entropieformel erforderlich.

6.5.2. Zur Vielfalt der Entropien

Der Begriff Entropie geht auf Rudolf **Clausius** (1822 - 1888) zurück. Er entdeckte unter anderem, dass mechanische Energie zwar jederzeit vollständig in Wärme umwandelbar ist, aber nicht umgekehrt. Deshalb führt er 1854 die „Entropie“ ein

$$\Delta S = Q/T.$$

Darin bedeuten Q die Wärmemenge und T die absolute Temperatur. Dazu erklärt er dann:

„Sucht man für S (die Entropie) einen bezeichnenden Namen, so könnte man, ähnlich wie von der Größe U (der inneren Energie) gesagt ist, sie sey der Wärme- und Werkinhalt des Körpers, von der Größe S sagen, sie sey der Verwandlungsinhalt des Körpers. Da ich es aber für besser halte, die Namen derartiger für die Wissenschaft wichtiger Größen aus den alten Sprachen zu entnehmen, damit sie unverändert in allen neuen Sprachen angewandt werden können, so schlage ich vor, die Größe S nach dem griechischen Worte »tropae«, die Verwandlung, die Entropie des Körpers zu nennen. Das Wort Entropie habe ich absichtlich dem Wort Energie möglichst ähnlich gebildet, denn die beiden Größen, welche durch diese Worte benannt werden sollen, sind ihren physikalischen Bedeutungen nach einander so nahe verwandt, daß eine gewisse Gleichartigkeit in der Benennung mir zweckmäßig zu seyn scheint.“

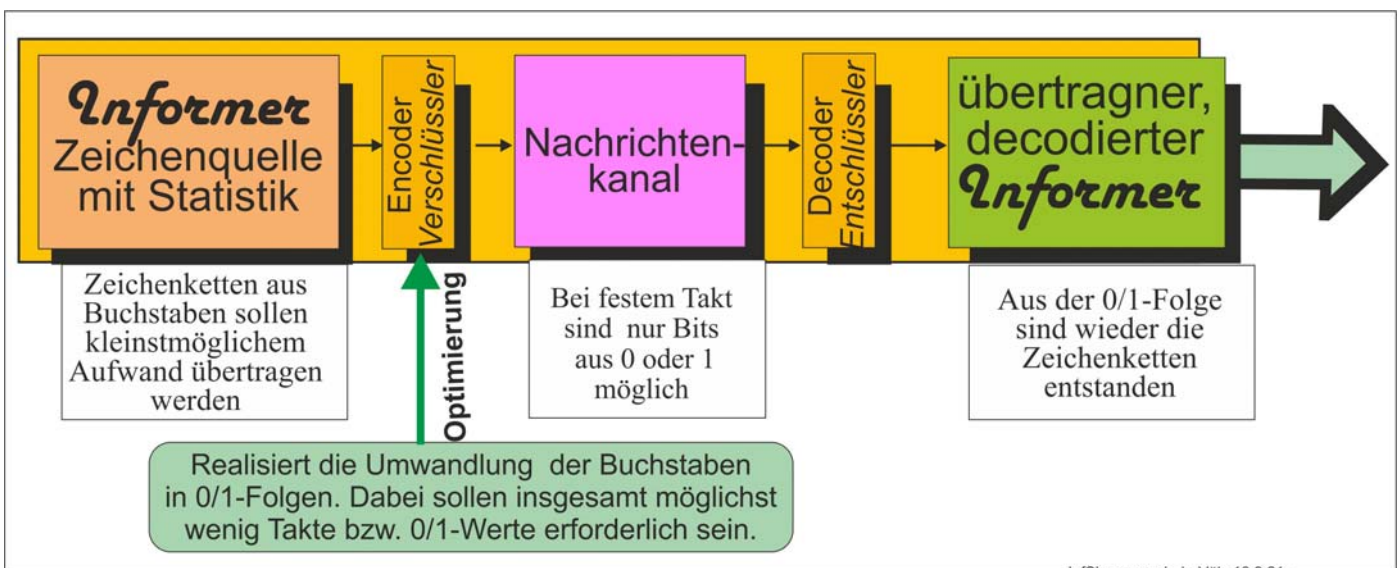
Ludwig **Boltzmann** (1844 - 1906) behandelt das gleiche Problem aus Sicht der Statistik: In einem Gas fliegen die Atome und Moleküle mit hoher Geschwindigkeit hin und her und treffen dadurch auch stoßend aufeinander: Gemäß ihrer Bewegungen treten im Raum ständig ändernde (Makro-) Zustände mit den Wahrscheinlichkeiten W auf. Nach einer längeren Rechnung für die Entropie erhält er dann

$$S = k \cdot \ln(W).$$

Mit der Boltzmann-Konstante $k = 1.380659 \cdot 10^{-23}$ J/K erreicht er die exakte Übereinstimmung mit dem Clausius-Wert. Außerdem haben die beiden Entropien auch die gleichen Folgen. Wird ein Gas in einem Raum eingeschlossen, so bewirken sie, dass die Teilchen ihn bestmöglich vollständig und gleichmäßig ausfüllen. Weiter folgt der Trend zum Wärmetod, bei dem alle verfügbare Energie in Wärmeenergie umgewandelt sein würde.

Die Shannon-Entropie für die **S-Information** (s. o.) bestimmt ebenfalls einen Grenzwert und zwar ein Optimum, jedoch von völlig anderer Art. Hierzu ist aus Bild 111 jener Anteil herausgezogen, der dem Informationssystem vorausgeht. Er ist im **Bild 114** mit nützlichen Ergänzungen dargestellt. Mit dem Encoder werden die originären n Zeichen mit den Wahrscheinlichkeiten p_i in binäre 0/1-Ketten (Bit) übersetzt, also neu codiert. Dann übertragen und wieder decodiert. Die Anzahl der im Mittel dabei notwendigen Bit bestimmt daher den Aufwand der Übertragung, nämlich die notwendige Taktzahl und damit die Übertragungsdauer. Hierfür bestimmte Shannon das theoretisch bestmögliche Ergebnis und nannte es auf Vorschlag von Wiener ebenfalls Entropie

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \lg(p_i).$$



InfShannon.cdr h. Völz 10.3.21

Bild 114. Der Nachrichtenkanal zur Erklärung der Shannon-Entropie.

Wiener begründete das damit, dass in beiden Formeln der Logarithmus der Wahrscheinlichkeit vorkommt. Doch vom Inhalt her sind sie sehr verschieden: Die (Clausius-) Boltzmann-Entropie betrifft vorrangig Energiewerte (mittelbar Häufigkeiten von Zuständen) und verlangt den natürlichen Logarithmus $\ln$, die Shannon-Entropie betrifft dagegen die maximal schnellstmögliche Signalübertragung und verlangt den binären Logarithmus $\lg$. Dennoch gibt es viele Arbeiten, die sie weitgehend gleichsetzen. Dann wird zuweilen das negative Vorzeichen bei Shannon ohne inhaltlichen Bezug – es sei denn bezogen auf den Wärmetod – einfach zur **Neg-Entropie** umbenannt und dabei angenommen, dass die Summe beider Größen – obwohl sie unterschiedliche Maßeinheiten besitzen – als konstanter Wert definiert. Leder unterstützt dies etwas ein Zitat von Wiener [Wie48], S. 38:

„Der Begriff des Informationsgehaltes (der Shannon-Entropie $H.V.$) berührt in natürlicher Weise einen klassischen Begriff in der statistischen Mechanik: den der

Entropie. Gerade wie der Informationsgehalt eines Systems ein Maß des Grades der Ordnung ist, ist die Entropie eines Systems ein Maß des Grades der Unordnung; und das eine ist einfach das Negative des anderen.“

Doch dabei ist zu beachten, dass ein Minuszeichen nur deshalb erforderlich ist, weil stets $p_i < 0$ gilt. Es ist daher für ein positives H erforderlich. Weiter ist Ordnung immer eine betont subjektive Festlegung. Es sei aber darauf verzichtet, weitere Fehlinterpretationen (selbst sehr bedeutender Autoren) zu nennen. Abschließend sei aber erwähnt, dass im Laufe der Zeit immer wieder neuartige „Entropien“ entstanden. Die wichtigsten Beispiele und viele weitere Details auch eine Vertiefung der Aussagen enthält [Völ17] S. 79ff.

- 1854 Clausius: Thermodynamik
- 1865 Boltzmann: statistische Thermodynamik
- 1948 Shannon; Information (Optimalcodierung). Einreichungsdatum 1940?!
- 1954 Carnap-Entropie (Semiotik, ähnlich Quantität $\leftrightarrow$ Qualität).
- 1962 Renyi: α -Entropie (rein formale mathematisch Verallgemeinerung von Shannon).
- 1963 Bongard-Weiß-Entropie (auch subjektive Wahrscheinlichkeit).
- 1965 Marko: bidirektionale Information, weiterentwickelt für viele Sender und Empfänger.
- 1987 Hilberg: deterministische Informationstheorie (Statistik entsteht über zufällige Schalter.

6.5.3. Die Auffälligkeit

In der Shannon-Entropie kommt der Term $H = -p \cdot \lg(p)$ vor. Helmar Frank (1931 – 2013) fand dabei um 1960 heraus, dass ihm eine spezielle Bedeutung zukommt, die er (subjektive) Auffälligkeit, zuweilen auch Maximum-Effekt, nannte. Ihren Verlauf zeigt **Bild 115a**. Er besitzt ein Maximum bei der Wahrscheinlichkeit $p = 1/e \approx 0,36788$. Dabei ist $e \approx 2,718\ 281\ 828\ 459\ 045$ die Eulersche Zahl (s. S. 133). In [Fra64] S. 20 steht dazu:

„Die Frage, welche Häufigkeit h_l das Zeichen Z_l in einem Text haben müsse, damit von ihm im Verlaufe des Textes ein Maximum an objektiver, theoretischer oder effektiver Information übertragen wird, ergibt sich im Falle der theoretischen Information durch Nullnetzen der partiellen Ableitung von H_S nach h_l zu $h_l = 1/e$ (etwa 36,8 %)“.

Auf S. 45 - 46 folgt weiter:

*„Eine Flächenbestimmung in Anselm Feuerbachs „Iphigenie“ ... ergab, daß dort gerade 40 % der Fläche weiß sind, diese Farbe also maximal betont ist. ... Soll in einem Stück Lyrik lautmalend ein Vokal hervorgehoben werden jedoch nicht so stark, daß man sich an ihn gewöhnt, sobald die informationelle Akkomodation erreicht ist ..., dann muß der Vokal in 37-40 % der Silben auftauchen. Damit ist ein Problem Birkhoffs (1932) gelöst. Birkhoff bemerkt, daß in den beiden folgenden Versen von Poe („The Bells“) der in 8 von 23 Silben auftauchende, lautmalende flache **E**-Laut sehr häufig, aber noch nicht „überschüssig“ auftritt, ohne daß Birkhoff ein Kriterium für Überschüssigkeit angeben könnte:*

*Hear the s**l**Edg**E**s with the b**E**lls, silver b**E**lls!*

*What a world of m**E**rrim**E**nt their m**E**lody foret**E**lls!*

Sollen in einem Musikstück die Synkopen besonders auffallen, dann müssen diese etwa ein Drittel der Takte beherrschen, sind es wesentlich mehr (wie etwa beim Jazz), dann fallen sie nicht mehr auf ... Maximal betont scheinen die Synkopen beispielsweise im 3. Satz des 5. Brandenburgischen Konzerts von Johann Sebastian Bach zu sein. ... von den 310 Takten 124 Takte Synkopen enthalten. Das sind 40%.“

Mit mehreren Experimenten untersuchte Frank dann systematisch Zusammenhang weiter. Ein Beispiel zeigt (b). Doch bald wurde Kritik laut. Insbesondere wurde auf die Untersuchungen von Gustav Theodor Fechner (1801 – 1887) bezüglich des schönsten Bildformats (c) und auf die im Altertum Pentatonik mit dem allgemein gut bekannten Goldnen Schnitt verwiesen (e). Bei einem Dreieck werden die Kreisbögen 1 und 2 gezogen und erzeugen die Abschnitte minor und major. Sie

entsprechen ähnlichen Abschnitten im Pentagramm. So ergeben sich die Werte der gegenüberliegenden Tabelle, die in der Nähe der Auffälligkeit liegen. Doch der Goldene Schnitt ergibt nur für Bilder einen Sinn, während die Auffälligkeit eher aus den logarithmischen Gesetzen aller Wahrnehmungen nach dem Weber-Fechner-Gesetz ergibt. Für die Reize der Stärke R gilt dann die Wirkung $W = a + b \cdot \log(R)$ [Sch93]. Schließlich erzielten André Abraham Moles (1920 - 1992) und Frank auch Erfolge durch eine entsprechende Preisbildung von Waren im Kaufhaus (heute Schnäppchen genannt). Leider wusste um 1990 Helmar im persönlichen Gespräch nicht mehr den Namen des Berliner Großkaufhauses. Schließlich ließ sich sogar so die Schönheit eines Hauses so berechnen [Völ88]. Bedeutsam sind weiter die **Fibonacci-Zahlen** (Leonardo Fibonacci ca. 1170 – 1240 und 1877 Eduard Lucas). Er untersuchte damals die mögliche, jährliche Vermehrung von Kaninchen. Wenn im 1. Jahr ein Pärchen existiert, dann kommt im nächsten Jahr ein Pärchen dazu (ergibt 2 Pärchen). Da die Jungtiere erst nach einem Jahr fruchtbar sind folgt für das n -te Jahr die Beziehung $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$. Hieraus ergibt sich die Zahlenfolge: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34 usw. Es fällt auf, dass diese Anzahlen in der Natur, bei Blättern, Blüten usw. besonders häufig anzutreffen sind. Das Verhältnis f_n/f_{n+1} führt für $n \rightarrow \infty$ mit etwa 0,63 ebenfalls in die unmittelbare Nähe der Auffälligkeit [Völ90], [Völ07] S. 62ff. Es ist auch eine direkte Berechnung der Fibonacci Zahlen möglich s. Tabelle rechts unten. Eine weitere Möglichkeit in unmittelbarer Nähe liefert der Kettebruch, s. Tabelle unten

Merkmal	Goldener Schnitt	Auffälligkeit
Wert	$\frac{1}{2}(\sqrt{5} - 3)$	$1 - 1/e$
Näherung	0,61803	0,63212
Restwert	0,38197	0,36788
Rationale Näherungen mit Fehlern	2:3 4,9%	2:3 3,5%
	3:5 -1,8%	5:8 -0,7%
	5:8 0,7%	7:11 0,4%
	8:13 -0,3%	12:19 -0,05%
	13:21 0,1%	55:87 $6 \cdot 10^{-5}$
	21:34 -0,04%	67:106 $-5 \cdot 10^{-5}$
	34:55 0,01%	122:193 $3 \cdot 10^{-6}$
Kettenbruch	$x = \frac{1}{a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \dots}}}}$	$F(n) = \frac{(1+\sqrt{5})^n - (1-\sqrt{5})^n}{2^n \cdot \sqrt{5}}$
	Liefert $a = b = c = d = \dots = 1$ den Wert $(1+\sqrt{5})/2$	

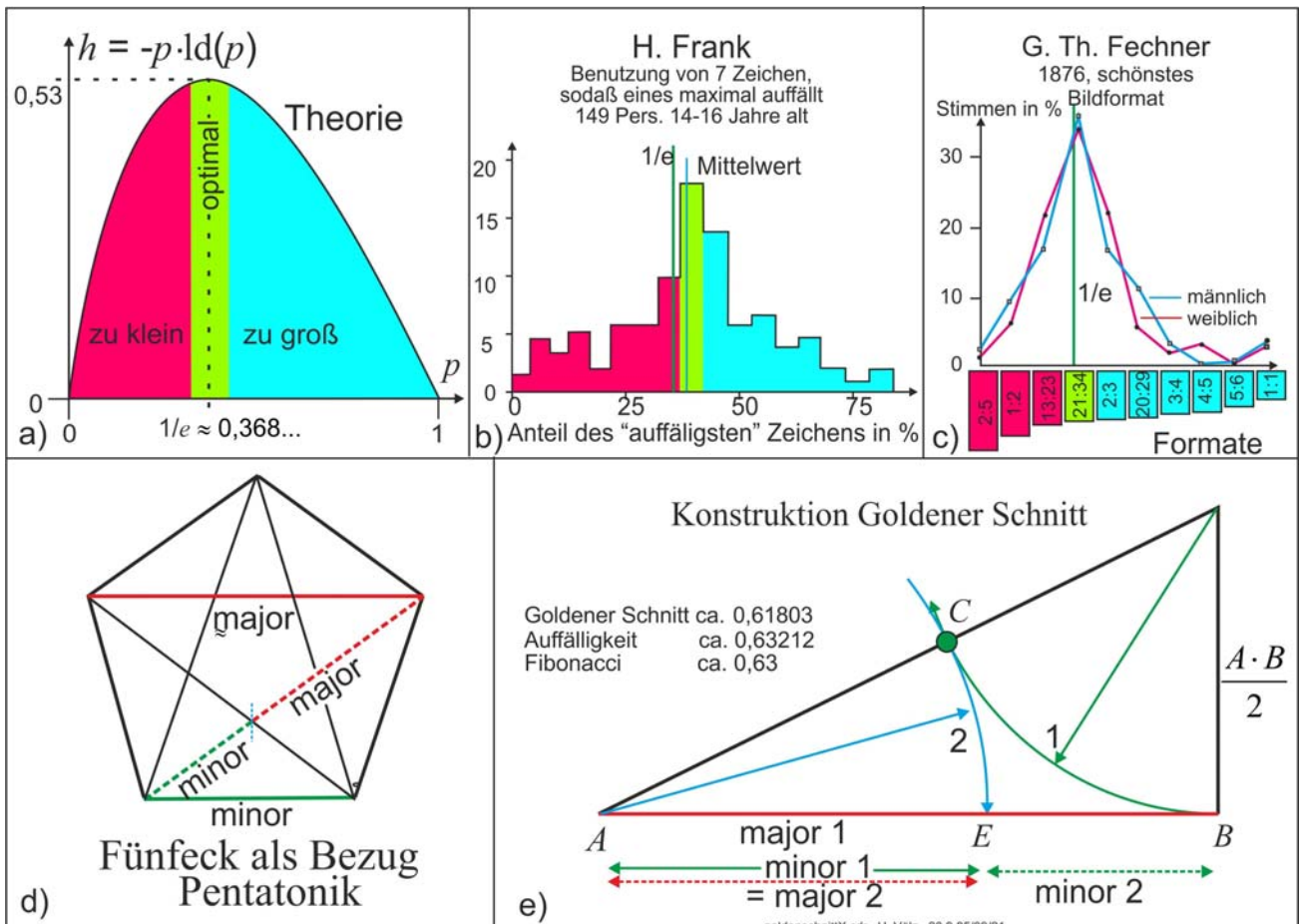
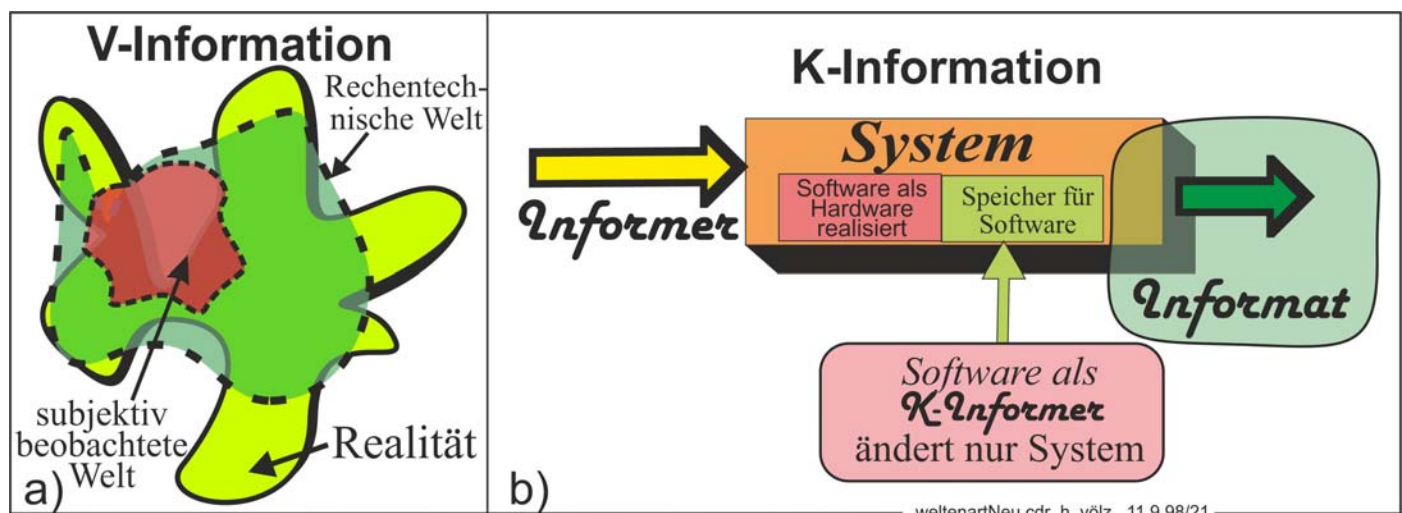


Bild 115. Möglichkeiten für die Auffälligkeit

6.5.4. Die beiden letzten Informationsarten

Schließlich seien noch kurz die beiden letzten Informationsarten aus Bild 111 eingeführt. Dies ist sinnvoll, obwohl sie fast immer die Rechentechnik (Informatik) benötigen und damit eigentlich erst nach dem Abschnitt 6.6 genauer zu verstehen sind. Die **V-Information** betrifft vor allem virtuelle (künstliche) Welten [Bor94]. Hierbei wird meist ein Modell für die Realität im Rechner moduliert. Mittels Bildschirmbrillen kann es aus verschiedenen Perspektiven beobachtet sowie per Fernsteuerung mit speziellen Handschuhen verändert werden. So lassen sich z. B. Gebäude bereits vor ihrer Fertigstellung begehen und selbst komplizierte medizinische Behandlungen sind aus großer Ferne durchführbar. Generell sind die drei Möglichkeiten von **Bild 116a** zu unterscheiden: die wie üblich grün dargestellte Realität, die mit dem Rechnermodell virtuell verfügbare Welt und der Teil, den wir virtuell wahrnehmen und beeinflussen können. Dabei gibt es virtuelle Welten, die zwar generiert und behandelt werden können, aber in der Realität nicht existieren.

Die **K-Information** (konstruktiv) verhält sich sehr speziell (b). In mehreren Informationssystemen, von allem in Rechnern, existiert häufig ein zunächst noch unbelegter und daher unbenutzter Speicherbereich (gelb). Mit der K-Information können dorthin Programme oder Aps (Applikationen), also Software geladen werden. Dadurch erhält das System neue, zusätzliche Eigenschaften. Sie können aber erst nach dem Laden genutzt werden. Folglich verändert die K-Information zunächst „nur“ die verfügbaren Eigenschaften, ohne dass beim Laden am Ausgang des Systems ein



Output (Informat) entsteht. Das tritt erst dann auf, wenn ein Informer als Input auftritt.

Bild 116. Prinzip der V- und K-Information.

Da nun alle eingeführten Informationsarten beschrieben sind, ergibt sich die Frage ob, es noch weitere gibt oder geben kann. Das ist recht unwahrscheinlich. Vielleicht wäre zunächst Quanteninformation denkbar. Da aber alle Informationsarten nicht durch ihre physikalische Realisierung (elektrisch, magnetisch, optisch usw.) gekennzeichnet sind, sondern nur durch ihr Verhalten, dürfte auch Quanteninformation künftig kaum etwas Neuartiges bewirken können (vgl. QuBit s S. ###).

6.6. Von den Zahlen bis zur Informatik

Die dazugehörigen Gebiete sind wichtige Grundlagen für folgerichtiges und eindeutiges Denken, auch bezüglich der Realität. So war bereits Johannes Kepler (1571 – 1630) davon überzeugt, dass die Naturgesetze mathematischen Verhältnissen entsprechen. Auch Galileo Galilei (1594 – 1642) vertrat den Standpunkt: das „Buch“ des Universums sei in mathematischer Sprache geschrieben. Schließlich wies sogar Einstein auf die besonders präzise Mathematik hin:

„Die Mathematik genießt vor allen anderen Wissenschaften ein besonderes Ansehen, ihre Sätze sind absolut sicher und unbestreitbar, während die anderen Wissenschaften bis zu

einem gewissen Grad umstritten und stets in Gefahr sind, durch neu entdeckte Tatsachen umgestoßen zu werden.“

Auf den Unterschied zwischen der Mathematik und deren Anwendung wies u. a. deutlich Tobias Danzig hin [Bar94], S. 418:

„Man könnte den Mathematiker mit einem Modeschöpfer vergleichen, der überhaupt nicht an Geschöpfe denkt, dem seine Kleider passen sollen. Sicher, seine Kunst begann mit der Notwendigkeit, solche Geschöpfe zu bekleiden, aber das ist lange her; bis heute kommt gelegentlich eine Figur vor, die zum Kleidungsstück passt, als ob es für sie gemacht sei. Dann sind Überraschung und Freude endlos!“

Ein guter Beweis dafür ist die *Matrizenrechnung*. Sie wurde 1850 von Sylvester rein theoretisch, also völlig unabhängig von jeglicher Anwendung, eingeführt und blieb längere Zeit unbeachtet. Ohne von ihr zu wissen, benutzte ihre Regeln 1925 Werner Heisenberg (1901 – 1976) für seine Matrizenmechanik. Erst sein Lehrer Max Born (1882 – 1970) wies ihn im Nachhinein darauf hin. Für die weiteren Betrachtungen ist es sinnvoll, folgende Gebiete getrennt zu behandeln:

1. Das Entstehen der **Zahlen** und Rechnen mit ihnen
2. Die **Mathematik** mit Zeichen statt Zahlen, Funktionen, Gleichungen, Gesetzen usw.
3. Die **Rechentchnik** (Informatik) als automatisierte Mathematik
4. Die oft stark vereinfachten **Anwendungen** im Technik, Leben, Politik usw.

6.6.1. Von den Zahlen zur Mathematik

Die Herkunft von **Zahl** (Plural **Zahlen**, Veränderung **Anzahl**) ist nicht ganz eindeutig. Eine eher unwahrscheinliche Ableitung geht von *griechisch* **dolos** Köder, Lockmittel, Trug, List und *lateinisch* **dolus** List, Täuschung, Betrug aus. Eine wahrscheinlichere Variante nimmt als Ursprung das Indogermanische **del-** zielen, berechnen, nachstellen, listig, schädigen, zählen und erzählen an. Bereits im 8. Jh. existiert im *althochdeutschen* Standardwortschatz **zal(a)** Menge; Aufzählung; Bericht und Rede. *Indogermanisch* gibt es **dolare** bebauen mit der Wortfamilie **doium** Fass, **dolere** Schmerzen **delere** zerstören und der Wurzel **del** spalten, behauen. In diesem Zusammenhang gibt es auch den Hinweis auf *eingekerbtes Merkzeichen*. Im *Gotischen* gab es **talzian** lehren. Weiter könnte ein Zusammenhang zum *Französischen* **taille** Größe, Taille, Bedeutung, Figur, Statur, Zuschnitt bestehen. Das Verb **zählen** besitzt heute etwa drei Inhalte 1. abzählen, die Anzahl bestimmen, 2. Etwas zählt, ist wichtig und 3. im Sinne von dazugehören (dazu zählen ...). Als Ursprung gilt dann das im Standardwortschatz des 8. Jh. vorhandene *althochdeutsche* **zellan** und *mittelhochdeutsche* **zel(le)n**, **zal(e)n**. Sie bedeuten er- und aufzählen sowie rechnen. Das Verb **zahlen** erscheint als Standardwortschatz im 11. Jh. **zal(e)n** im Sinne von bezahlen, begleichen, entrichten, seit dem 17. Jh. als eine Schuld begleichen. Es müssen zwei Arten unterschieden werden, Die *Kardinalzahlen* entsprechen der Anzahl, die *Ordinalzahlen* jedoch deren Reihenfolge in Raum und/oder Zeit.

Tiere können so etwas wie eine Anzahl erfassen oder gar zählen. So merkt eine Herde unvermittelt, wenn ein Jungtier fehlt. Ohne wirklich zu zählen, unterscheiden z.B. Bienen deutlich Blüten nach der Anzahl der Blütenblätter und zwar bis zu 10. Grillen berücksichtigen ähnlich die Anzahl der Zirplante bis zu 14. In ähnlicher Weise können viele höhere Tiere bis etwa 7 „zählen“. Das alles erfolgt offensichtlich nicht durch eigentliches Abzählen, sondern eher durch Wahrnehmen einer Ganzheit, oder wie es Friedhard Klix (1927 - 2004) [Kli93] bezeichnet, als **Mächtigkeit**. Hierzu ist nicht einmal eine Vorstellung über Zahlen oder gar eine Benennung durch entsprechende Wörter erforderlich. Das funktioniert sogar dann, wenn noch keine Sprache vorhanden ist. Es kann aber mit einer Mächtigkeit in *alten Ritualen* zusammenhängen. Dennoch gibt es „einfache“ Volksstämme, die (noch) kein Gefühl für das Zählen entwickelt haben oder nicht über „zwei“ hinaus kommen.

Eine Möglichkeit der Mächtigkeit zu veranschaulichen ermöglicht der Abschnitt 4.4 und Bild 56. Vom KZG werden um 7 Chunks mit einem Mal ganzheitlich erfasst **Bild 117**. Bei den Teilbildern (a) bis (d) wird meist unmittelbar, ohne zu zählen gelingen. Ob das auch bei (e) oder gar (f) erfolgt

ist individuell recht verschieden. Der Zusammenhang ist auch experimentell bezüglich der notwendigen Zeit untersucht [Kra00]. S. 80. Bis zu etwa 6 Punkten werden je Punkt nur ca. 40 ms benötigt. Darüber hinaus ist fast 10mal mehr notwendig. Denn hier muss wirklich gezählt werden.

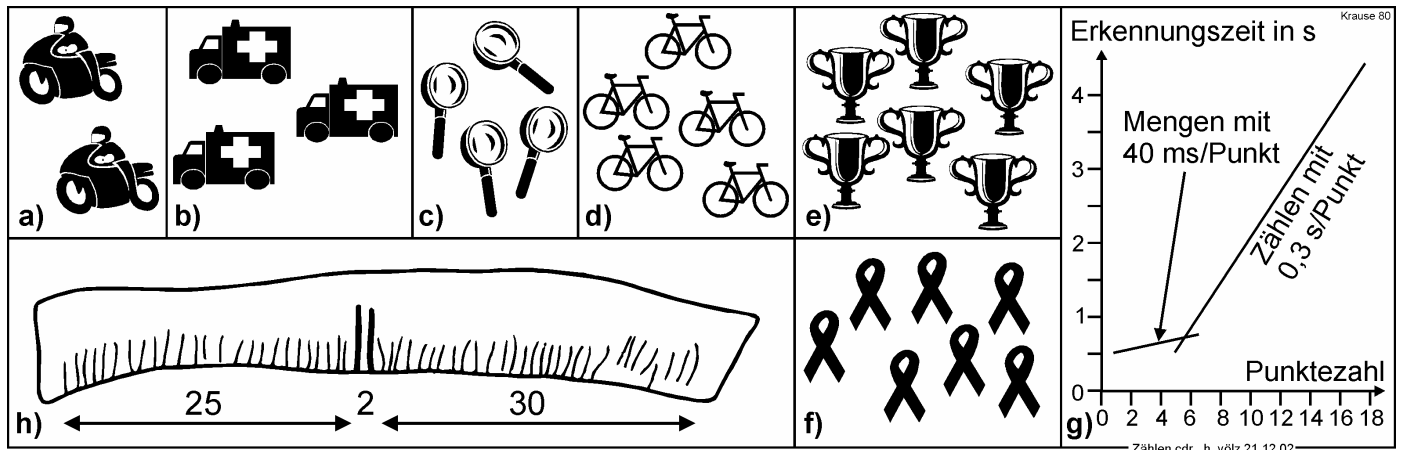
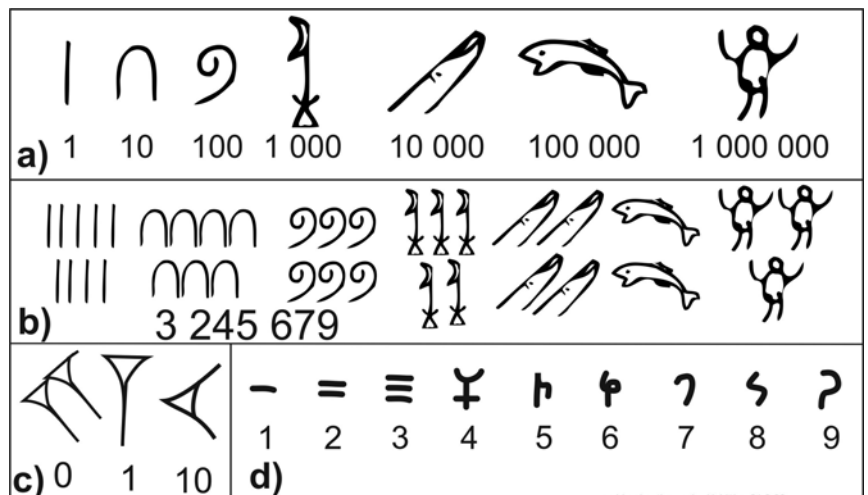


Bild 117. Beispiele zum ganzheitlichen Zahlgefühl, der Mächtigkeit (a bis f), experimentelle Daten (g) und ein typischer, in „Zahlen“ geritzter, steinzeitlicher Knochen (h).

Die ältesten Funde, die auf ein „Zählen“ hinweisen, sind Einritzungen auf Knochen, Hölzern, Steinchen usw. sowie Farbaufräge auf Steinchen. Hierzu gehört u. a. ein etwa 20 cm langer Wolfsknochen um 30 000 v. Chr. (h). Er weist 57 tiefe Kerben auf, wobei die ersten 25 gleich lang und eventuell in Fünfergruppen angeordnet sind. Dann folgen zwei längere und tiefere Kerben. An die sich 30, wieder kürzere Kerben anschließen. Wahrscheinlich bedeuten die Striche Jagderfolge. Für jedes erlegte Wild ein Strich geritzt und daher waren keine Zahlwörter erforderlich. Das ähnelt ein Vergleichen mit der Anzahl von Fingern und Körperteilen, so wie es heute noch, nicht nur bei „einfachen“ Völkern geschieht. Um bei größerer Anzahl einen Vergleich vornehmen zu können, war eine Bündelung |||| |||| || nützlich oder gar notwendig, ähnlich wie bei heutigen Strichlisten. Eine andere Möglichkeit bieten „Zählsteine“ für eine Stück-je-Stück-Zuordnung, spätestens 8 000 v. Chr. benutzt. Sie wurden speziell für Rinder, Fische usw. hergestellt und sind so eine Vorstufe für die tokens, vgl. Bild 55. Ab etwa 3 000 v. Chr. dürften mit der Keilschrift auch abstrakte Zahlzeichen entstanden sein. So wurde es möglich, die Tage (Nächte) zu zählen, um dann den Vollmond für die nächtliche Jagt zu nutzen. Zusätzlich zum Stück-Stück-Vergleich entstand bald ein Wertvergleich, etwa 1 Rind gegen 10 erlegte Kleintiere. Hierbei zeigte sich die große Schwierigkeit für das Abstrahieren von konkreten Objekten. Das konnte Sarah Boysen experimentell bei Schimpansen nachweisen (Spektrum der Wissenschaft; Mai 1994, S. 17f). Von zwei Schalen mit verschiedenen Mengen Süßigkeiten, hatte jeweils ein Tier eine für seinen Artgenossen auszusuchen. Immer wieder wählten sie die mit mehr Inhalt für den anderen aus und waren dann bitter enttäuscht, ja wütend, dass ihnen nur die weniger gefüllte Schale verblieb. Bei Plastikstückchen erfolgte dagegen immer sehr schnell und sicher die für sie günstige Auswahl. Bei mehreren Betrachtungen traten immer größere Zahlen auf. Vor etwa 4 000 Jahren entstand dann in Ägypten ein Stellenwertsystem, wie es **Bild 118** zeigt (Payri Moskau und Rhind). Die Zahlenfolge in (b) wird damals aber noch rückwärts geschrieben (heute: 9 766 423).

Bild 118 Zum ägyptischen Stellenwertsystem und Ziffern aus Industal in der Brâmî-Schrift (d)



Das Wort Null kommt aus dem *Altindischen sunya* (leer, Nichts, Null). Es wurde im 9. Jh. von den Arabern übernommen und als *sifr* übersetzt (im Deutschen ging daraus um 1400 *Ziffer* hervor). In einzelnen Regionen existierten für die Stellenwertsysteme besondere Basen, z. B. in Babylonien 60, anderweitig 2, 5, 6, 12, 20 oder 360. Das dezimale System nutzten die Inder. Es wurde später von den Arabern und dann nach Europa übernommen.

Sobald die Zahlzeichen üblich waren, entstehen auch Brüche, Potenzen, Wurzeln usw. sowie das Rechnen mit den elementaren mathematischen Funktionen und deren Umkehrungen. Die Zusammenhänge erfasst systematisch **Bild 119**. Die entsprechenden mathematischen Sonderzeichen werden aber erst zwischen 1400 und 1700 eingeführt. Den geschichtlichen Ablauf zeigt **Bild 120a**. Viele weitere Details, auch mehreren Tabellen, enthält [Brü17], s. auch [Völ05] S. 58ff.

Bild 119. Zusammenhänge zwischen den elementaren mathematischen Funktionen.

Zusammenhänge der elementaren Funktionen	
direkt	Umkehrung
Addition $c = a + b$	$a = c - b$ $b = c - a$ führt zu negativen Zahlen
b -malige Wiederholung der Addition von a	
Multiplikation $c = a + a + a + \dots + a$ $c = a \cdot b$	$s = c/b$ $b = c/a$ führt zu gebrochenen (rationalen) Zahlen
b -malige Wiederholung der Multiplikation mit a	
Potenzierung $c = a \cdot a \cdot a \cdot \dots \cdot a$ $c = a^b$	$a = \sqrt[b]{c}$ $b = \frac{\log(c)}{\log(a)} = {}_a\log(c)$ führt zu irrationalen bis komplexen Zahlen

elementarfunktion.cdr h. völz 21.8.16

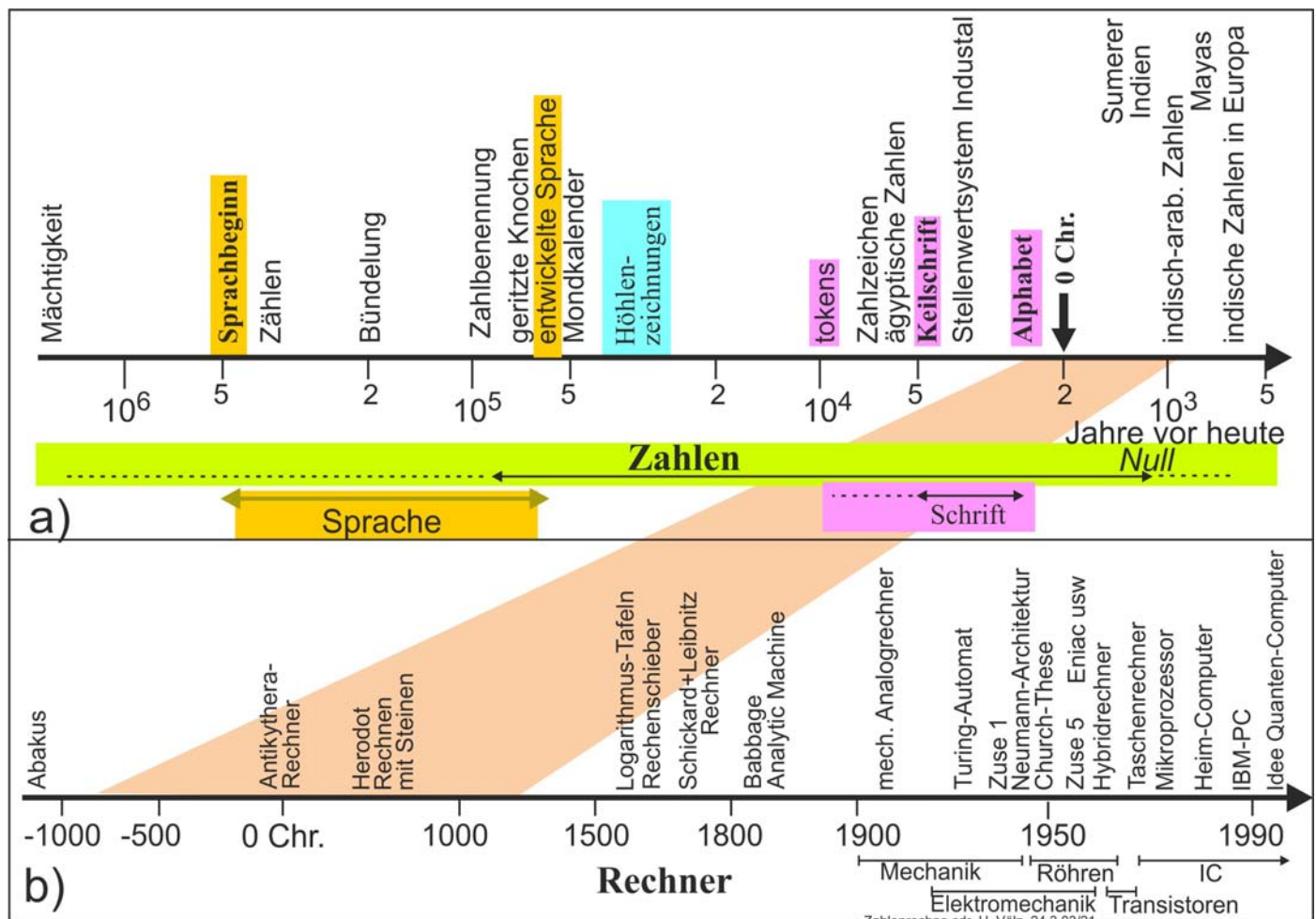


Bild 120. Geschichte der Zahlen (a) und der Rechentechnik (b).

In der Tabelle von Bild 119 fehlen vor allem die wichtigen **Winkelfunktionen**. Ihre Berechnungsgrundlagen sind leider nicht ganz so einfach. Oft werden nur Reihenentwicklungen benutzt.

Bei den oben genannten Basen der Stellenwertsysteme fehlen vor allem 3, 7, 11 und 13. Dennoch wurden und werden sie häufig benutzt. Viele Beispiele sind u. a. in [Beb86], [Sch39] [Völ05] und [Wwl90] enthalten.

Wie die Menschheit das Zählen lernte, kann eine Analogie zum Lernen bei Kindern zeigen. Das ist in Bild 5 für Objekte aufgezeigt. Das sehr frühe Zählen hat sich oft tief in uns verwurzelt. So zählen viele Schafe, um einzuschlafen. Beim Ersteigen hoher Türme usw. werden die Stufen gezählt. Selbst Zahlenrekorde stehen in hoher Gunst. Weiter ist es schwer, mit dem Zählen aufzuhören, wenn einmal begonnen wurde. Rudy Rucker zeigte, dass es viele Zahlbesessene, (Arithnomanen) gibt, die glauben, durch Zahlen die Macht über jedes Geschehen zu besitzen. Satirisch stellt er dann noch fest, dass die heutigen Veränderungen kaum erahnbar wären, würden wir *nicht* von Zahlbesessenen regiert [Ruc90].

Sobald die Zahlzeichen gut verfügbar sind, wird auch **Rechnen** mit ihnen möglich. Die Verallgemeinerung der Regeln für die Grundrechenarten von Bild 119 bestimmt dann das mathematische Gebiet **Arithmetik**⁸¹. Hierbei werden die Zahlwörter teilweise auch durch Buchstaben als Variablen ersetzt. Dadurch gehören dazu das Rechnen mit arithmetischen und geometrischen (s. u.) *Folgen* und *Reihen* sowie Teile der Kombinatorik und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Infolge mehrfacher Überschneidungen ist jedoch keine klare Abgrenzung gegenüber anderen Gebieten, wie Algebra, Analysis und Zahlentheorie möglich. Die **Algebra**⁸² betrifft u. a. *Lösungsmethoden algebraischer Gleichungen*. Für lineare und quadratische Gleichungen waren sie schon im Altertum bekannt, die des 3. und 4. Grades im 16. Jahrhundert. Der *Fundamentalsatz* der Algebra „Jede algebraische Gleichung n -ten Grades besitzt genau n Lösungen« wurde 1799 von C. F. Gauß bewiesen. Die *moderne Algebra* behandelt auch *Strukturen* wie Gruppe, Ring, Körper und deren Verknüpfungen.

Durch die vielfältigen Anwendungen und Ergebnisse entstanden **Zahlenklassen** (Bild 121). *Primzahlen* ermöglichen kein Zerlegen in ganzzahlige Teile. Die *natürlichen Zahlen* können aus mehreren Ganzzahlen durch Addition und/oder Multiplikation erzeugt werden. Die *ganzen Zahlen* enthalten zusätzlich die *Null* und *negative Zahlen*. Bei der Division von zwei ganzen Zahlen entstehen die *gebrochene Zahlen* (Brüche) und insgesamt die rationalen Zahlen. Die *irrationalen Zahlen* lassen sich nicht auf die vorher genannten Zahlen reduzieren. Als Dezimalbruch besitzen sie unendlich viele Stellen. Dann folgen noch die *imaginären Zahlen*, die den Faktor $\sqrt{-1}$ enthalten. Wird dazu eine reelle Zahl addiert, so entsteht eine *komplexe Zahl*.

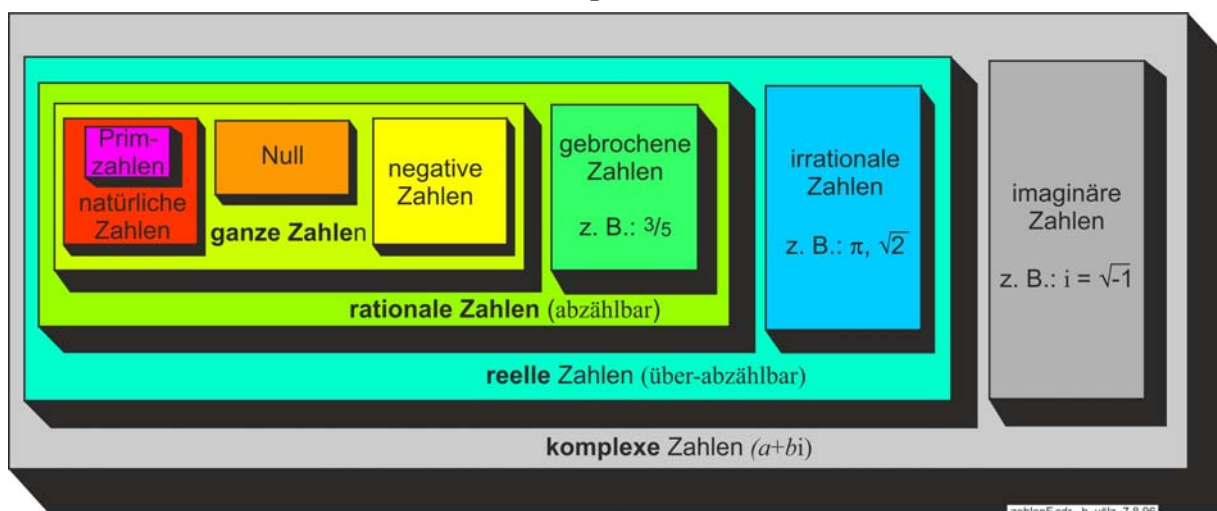


Bild 121. Die Einteilung aller Zahlen.

⁸¹ Griechisch. *arithmētiké* (*téchnē*) Rechenkunst, *arithmētikós* zum Rechnen gehörend, *arithmeîn* zählen, rechnen, *arithmós* Zahl

⁸² Arabisch *alğabr* Einrenkung (gebrochener Teile), Lehre von den Gleichungen; Theorie der Verknüpfungen mathematischer Strukturen.

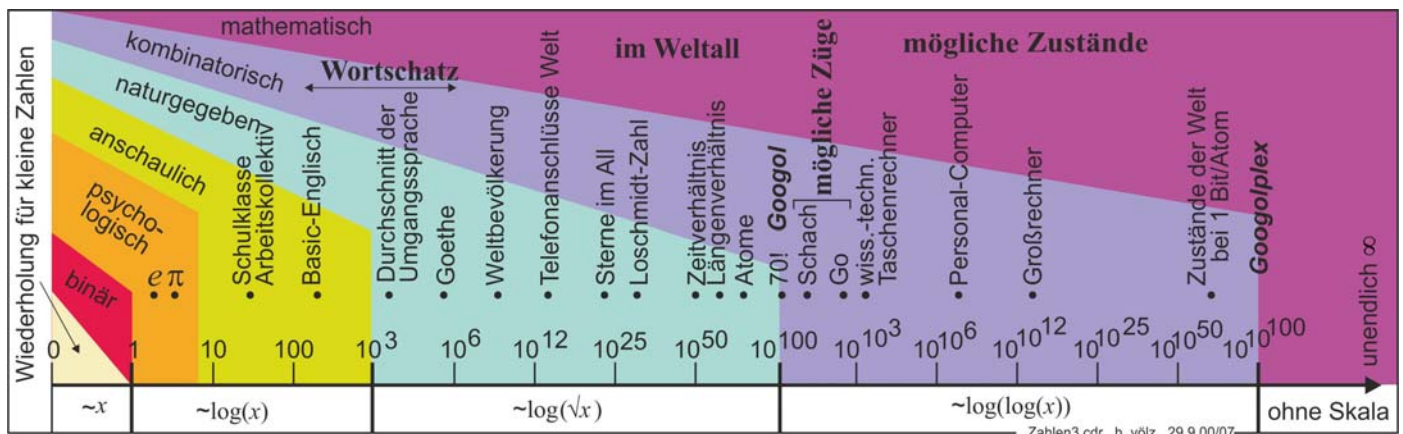
Es gibt nur abzählbar viele rationalen Zahlen. Den Beweis hierfür erbringt das erste Cantorsche Diagonalverfahren **Bild 122** (Georg Cantor 1845 – 1918). Sie müssen dazu nur längs der roten Linien angeordnet werden. Die *irrationalen* Zahlen bereiteten bereits den Pythagoreern große Probleme, da sie sich nicht auf die vorher genannten Zahlen reduzieren lassen. Das entdeckte Hippasus um 450 v. Chr. für die Diagonale des Quadrats $\sqrt{2}$. Hierzu gibt es die Legende, dass sie einen Geheimbund bildeten, um diese Erkenntnis nicht bekannt werden zu lassen. Als dennoch Hippasus die Sünde beging, seinen Schwur zur Geheimhaltung zu brechen und diese schreckliche Wahrheit verbreitete, wurde er ertränkt. In einer anderen Version kam er durch Strafe der Götter im Schiffbruch um. Zwei weitere wichtige irrationale Zahlen sind $\pi \approx 3,14...$ für Kreisgebilde und $e \approx 2,71...$ für die spätere Exponentialfunktion (s. u. und vgl. Bild 115). Die Menge der irrationalen Zahlen ist überabzählbar. Im Bild 121 folgen darauf noch die *imaginären Zahlen* mit dem Faktor $\sqrt{-1}$. Durch Addition von reellen Zahlen entstehen dann die *komplexe Zahlen*.

	Nenner						
	1	2	3	4	5	6	7
Zähler	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7
	2	2/2	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7
	3	3/2	3/3	3/4	3/5	3/6	3/7
	4	4/2	4/3	4/4	4/5	4/6	4/7
	5	5/2	5/3	5/4	5/5	5/6	5/7
	6	6/2	6/3	6/4	6/5	6/6	6/7
	7	7/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7

Bild 122. Beginn vom 1. Cantorsche Diagonalverfahren.

Die große Bedeutung der Zahlen wurde um 500 v. Chr. von den Pythagoreern entdeckt. Der Satz des Pythagoras war für natürliche, ganze Zahlen besonders wichtig. Für das kleinste pythagoreische Dreieck gilt $3^2 + 4^2 = 5^2$ (vgl. Bild 54). Sie behaupteten sogar: „Alles ist Zahl“, bzw. alles Erkennbare ist in Zahlen und ihren Verhältnissen zu erfassen. So begründeten die Zahlen eine göttliche Offenbarung und dienten nicht nur dem Rechnen. Das Pentagramm (Fünfeck) war heilig (vgl. Bild 55). Um 420 v. Chr. entdeckte Pythagoras von Samos (570 - 500 v. Chr.) den eindeutigen Zusammenhang der Saitenlänge des Monochords mit der Tonhöhe. Dadurch entstand das musikalische Quintensystem (5-Ton-Technik). Für die Bewegung der Gestirne ergab sich der Begriff Sphärenmusik und dann auch die Zahlenmystik. Dabei bezeichnete 5 die „Natur“, denn alle Potenzen von 5 enden wieder auf 5. Die 2 stand für alles Weibliche und die 3 für das Männliche. Die Vereinigung (Summe) beider, die 5 stand für Hochzeit. Im Gegensatz zu den Pythagoreern waren für PLATON (427 – 347 v. Chr.) die Zahlen lediglich eine Art leerer Gefäße. Auch die Mathematik war für ihn nur ein Einblick in das Reich der Ideen. Jedoch sehr viel später galt für den Mathematiker Leopold Kronecker (1823 - 1891): „Die ganzen Zahlen hat Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk“. So erscheint auch der liebe Gott im Autorenregister. Charles Hermite (1822 - 1901) war überzeugt. Zahlen und Funktionen existieren unabhängig von uns so wie die Objekte der realen Welt.

Die vielen Anwendungen von Zahlen in Wissenschaft, Technik, Leben, Politik usw. führten auch zu extrem großen und kleinen Zahlen. Einen groben Überblick zu den besonders wichtigsten zeigt **Bild 123**.



Wer ständig weiter zählt, kommt auch zu immer größeren Zahlen. Dabei entsteht das Problem, immer wieder neue Zahlwörter zu erfinden. Bereits um 215 v. Chr. berechnete Archimedes seine **Sandzahl** zu 10^{63} Sandkörner für die Welt. Ein ähnlicher Wert wird heute vielfach für die Atome in der Welt angenommen. Für die „Neuzeit“ sei weiter erwähnt, dass erst um 1250 das Wort „Million“ entsteht und um 1650 in England die Billion eingeführt wird. Um die besonders große Zahl 10^{100} zu benennen, befragte der Mathematiker Edward Kasner 1930 seinen Neffen und erhielt „Googol“ als Antwort. Rucker war die Zahl noch nicht groß genug und fügte daher für $10^{10^{100}}$ den Namen „Googolplex“ hinzu. Auf die 1 folgen dabei Googol Nullen [RUC90]. Auch die Fakultät überschreitet schnell die physikalischen Grenzen bereits $70!$ ergibt $1,2 \cdot 10^{100}$. Ähnliches gilt auch für viele Kombinationen

Bei der Darstellung von Bild 130 ist besonders auffällig, dass für ein relativ gleichmäßiges Einordnen der wichtigen Zahlen unterschiedliche Skaleneinteilungen erforderlich sind. So ergeben sich die Bereiche binär, psychologisch, anschaulich, naturgegeben und mathematisch. Eingeengte Teilbereiche sind für den Wortschatz von Menschen, die Möglichkeiten im Weltall und die sehr vielen kombinatorischen Zustände eingetragen. Auf diese Skala wird noch einmal im Teil IV, Abschnitt ### zurückgegriffen.

Im Abschnitt 6.5.3 „Auffälligkeit“ tritt unvermittelt die 1727 von Leonhard Euler (1707 – 1783) eingeführte **Eulersche Zahl** $e \approx 2,718\ 281\ 828\ 459\ 045$ für das von Maximum des Entropie-Terms $p \cdot \ln(p)$ auf. Euler nannte keinen einsehbaren Grund. Aber allgemein wird angenommen, dass hierbei keine Eitelkeit vorlag. Die Buchstaben a bis d waren schon vergeben und e war schlicht der erste frei verfügbare. Eventuell ist auch der Bezug zu **exponentiell**⁸³ oder Exponat (Ausstellungsstück) möglich. Heute wird als besondere Eigenschaft von e angegeben: Nur die Exponentialfunktion e^x ergibt sowohl beim Integrieren als auch beim Differenzieren wieder e^x :

$$de^x/dx = e^x \text{ und } \int e^x \cdot dx = e^x + C.$$

Außerdem führt die Umkehrung zum wichtigen natürlichen Logarithmus $\ln(x)$. Es ist jedoch zu beachten, dass für den Logarithmus verschiedene Basen möglich sind. Für deren Umrechnung gilt

$${}_b \log(a) = {}_c \log(a) / {}_c \log(b).$$

Bei der Auffälligkeit wird dann nur die Höhe des Maximums aber nicht seine Lage bei e verändert. Völlig anders ist es bei den Entropien (vgl. Abschnitt 6.5.2): Bei Boltzmann gilt nur $S = k \cdot \ln(W)$, andernfalls müsste die Konstante k verändert werden. Für die Shannon-Entropie kann sogar nur der binäre Logarithmus $\ln$ gültig sein!

Es gibt erstaunlich viele Zusammenhänge, die zu e führen. Ein Beispiel ist das einfache **Wachstum**: In einer Generation mögen y Lebewesen existieren, die jeweils während ihre Lebenszeit a -mal soviel Nachkommen erzeugen. Bei der Startanzahl y_0 existieren dann nach x (ganzzahlig!) Generationen

$$y_n = y_0 \cdot a^x.$$

Ähnliches gilt für die **Zinseszins-Rechnung**: Der exponentiell geformte **Schalltrichter** ist für die Akustik wichtig. Auch die Spannung an einem Kondensator der über ein R geladen bzw. entladen wird, folgt der Exponentialfunktion.

Als **Grenzwert** ist e gleich zweimal vorhanden

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\sqrt[n]{n!}} \text{ bzw. } e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n.$$

Auch eine **unendliche Reihe** existiert

$$e = 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \frac{1}{n!} + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!}.$$

⁸³ Lateinisch *exponare* öffentlich, ausstellen, darlegen, preisgeben. Der Begriff „Exponent“ wurde 1554 von Michael Stifel (auch Styfel oder Stieffel) (ca. 1487 - 1567) eingeführt.

Erstaunlich ist daher zweierlei: Erst 1873 bewies Charles Hermite (1822 – 1901) die Transzendenz von e und trotz der vielen Zusammenhänge ist uns exponentielles Denken äußerst fremd. Schließlich sei für die Auffälligkeit noch ergänzt

$$1/e = 1 - \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} - \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} = 0,3678794412$$

In Griechenland und lange danach waren *Arithmetik* und *Geometrie* zwei streng getrennte und sich hervorragend ergänzende Wissenschaftsrichtungen. Die Geometrie orientiert sich an den Darstellungen von **Euklid** in Alexandria (365 - 300 v. Chr.) und ist in seinen „Elementen“ dargestellt. Der streng axiomatische Aufbau gilt immer noch als vorbildlich. Sie wird heute **Euklidische Geometrie** genannt, wird mit Zirkel und Lineal betrieben und betrifft Punkte, Geraden, Ebenen und Ordnungsrelationen. Der Raum kommt erst sekundär hinzu. Erst René **Descartes** (Cartesius) (1596 – 1650) ergänzte sie 1637 in seinem „Discours de la méthode“ (Abhandlung über die Methode) durch die nur noch rechnende, **Analytische Geometrie**. Dadurch wurde der mathematische Denkstil deutlich verändert. Zunächst werden keine Bilder mehr benötigt, und bald werden sie für unbrauchbar erklärt, ist mit ihnen doch keine eindeutige Ableitung in logischen Einzelschritten möglich. So erscheinen bereits im 19. Jh. erste Mathematikbücher, in denen der Autor stolz erklärt, dass im ganzen Buch kein Bild notwendig gewesen sei und es somit höchsten formalen Ansprüchen genüge. Auf dem Mathematikerkongress 1900 fordert dann David **Hilbert** (1862 – 1943) die vollständige Axiomatisierung der Mathematik. Dieser Weg stellt sich spätestens 1931 durch die Dissertation von Kurt **Gödel** (1906 – 1978) als undurchführbar heraus, was zu einer Änderung des Denkstils führte, vgl. S. 56ff.

Wie er zu der Idee der analytischen Geometrie kam, beschrieb Descartes im Anhang zu *La Geometrie*. Als eines Tages als im Bett lag und die Bewegung einer Fliege auf der Zimmerdecke verfolgte, waren x , x^2 und x^3 nicht mehr Länge, Fläche und Volumen, sondern einfach variable Zahlen, denen geometrisch eindimensionalen Objekte entsprachen (Gerade, Parabel usw.). Diese Idee war so bahnbrechend, dass sich nicht nur neue Anwendungsmöglichkeiten der Mathematik ergaben, sondern auch, dass wir heute bei x^2 eher an eine Quadratzahl als an ein geometrisches Quadrat denken (vgl. dazu Kekule, Affen, Bild 62).

6.6.2. Die Rechentechnik entsteht

Mit den Zahlen (genauer den Zahlzeichen) wurde es zuerst möglich zu zählen, doch sehr bald auch zu rechnen, zunächst mit den Fingern. Das bewirkte verstärkt ein Denken und Handeln im Sinne von wenn $\rightarrow$ dann und damit ein mechanisches (technisches) Nachvollziehen. So entstand bereits um etwa 3000 v. Chr. der **Abakus**⁸⁴ als Hilfsmittel für Berechnungen. Bei ihm wurde ursprünglich nur ein Brett mit Vertiefungen verwendet. Entsprechend dem Rechnungsvorgang wurden dabei die Steinchen in den Vertiefungen neu verteilt. Es war wohl zunächst mehr eine Gedächtnishilfe beim Rechnen. Hierauf geht offensichtlich *Kalkulieren*⁸⁵ zurück, Später wurde daraus das Rechenbrett mit verschiebbaren Kugeln. Um 1000 v. Chr. benutzten es so die Chinesen als wirkliche, mechanische Rechenhilfe. Doch über längere Zeit entstehen zunächst keine, zumindest mit Ausnahme des Antikythera-Rechners von 60 v. Chr. mit 39 Getrieben, einschließlich Differentialgetriebe sind keine bekannt. Doch dieser wurde 1901 im Mittelmeer gefunden und musste sehr mühsam rekonstruiert werden. Offen sieht hat zunächst die Römische Machtpolitik und dann das religiös bestimmte Mittelalter entsprechende Entwicklungen verhindert. Erst die Renaissance (Wiedergeburt) bewirkte ab 1600 neue Entwicklungen. Diese weist dann **Bild 124** in ausgewählten Einzelheiten bis heute aus. Stärker zusammengefasst gilt: Ab 1600 Logarithmentafeln und Rechenschieber, um 1650 mechanische Rechenmaschinen, nach 1900 eigentlicher Rechnerbeginn (Relais, Röhren, Transistor, Schaltkreise), um 1920 Analogrechner, ab 1950 sind Rechner im Handel verfügbar. Es folgen ab

⁸⁴ Griechisch *abax*, *abakos* Tafel, Brett, Chinesisch *Suanpan*, Japanisch *Soropan*.

⁸⁵ Lateinisch *calculus* wurden ursprünglich glatte Steinchen und später Rechensteine bezeichnet; *calculator* war der Rechenmeister, Rechenlehrer. *Kalkül* dürfte erst später über das Französische *calcul* Rechnen, Berechnung, Kalkulation entstanden sein.

1970 die Taschenrechner, um die 1980 Laptops und schließlich um 2000 Internet mit Handy usw. Ergänzend zeigt dann **Bild 125** einige ältere Rechenausführungen.

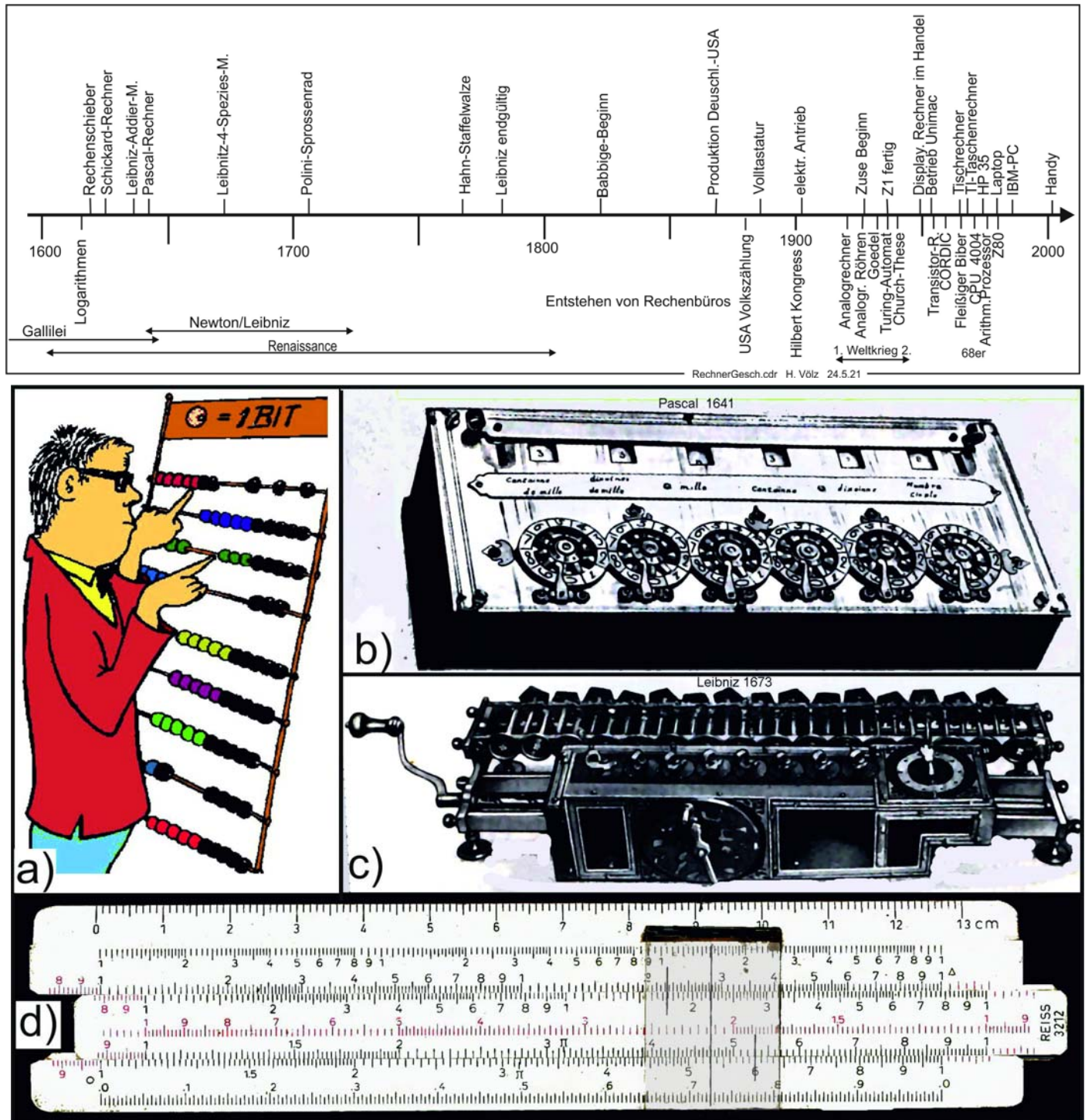


Bild 124. Entwicklung der Techniken des Rechnens.

Bild 125. a) moderner Abakus, b) Rechen von Pascal 1641, c) von Leibniz 1673 und d) moderner Rechenschieber mit nach rechts ein wenig herausgezogener Zunge.

6.6.3. Vom Programmieren zu Turing-Automaten

Solange nur einfache Zahlenwerte oder gedanklich einfachen Zusammenhänge zu berechnen sind, genügt die Automatisierung mit den mechanischen Rechenmaschinen – und viel später mit den einfachen Taschenrechnern. Jedoch bereits die Lösung von umfangreicheren Gleichungen erfordert dagegen komplexe aber genau definierte Abläufe, die bald **Algorithmen**⁸⁶ genannt werden und zur

⁸⁶ Es ist die Lateinisierung des Namens al Khwarizmi gemäß seinem Buch „Algorithmi de numero Indorum“

Programmierung von Rechnern führen. Das Prinzip sei hier am Beispiel der Lösung der einfachen quadratischen Gleichung beschrieben. Hierzu entstanden bereits im 18. Jh. große Rechenbüros mit vielen „Rechenknechten“. Sie ermöglichten relativ schnelle Lösungen selbst für komplizierte Probleme. Die einzelnen Personen sind dabei immer für nur eine Teilaufgabe zuständig. Ihr Ergebnis reichen sie für den nächsten Schritt an den oder die nächstfolgenden „Knechte“ weiter. So ergibt sich der exakt festgelegte Ablauf nach **Bild .126**.

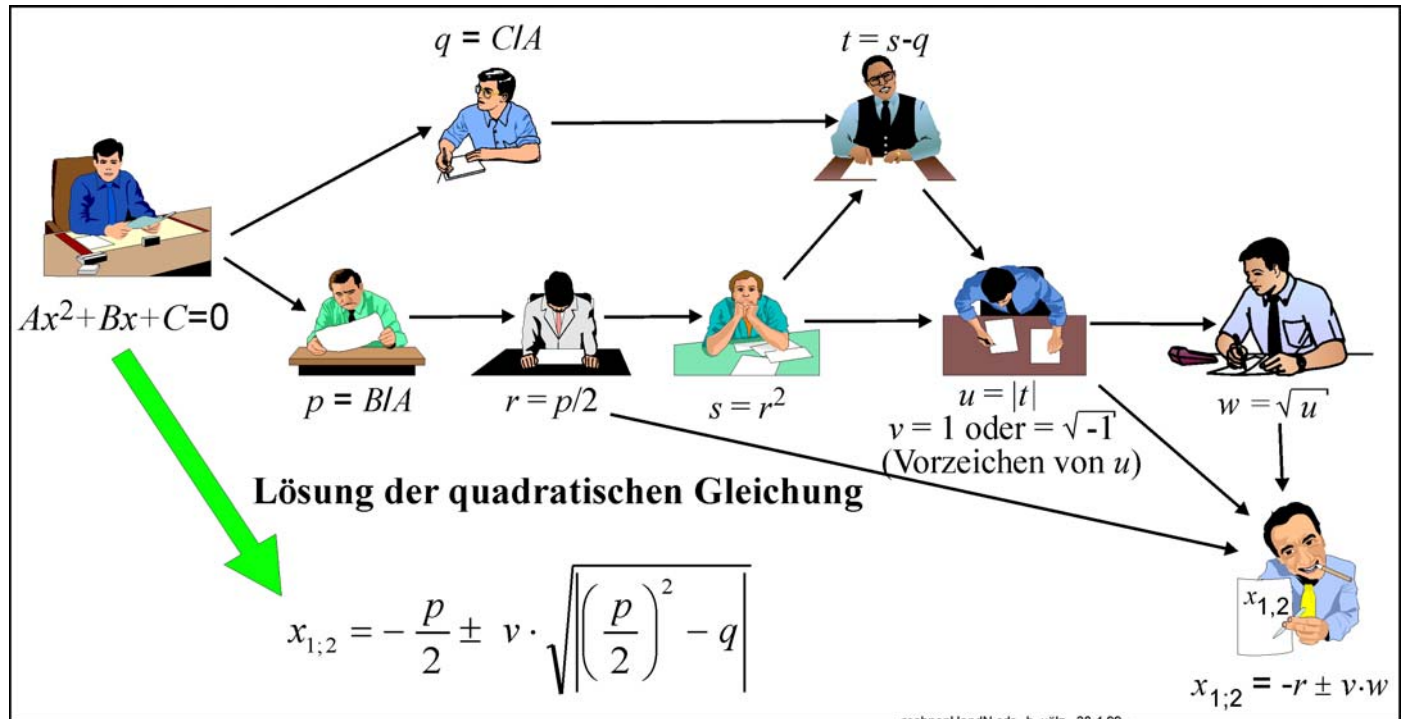


Bild 126. Ablauf für die Berechnung der quadratischen Gleichung

Für das Berechnen entwickelte die Mathematik ständig neue Wege und Möglichkeiten. Zunächst betraf das nur konkrete Aufgaben, wie ein Bestimmen der Masse, des Gewichts, die Landvermessung usw. Anfangs des 20. Jh. wurde die Frage aktuell, was grundsätzlich zu berechnen ist. Zunächst war dabei „berechenbar“ nur intuitiv, also nicht mathematisch erfasst. Deutlich anders war der 1936 **Automat**⁸⁷ von Alan Mathison Turing (1912 – 1954). Er ist jedoch kein Gerät, sondern „nur“ ein universelles, gedankliches Modell des Rechnens. Bestenfalls wurde er mal als stark vereinfachtes Vorführmodell für die Ausbildung gebaut. In **Bild 127** zeigt recht techniknahe sein Prinzip. Es arbeitet mit festgelegtem Takt. Als Speicher wird ein sehr langes Papierband mit Zellen benutzt. Sofern die nicht leer bleiben (λ), kann in sie 0 oder 1 stehen bzw. geschrieben werden. Bei Bedarf kann das Band durch fortlaufendes Ankleben theoretisch unendlich verlängert werden. Der Zugriff auf das Band erfolgt nur auf eine ausgewählte Zelle per Lesen, Schreiben oder Löschen (Radieren). Das Band könnte auch ein Magnetband sein. Nach dem Lesen einer Zelle kann durch den Schalter als Zustandsspeicher eine ausgewählte Tabellen gelesen werden. So wird festgelegt was nun zu geschehen hat (lila):

1. Ob der Zugriff auf das Band weiter an der gleichen Stelle erfolgt oder nach links bzw. rechts verschoben wird (blau).
2. Welche Tabelle beim nächsten Schritt benutzt werden soll (grün).
3. Was eventuell auf die eingestellte Stelle geschrieben werden soll. (rot)

Anfangs wird auf das Band ein Startsymbol α und daran anschließend eine 0/1-Folge mit dem Endsymbol Ω geschrieben. Die Folge bestimmt schrittweise den Ablauf der Rechnung. Wenn sie abge-

⁸⁷ Griechisch *automatos* selbst etwas wollend, beabsichtigend; es geschieht von selbst, ohne menschliches Zutun, Plural *automata* Dinge, die sich von selbst bewegen

arbeitet wurde, ruht das Geschehen und auf dem Band steht das Ergebnis. Das gewünschte Ergebnis wird daher voll automatisch erreicht. Aber selbst für einfache Aufgaben sind die 0/1-Abfolgen und aktuellen Belegungen des Bandes gedanklich schwer nachzuvollziehen. Eine Addition ist ausführlich in [Völ82] S. 68ff. und [Völ96] S. 250ff. behandelt. Bereits 1937 zeigte Turing auch, dass es keinen Algorithmus gibt, der bestimmen kann, ob eine Rechnung jemals zu einem Ende gelangt. Dies ist als Halteproblem bekannt, Details dazu in [Völ82 S.84].

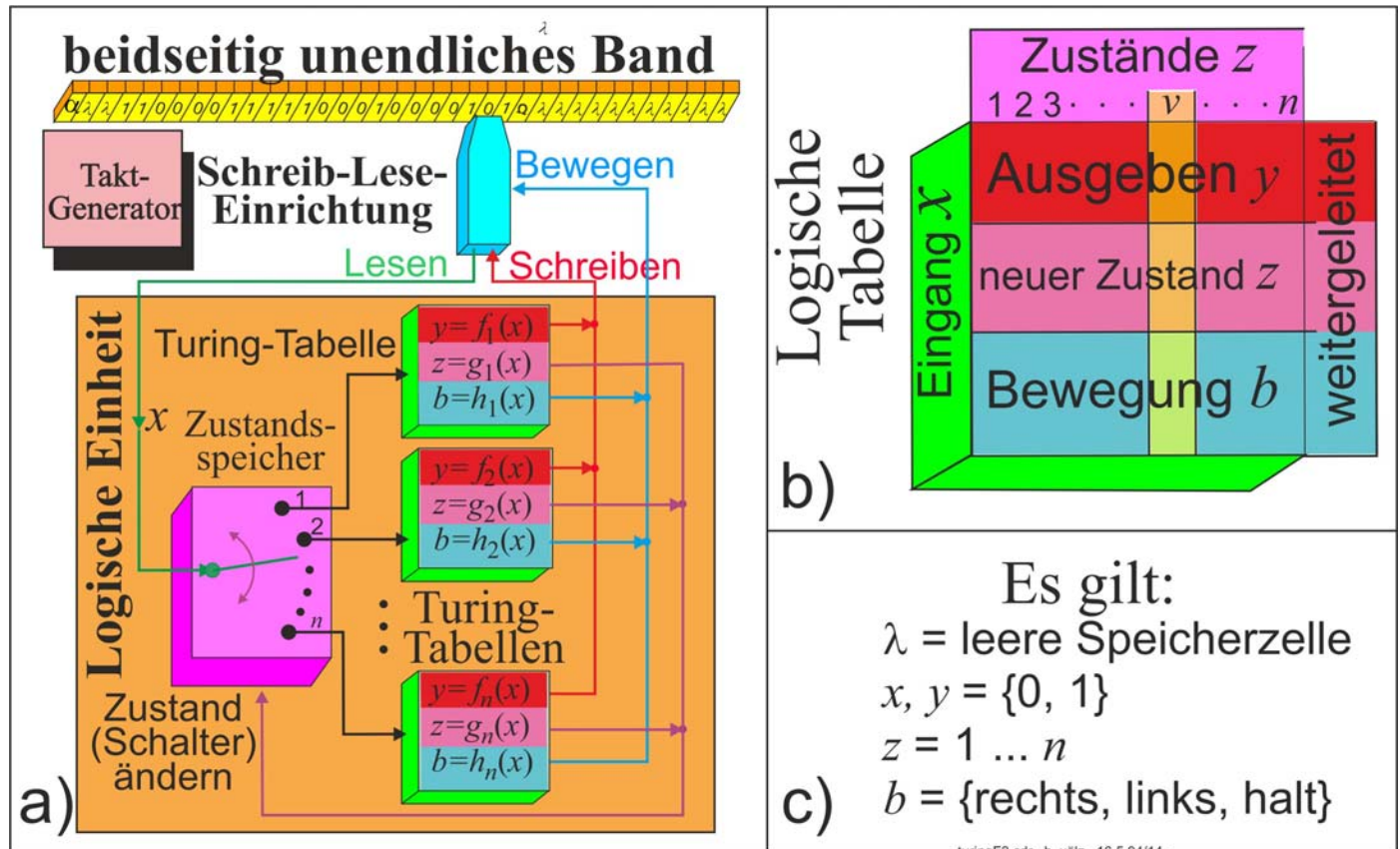


Bild 127. Prinzip des Turing-Automaten. Die n Tabellen können auch zu einer einzigen mit Spaltenauswahl gemäß (b) zusammengefasst werden.

6.6.4. Church-These und Rekursion

Einzelne Turing-Automaten unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Logiktabellen und die Anfangsbelegung. Für allgemeingültige Betrachtungen wurde daher ein *universeller Turing-Automat* definiert. Bei ihm steht auch die Steuertafel auf dem Band und kann daher leicht ausgetauscht werden. Mittels eines Hilfsprogramms können alle Automaten erfasst und in einander überführt (simuliert) werden. Dadurch genügt für jegliches Problem ein einziges Programm und alle Turing-Automaten lösen die gleiche Problemmenge.

Bald zeigte sich, dass mit dem Turing-Automat alle bekannten mathematischen Berechnungen durchgeführt werden können. Per Simulation gilt das auch für alle möglichen Turing-Automaten und sogar für alle späteren Rechenautomaten und sogar den Kleinstrechnern. Dabei ändert sich jedoch die Anzahl der Einzelschritte und folglich dauert die Problemlösung unterschiedlich lange, wobei noch zusätzlich die verschiedenen Taktfrequenzen zu berücksichtigen sind. Sehr schnell entstanden dann mehrere ähnliche Methoden, wie:

- Gleichungskalkül nach Gödel-Herbrand
- Markow-Algorithmus
- Kanonischer Kalkül von Post
- Rekursions-Schemata von McCarthy
- μ -rekursive Funktionen nach Kleene
- Minimal-Logik nach Fitch
- Graphen-Schemata von Kaluzin
- λ -Funktionen von Church

Schließlich zeigte sich, dass sie alle etwa gleich leistungsfähig, wenn auch bei der Anwendung unterschiedlich kompliziert sind. Daher stellte 1940 Alonzo Church (1903 – 1995) eine nicht beweisbare Hypothese auf, die aber von den meisten Mathematikern als gültig akzeptiert wird:

*Alle heute vorhandenen und auch künftig gefundenen Methoden für die **Berechenbarkeit** sind gleich leistungsfähig. Sie ersetzen die intuitiv bestimmte Berechenbarkeit durch den exakten Begriff des Algorithmus. (weiter folgt) Alles Berechenbare ist rekursiv.*

Inhaltreicher und teilweise präziser sind die beiden Aussagen:

1. Alles intuitiv Berechenbare lässt sich mit binären Algorithmen auf 0/1-Basis abwickeln.
2. Alle formal behandelbaren Probleme, wie z. B. Zeichen, Text- und Bildverarbeitung, Künstliche Intelligenz usw., lassen sich ebenfalls mittels binärer Algorithmen bearbeiten. Das bewirkt den Übergang zur Informatik, bei der numerische Probleme untergeordnet sind.

Der übliche Ablauf bei einem Geschehen und bei unseren Gedanken erfolgt linear fortschreitend im Sinne von „wenn → dann“ bzw. Ursache und Wirkung. Bei einer Rekursion ist es deutlich komplexer: Das gerade Geschehene ruft sich selbst wieder auf und kann sich daher beliebig oft wiederholen. Um Unendlichkeit zu vermeiden, ist oft eine Begrenzung der Wiederholungen vorzugeben. Zur Einführung der Rekursion⁸⁸ dient die Lösung der Gleichung $x = \sqrt{x}$. Sie ist heute leicht mit dem Taschenrechner und der Taste $\sqrt{x}$ zu gewinnen. Für eine Anfangs eingegebene 2 folgen dann nacheinander: 1,4142 ; 1,1892..., 1,0905... usw. Systematisch strebt die Lösung immer nach 1. Das gilt ganz sogar für jede zu Anfang eingegebene positive Zahl und zwar unabhängig davon, ob ihr Wert größer oder kleiner als 1 ist. Folglich ist hier 1 die einzige Lösung. Derartige (rekursive) Prozesse sind seit langem in der Physik bekannt und spielen jetzt bei den Fraktalen eine wichtige Rolle. So wurde im letzten Jahrzehnt immer deutlicher, dass Eigenwerte relativ oft vorkommen. Der Zusammenhang könnte (rekursiv) auch so geschrieben werden.

$$x := \sqrt{\sqrt{\sqrt{\dots \sqrt{x}}}}$$

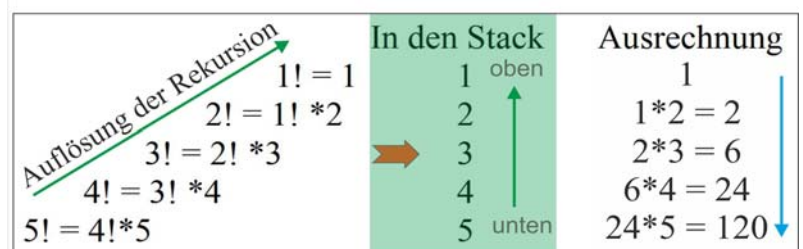
Warum rekursive Berechnungen vorteilhaft sein sollen und sogar die Leistungsfähigkeit von Algorithmen bestimmen, ist unmittelbar nicht einzusehen. Dennoch gilt, alle elementaren mathematischen Funktionen sind rekursiv berechenbar. Daher ist eine Erklärung mit zwei Beispielen vorteilhaft. Ein recht übersichtliches Beispiel ist die **Fakultät**, bei der fortlaufend die natürlichen Zahlen multipliziert werden. Mit dem Endwert n gilt iterativ⁸⁹ geschrieben

$$n! = \text{FAK}(n) = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n$$

Während iterieren einfaches Wiederholen bedeutet (For-Next-Schleife), entspricht rekursiv etwa dem, wie sich Münchhausen am eigenen Schopf aus den Sumpf zieht. Dann gelten für die Fakultät

Der Startwert	$\text{FAK}(0) = 1$	für $n = 0$
und die Gleichung	$\text{FAK}(n) = n \cdot \text{FAK}(n - 1)$	bei $n > 0$

Die Berechnung erfordert jetzt einen Stack für die FAK(5) ist die Tiefe 5 (grün). Für die einzelnen Schritte werden die Teilgleichungen links und im Stack (grün) die Faktoren n von unten nach oben abgelegt. Die Ausrechnung erfolgt dann rechts von oben nach unten.



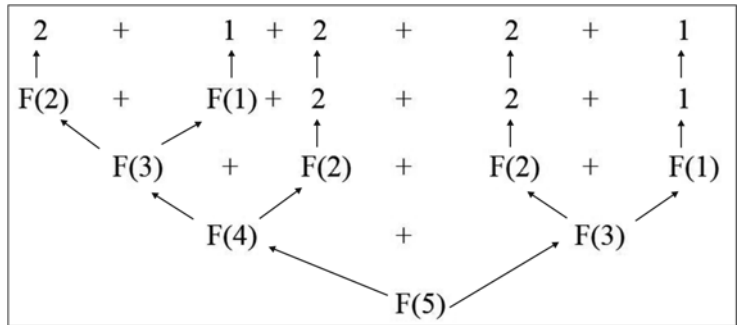
⁸⁸ Lateinisch *recursus* Rücklauf, Ebbe, Heimkehr, *recurso* ich kehre zurück und verwandt *recurro* ich laufe zurück.

⁸⁹ Lateinisch *iteratio* Wiederholung; Adverb *iterato* abermals. (mathematisch also nicht zurück sondern wiederholt)

Eine zweite Einführung ermöglichen die **Fibonacci-Zahlen** (vgl. S. 131). Ihre Definition lautet

$$\begin{aligned} F(1) &= 1 \quad \text{und} \quad F(2) = 2 \\ F(n) &= F(n-1) + F(n-2) \quad \text{für } n > 2 \end{aligned}$$

Den Stackaufbau für $F(5)$ zeigt das nebenstehende Bild: Er geschieht ebenfalls von unten nach oben. Es sind immer die Werte von je zwei benachbarten Funktionen zu addieren und dann von unten bis nah oben weiterzugeben. Das Endergebnis fasst dann alle oben stehenden Zahlen additiv als $F(5) = 8$ zusammen.



Doch nicht immer ist das Ende der Rekursion vorher festgelegt. Es ergibt sich erst dann, wenn überhaupt, im Laufe der Durchführung. Ein noch recht übersichtliches Beispiel dafür ist der **größte gemeinsame Teiler** (GGT) von zwei Zahlen.

$$\begin{aligned} \text{GGT}(n, 0) &= n \\ \text{GGT}(n, m) &= \text{GGT}(m, n) \quad \text{für } m > n \\ \text{GGT}(n, m) &= \text{GGT}(m, R(n, m)) \quad \text{für } m > 0 \text{ und } n \geq m \end{aligned}$$

Dabei ist $R(n, m)$ der Rest bei der ganzzahligen Division von n durch m . Bei dieser Rekursion sind ausnahmsweise keine Werte auf dem Stack abzulegen, der Rest R und Teiler m werden bei jedem Schritt unmittelbar übergeben. Hierbei wird bereits deutlich, dass jede andere Methode deutlich länger oder komplizierter ist.

Grenzen selbst der rekursiven Berechnung zeigt die Ackermann-Funktion von 1926 indem ihre Ergebnisse schnell über alle Zahlengrenzen hinaus wachsen. Péter Rózsa definierte sie 1955 durch drei Regeln:

- Regel 1: $A(0, y) = y + 1$
 Regel 2: $A(x, 0) := A(x - 1, 1)$ für $x > 0$
 Regel 3: $A(x, y) := A(x - 1, A(x, y - 1))$ für $x > 0$ und $y > 0$

Doch auch sie ermöglichen keine leidlich anschauliche Behandlung. Daher folgt hier nur ein Ausschnitt für $A(2,2)$:

$$\begin{aligned} A(2, 2) &= A(1, A(2, 1)) && \text{Regel 3} \\ &= A(1, A(1, A(2, 0))) && \text{Regel 3} \\ &= A(1, A(1, A(1, 1))) && \text{Regel 2} \\ &= A(1, A(1, A(0, A(1, 0)))) && \text{Regel 3} \\ &= A(1, A(1, A(0, A(0, 1)))) && \text{Regel 2} \\ &= A(1, A(1, A(0, 2))) && \text{Regel 1} \\ &= A(1, A(1, 3)) && \text{Regel 1} \end{aligned}$$

Beispiele für berechnete Werte zeigt die folgende Tabelle, mehr Details [Völ96] S. 233 ff.

y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	60	61
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	61	62
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	62	63
2	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	123	125
3	5	13	29	61	125	253	509	1021	2045	4093	8189	$1,8 \cdot 10^{19}$	$3,7 \cdot 10^{19}$
4	13	65333	auf einem üblichen Rechner nicht mehr darstellbar										

y	10	11	12	13	14	121	122
$A(3, y)$	8 189	16 381	32 765	65 533	131 069	$2,128 \cdot 10^{37}$	$4,25 \cdot 10^{37}$

Über Jahrtausende sind wir gewohnt, streng sequentiell mit der linear ablaufenden Sprache zu denken. Hinzu kommt noch der oben genannte Glaube an feststehenden deterministischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Daher fällt es fast allen äußerst schwer, rekursiv zu Denken. Nur in der Theoretischen Informatik wurde seit etwa 1930 die große Bedeutung der Rekursion erkannt und inzwischen ermöglichen viele Programmiersprachen Rekursion. Dennoch herrschte noch lange Zeit große Unsicherheit bezüglich ihrer Anwendung. Das drückte McCarthy so aus [Bar94]:

„Hätte es im Mittelalter Rechenanlagen gegeben, dann wären bestimmt einige Programmierer wegen Ketzerei von anders gesinnten Kollegen auf dem Scheiterhaufen verbrannt worden.... Höchstwahrscheinlich wäre eine der Hauptketzereien der Glaube oder Unglaube an die Rekursion gewesen.“

6.6.5. Zeitkomplexität

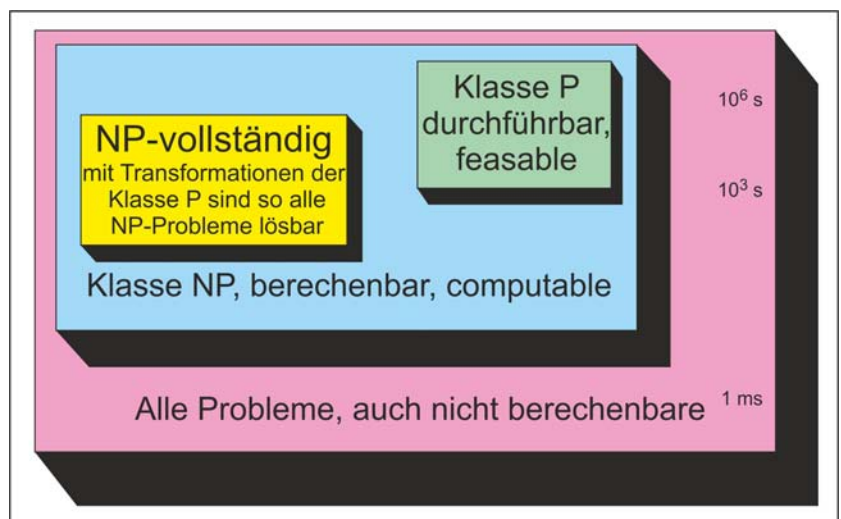
Für die meisten Probleme gibt es einen Parameter n . Er betrifft z. B.:

- Die Anzahl der Stellen von Parametern und/oder Unbekannten. Bei einer Multiplikation oder dem Primzahltest ist er die Ziffernzahl der Variablen.
- Die Anzahl der Wörter oder Begriffe, die z. B. bei Such- oder Sortieralgorithmen vorkommen
- Die Anzahl der Befehle, Schritte des benutzten Algorithmus.

Mit n wächst die erforderliche Speicherkapazität, vor allem aber die Laufzeit $t_A = f(n)$ für die Abarbeitungszeit. Bei kleinen n kann dieser Zusammenhang recht unregelmäßig sein, jedoch für große n , besonders für $n \rightarrow \infty$ gilt meist eine Potenzreihe:

$$t_A = \sum_{i=0}^z a_i \cdot n^i .$$

Zur Abschätzung genügt die höchste vorkommende Potenz z , und es gilt $t_A \approx a_z \cdot n^z$. Dieser Zusammenhang heißt Zeitkomplexität $\Omega(z)$ des Problems bei dem dazugehörigen Algorithmus. Für viele Probleme, z. B. die arithmetischen Funktionen gilt $2 \leq z \leq 3$. Es gibt jedoch Probleme und Algorithmen deren Komplexität viel schneller wächst. Für eine noch sinnvolle Rechenzeit (z. B. mehrere Stunden) gibt es dann den größtmöglichen Parameter auf n_g . Über ihn hinaus sind keine Ergebnisse mehr zu gewinnen. Schematisch zeigt diesen Zusammenhang **Bild 128**. Danach sind zwei Bereiche deutlich zu unterscheiden. Bei n , n^2 und n^3 nimmt die Rechenzeit nur wenig steil mit dem Parameter n zu (grün). Durch Erhöhung der Rechengeschwindigkeit sind dabei auch Berechnungen für noch mehr Parameter möglich. Derartige Probleme heißen polynomial bzw. **P-Probleme**. Sie werden *durchführbar* bzw. *feasible* genannt. Bei $n^{ld(n)}$, 2^n , 3^n usw. existiert jedoch eine maximal möglichen Parameteranzahl n_g mit einer sehr steil verlaufenden Grenze (blau). Auch eine deutliche Erhöhung der Rechnerggeschwindigkeit bringt dann so gut wie keinen Gewinn. Es liegen **NP-Probleme** mit *nicht* deterministisch in *polynomialer* Zeit. Die Bezeichnung nichtpolynomial ist falsch, denn es könnte für sie nicht-deterministische Automaten, z. B. per Zufall oder Quanten-Rechner geben. Die NP-Probleme sind zwar (theoretisch) *berechenbar*, *computable*, aber ab n_g nicht mehr *durchführbar*. So ergibt sich der nebenstehende Zusammenhang für die Berechenbarkeit.



Auf dem vorangehenden Bild ist noch der (gelbe) Bereich **NP-vollständig** ausgewiesen. Sie ist eine Teilmenge von NP. Wenn es für sie eine Lösung gibt, so kann sie mittelbar auf alle NP-Probleme übertragen werden.

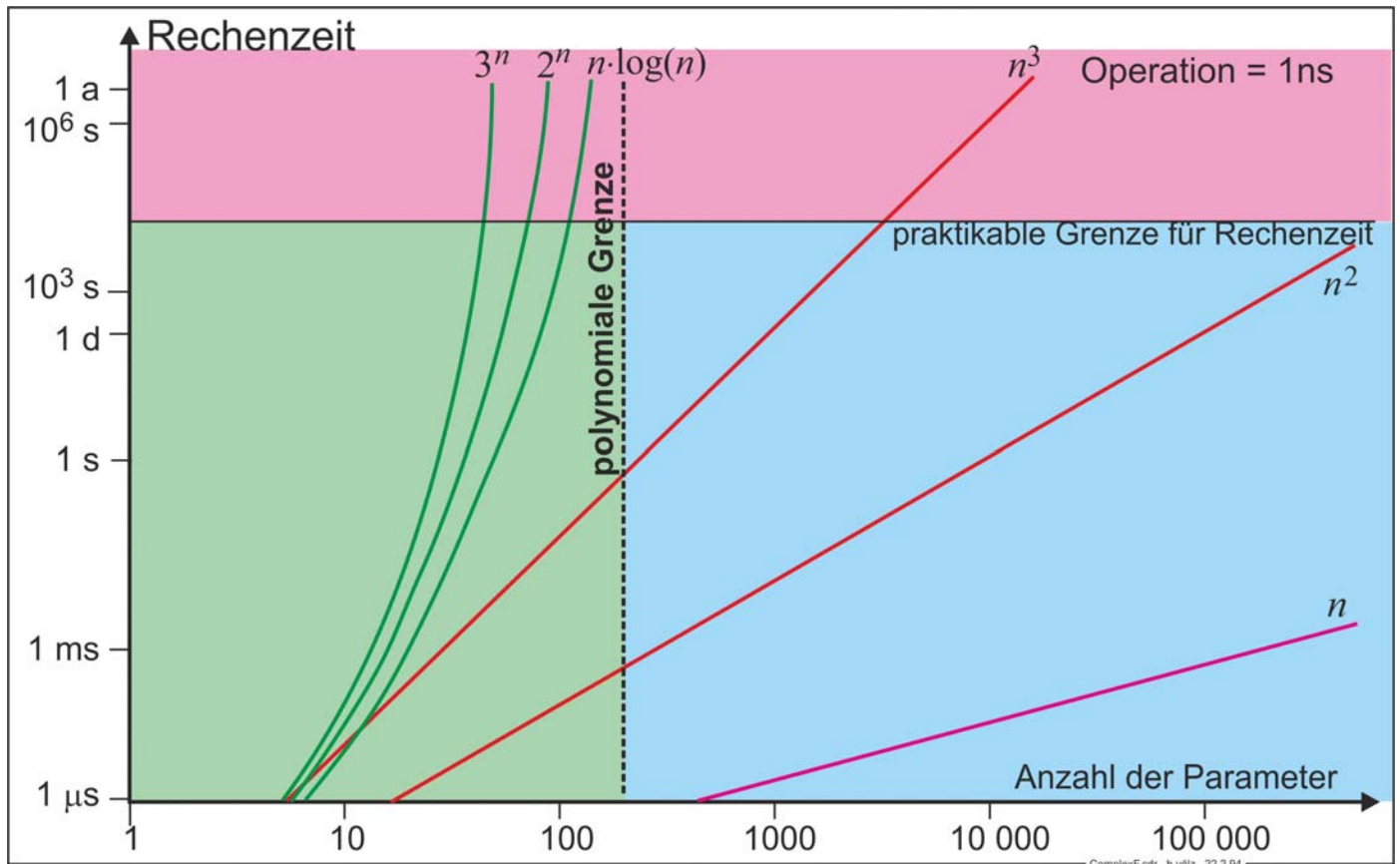
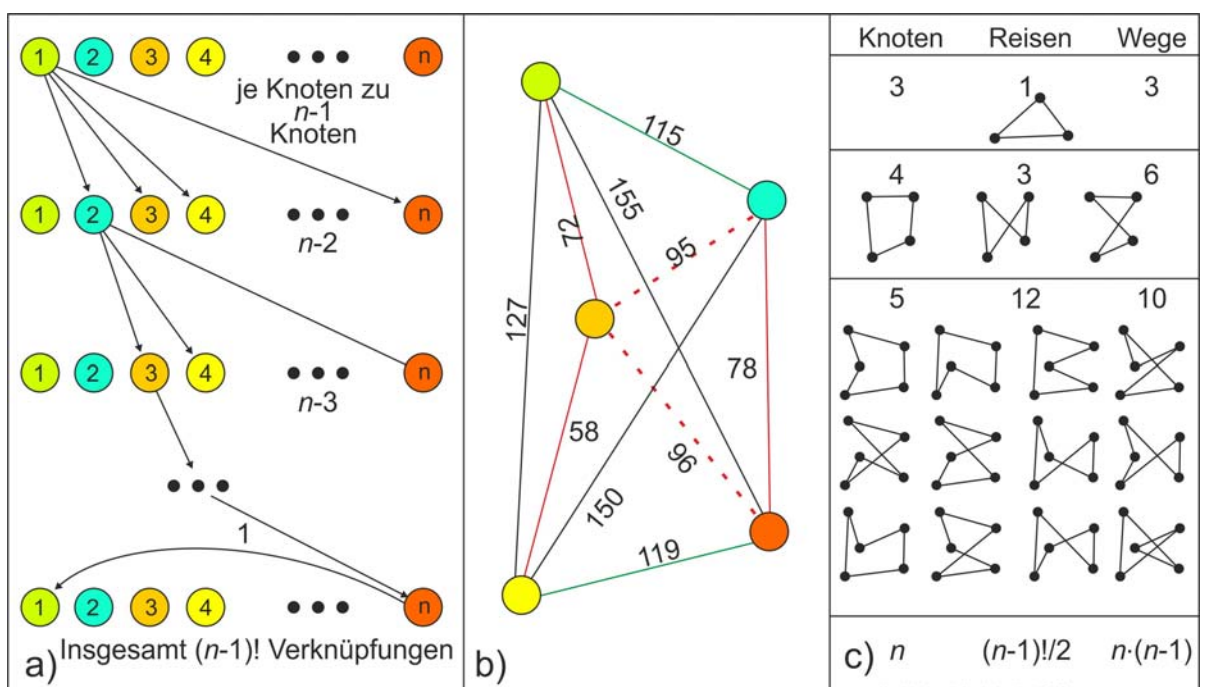


Bild 128. Zusammenhänge für die Zeitkomplexität.

Das typische NP-Problem ist der **Handelsreisende**. Auf einer Rundreise sollen n Orte nacheinander auf dem kürzestmöglichen Weg besucht werden. Am Start sind $n-1$ Orte möglich, dann $n-2$, $n-3$ usw., und am Schluss die Rückreise (**Bild 129a**). Das ermöglicht $1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) = (n-1)!$ Reisen.

Bild 129. Zu den Wegen und Rundreisen beim Problem des Handelsreisenden.



Da jede Reise auch in der entgegengesetzten Richtung gleich lang ist, existieren nur $W = \frac{1}{2} \cdot (n-2)!$. So gilt die folgende Tabelle.

Orte	Wegeanzahl	Rundreisen	Orte	Wegeanzahl	Rundreisen
3	3	1	8	28	2 520
4	6	3	9	36	20 169
5	10	12	10	45	181 440
6	15	60	11	55	1 814 400
7	21	360	12	61	19 958 400

Die Anzahl der möglichen Rundreisen nimmt mit der Anzahl der Orte n extrem stark zu und ist bald nicht mehr berechenbar. Ein Beispiel mit den Entfernungen für nur 5 Orte zeigt(b). Für eine anschauliche oder grafische Lösung gibt es bereits beachtliche Schwierigkeiten. Selbst wenn dem kürzesten Weg (rot) begonnen wird. Beim Beginn 58 oder 72, entfallen 95 oder 96; es folgen 115 und 119 (150 und 155 wären länger) usw. Schließlich zeigt noch (c) die möglichen Wege bis zu 5 Orten. Auch das macht die Zunahme gemäß NP verständlich.

6.6.6. Grundaufbau des Universal-Rechners

Den prinzipiellen Aufbau des ersten technischen Rechners zeigt **Bild 130a**. Bei ihnen wurde das Programm noch als Hardware-Bauteil in den Rechner eingefügt und musste dann für Programmänderungen ausgetauscht werden. Erst um 1945 legte John von Neuman (1903 – 1957) auch das Programm im Arbeitsspeicher des Rechners (b). So war es genauso leicht wie die Daten veränderbar. Es entstand jedoch entstand der „Flaschenhals“ zwischen Rechenwerk und Speicher. Denn im Betrieb mussten Daten und Befehlen diesen Weg gemeinsam passieren. Dennoch hat sich die NEUMAN-Struktur ohne wesentliche Änderungen schnell durchgesetzt. Sie ermögliche eine leichtere Programmierung

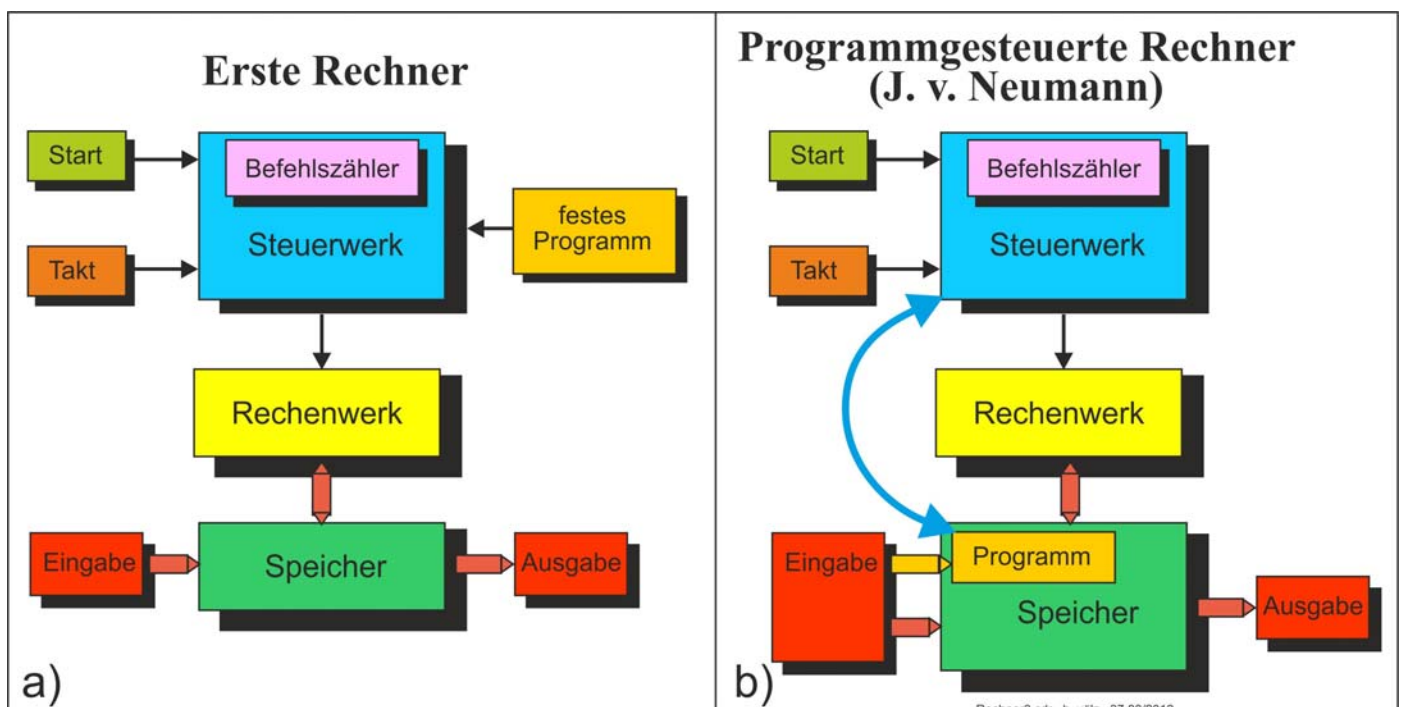


Bild 130. Übergang von den ersten technische Universalrechnen zum Neumann-Typ

1970 schuf Ted Hoff die erste CPU 4004 (central processing unit). Sie war eigentlich für einen Taschenrechner gedacht. Da er aber damit ziemlich langsam arbeitete, wurde sie für ihn nicht angewendet. Aus ihr gingen jedoch bald viele CPU-Weiterentwicklungen für Universalrechner hervor. Ihren grundsätzlichen Aufbau zeigt **Bild131a**. Sie führten zum typischen Rechneraufbau (b). Die eigentliche Rechner-Hardware ist hier die ALU (Arithmetic and Logic Unit). Sie leistet deutlich mehr als ein Adder und wurde später durch eine komplexe Arithmetik-Einheit ergänzt. Dieser Stand wurde etwa 1980 erreicht. Seitdem ist die Speicherung ganz wesentlich verbessert worden und

die Datenrate ist beträchtlich gestiegen. Doch neben einer hohen Parallelverarbeitung ist inhaltlich kaum Neues hinzugekommen. Damit ist auch der dritte Teil abgeschlossen.

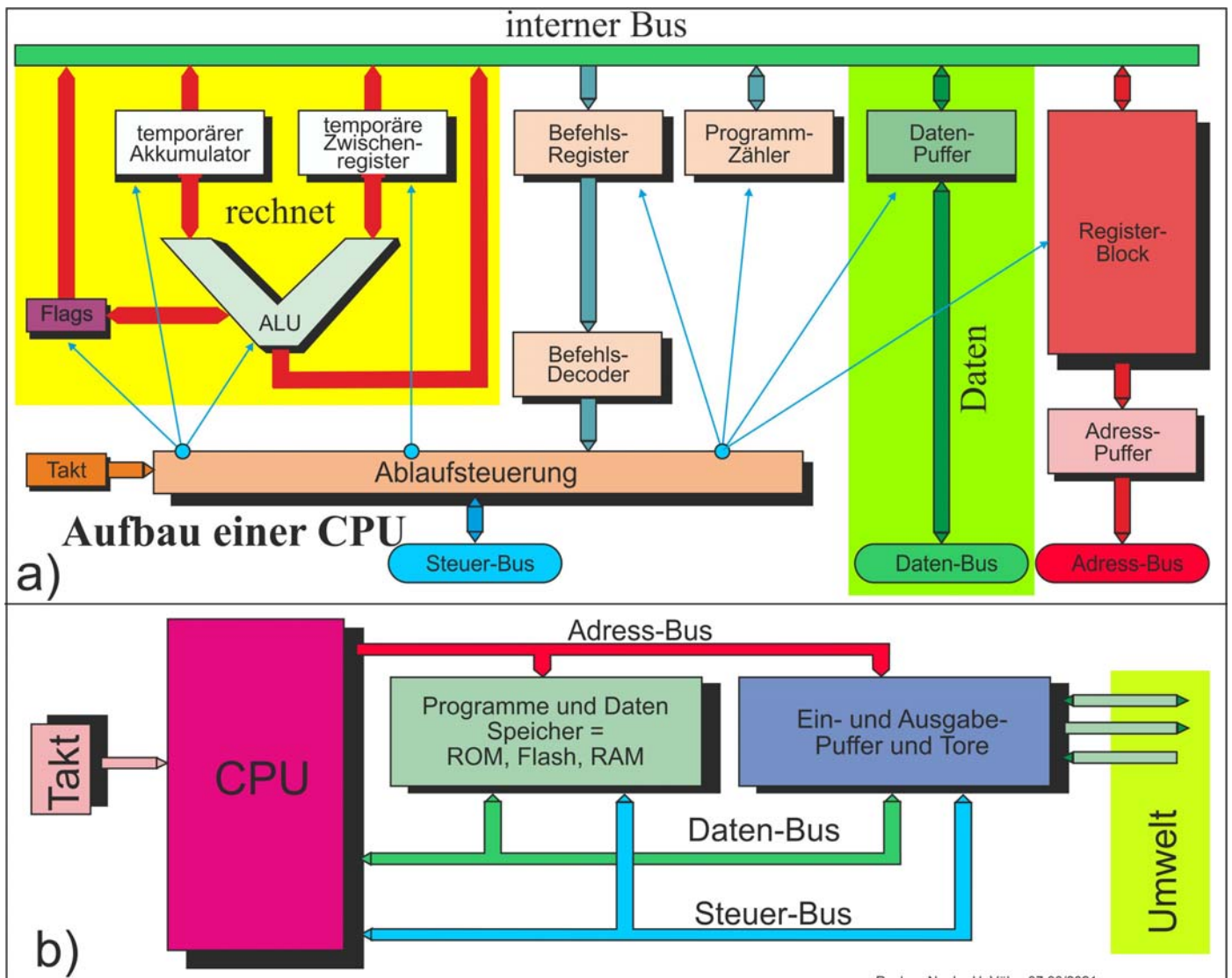


Bild 131. Aufbau einer typischen CPU (a) und ihre Einfügung in den Universalrechner (b).

IV Probleme und Grenzen

7. Bewertungen und Vorschläge

Die Teile 1 bis 3 versuchen möglichst einfach und weitgehend naturwissenschaftlich, ein Bild unserer Realität und ihrer Wahrnehmung vorzustellen. In nur wenigen Fällen wird dabei auch auf Grenzen und Widersprüche eingegangen. Hier sollen sie nun weitgehend systematisch erfasst und soweit als möglich, auch aufgeklärt werden. Der Beginn sei mit irgendeiner Welt angefangen. Da es grundsätzlich (!?) keine Letztbegründung geben kann (s. S. 1), wird sie *stofflich-energetisch* mit der Möglichkeit zur *Evolution* angenommen. Dann muss jedes hierin vorkommende Objekt (als irgendein Teil der Realität) auf seine Umgebung reagieren. Das verlangt vom Objekt eine Bewertung seiner Umwelt. Was lebt und evaluiert muss sich in der Realität erhalten, sich sogar vorteilhaft verhalten und zwischen nützlich und schädlich entscheiden können (Evolution Theorie). Diese wenigen Grundlagen sind zunächst nur mit unserer Umgangssprache beschrieben.

7.1. Bewertung von Eigenschaften

Der Vergleich von Eigenschaften ermöglicht auch ihre Bewertung. Nur teilweise, zuweilen sogar genauer kann sie auch mit Messungen in Zahlen erfolgen. Die deutsche Umgangssprache bewertet mit den Komparationen⁹⁰. Dazu existieren für die Eigenschaftswörter (Adjektiven) drei Steigerungsstufen:

- **Positiv** (von lateinisch *ponere* festlegen), wie: gut, schön, schnell
- **Komparativ** (lat. *comparare* vergleichen), wie: besser, schöner, schneller.
- **Superlativ** (lat. *super* über und *ferre* tragen), wie: am besten, am schönsten, am schnellsten.

Leider ist es dabei aber nicht üblich oder gar erforderlich, die Menge der zu bewertenden Objekte (Geschehen) vorher zu benennen, festzulegen oder gar zu definieren. Das *Positiv* ist zwar bereits für ein Objekt möglich, doch häufig werden mit ihm mehrere, leider meist nicht genau abgegrenzte Objekte als Menge zusammengefasst. Beim *Komparativ* sind zumindest zwei konkrete Objekte oder Mengen zum Vergleich notwendig, doch auch ihre Auswahl wird vorher nicht festgelegt. Der *Superlativ* ist besonders ungenau bestimmt, denn eigentlich kann er nur für ein neventuell für mehrere genau bestimmte Objekte aus einer streng definierten Gesamtmenge angewendet werden. Das widerspricht der mathematischen Aussage, dass es keine größte Zahl gibt. Wäre nämlich zuvor die Menge der zu betrachtenden Zahlen genau festgelegt, dann wäre ein Addieren von 1 zur bereits größten Zahl unmöglich. Damit wäre auch nicht das berühmte theoretische Hilbert-Hotel möglich: Betrüge die Zahl seiner Hotelzimmer n und wäre es voll belegt, dann könnte kein neuer Gast dadurch untergebracht werden, indem der Gast aus Zimmer 1 nach Zimmer 2 und der Gast aus 2 nach 3 usw. umzieht. Für den Gast im Zimmer n wäre nämlich kein Zimmer $n+1$ verfügbar. Genau hierdurch unterscheiden sich Realität und mathematische Theorie. Dann ist auch nicht das „aktuelle Unendlich“ zulässig. Denn es kann zwar in einer mathematischen Theorie, aber nicht in der Realität existieren. Selbst wenn irgendetwas angenommen würde, dass die Realität unendlich sei, so ist das in endlicher Zeit nicht überprüfbar, bleibt also eine Hypothese. Schließlich leben wir alle und wohl auch die Menschheit nur endlich! Das ändert sich auch nicht durch den Vorschlag zum Anfang und Ende der Zeit im Abschnitt 3.6. Daher ist eine zusätzliche Bewertung, Komparation notwendig, welche die Umgangssprache zu ergänzen vermag. Dafür ist festzulegen:

1. Die Objekte und/oder Mengen, welche in die Betrachtung einbezogen werden.
2. Der Zeitraumes in dem die Aussagen gültig bleiben.
3. Sie benutzten Objekte, Mengen dürfen sich während der Betrachtung nicht ändern.
4. Zusätzlich könnte es notwendig sein, dass bei Änderungen eine Speicherung der Vergangenheit erfolgen muss.

⁹⁰ In der Schule kannten wir hierzu die Parodie: „doof, Dover, Calais“

Die vierte Vergleichsstufe soll **Progressativ**⁹¹ (Fortgang, Fortschreiten) heißen. Als Beispiel sei hierfür das *größte* Objekt „A“ (Superlativ) aus der festgelegten Menge ausgewählt. Nun möge sich das Objekt „B“ der Menge so ändern, dass es *größer* wird (komparativ) und dabei $B > A$ entsteht. Dann ist A nicht mehr das Größte und muss eine neue Bewertung erhalten, die *großzich* heißen soll. Diese Bezeichnung sollen aber auch alle Objekte erhalten, die dem größtmöglichen Objekt der Menge hinreichend nahe sind. Der Toleranzbereich dafür könnte auf 10 % der Gesamtmenge festgelegt werden. Denn diese Objekte könnten eventuell innerhalb der festgelegten Zeit zum größten Objekt werden oder aus ihm entstanden sein. Später wird sich zeigen, dass mit dieser Komparation viele der oben genannten Probleme, und sogar darüber hinaus, aufzulösen sind. Ein anschauliches Beispiel mag das erläutern: Im **Bild 132** sei der Definitionsbereich für „*Tolen*“, durch die ganzen Zahlen von 100 bis 10 000 festgelegt (niederdeutsch: „Det sün de Tolen“). Die kleinste Tol ist dann 100, und die größte 10 000. Es müssen aber nicht immer alle Tolen in der Menge vorkommen. Die größte vorhandene Tol sei 9 683. Ändert sich nun die Tol 9 521 auf 9 811. Dann ist 9 683 nicht mehr die größte und wird nun *großzich* genannt. Das Bild zeigt die Lagen und Bezeichnungen für ausgewählte Tolen.

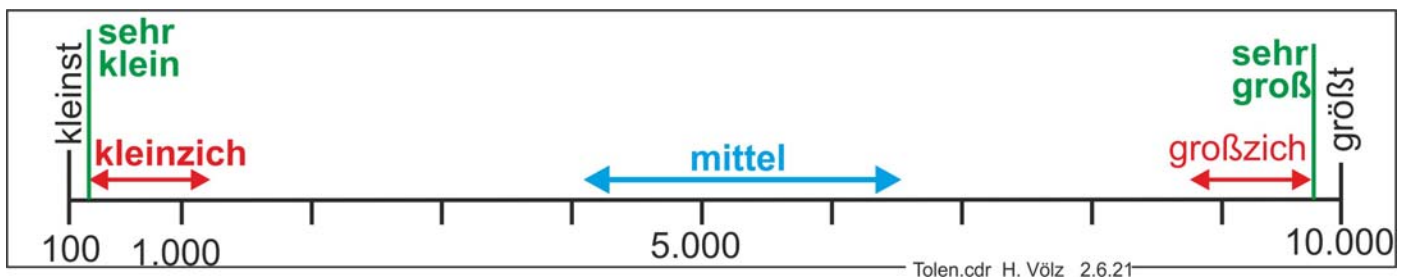


Bild 132. Vorgeschlagene Bezeichnungen für Komparationen, Vergleiche.

Zuweilen werden auch die beiden folgenden Steigerungsstufen erwähnt.

- **Elativ** (v. lat. *elatum* „hervorgehoben“ oder *efferre* „herausheben“)
- **Exzessiv** (v. lat. *excedere* „herausgehen/überschreiten“)

Sie haben jedoch für die hier erfolgenden Betrachtungen keine Bedeutung.

Mit ähnlichen Betrachtungen wie oben ist leicht zu zeigen, dass es keine gültige Aussage für **Alles** oder **Alle** ohne vorherige Definition der einbezogenen konkreten Objekte usw. geben kann. Auch das **Nichts** (bzw. Null) hat keinen Sinn, da es keine zu bewertende Eigenschaft besitzen kann. Statt dessen sind *allzich* und *nullzich* angebracht. Nur für das Stellenwertsystem muss die *Null* behalten werden, um mit ihr die Leerstellen zu kennzeichnen. Hierbei ist sie ja auch keine Zahl, sondern wird nur als Lückenfüller verwendet. Damit erhebt sich die Frage, ob die Ständigkeit von Bild 7 für „immer und überall“ aufrecht erhalten werden kann. Alle entsprechenden Verallgemeinerungen sind auf einen bekannten, experimentell untersuchten Bereich einzuschränken. Bereits die meist erforderliche Isolation eines Bereiches bei der Messung weist in diese Richtung (s. Bild 16). Dafür spricht auch Einsteins Aussage, dass trotz eines Gegenbeweises die entsprechende Theorie oft weiter als gültig benutzt wird (s. S. 24). Aus diesen Gründen wurde am Anfang dieses IV. Teils der andere Weltbeginn gewählt. Bezüglich Nichts wäre noch von Ludwig **Wittgenstein** (1889 - 1951) zu ergänzen: „Wovon man nicht sprechen kann, darüber muss man schweigen.“ [Wit22]. Im ähnlichen Sinn wird auch häufig in der Literatur umfangreich über Schweigen geschrieben. Ein berühmtes und verfilmtes Beispiel ist Heinrich **Böll's** (1917-1985) „Doktor Murkes gesammeltes Schweigen“ von 1958 [Böl58]. Der somit insgesamt mögliche Bereich der positiven Zahlen reicht

von *kleinzich* bis zu *großzich*.

⁹¹ Als anderer Vorschlag wäre möglich: Moderativ von *modus* Bewährung Beschränkung, Maß halten. Für die Benennung des Adjektivs wurde die Endsilbe *zich* ausgewählt, weil sie sonst nirgends verwendet wird.

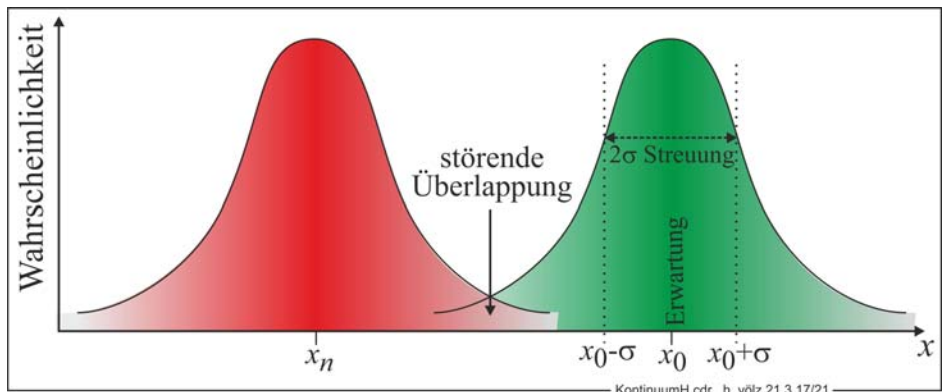
Alle Zolen zusammengefasst ergeben *allzich*. Darin können aber nicht die mathematischen Werte Null, Alles und Unendlich vorkommen. Die leere Menge entspricht *nullzich*.

7.2. Zahlen für kontinuierlich bis digital

Bei Messungen, Experimenten usw. sind die erhaltenen Werte immer etwas unsicher (vgl. S. 9ff.). Der mögliche Fehler kann durch Wiederholungen verringert werden und für alle Werte ergibt sich dann etwa die Gauß'sche Fehlerkurve von Bild 13. Das Ergebnis x besteht aus dem Erwartungswert x_0 und der Streuung σ zu $x = x_0 \pm \sigma$. Bei zeitlichen Änderungen folgen die einzelnen Werte oft relativ dicht aufeinander. Dabei können störende Überlappungen wie in **Bild 133** auftreten. Sie führen zu Fehlern, die im Abschnitt #### behandelt werden.

Aus historischen Gründen wird bei *zeitlichen Signalen* leider immer noch recht oft fälschlich von *Analogtechnik* gesprochen. Deshalb ist es notwendig, weitere Begriffe zu definieren.

Bild 133. Das Übelappen von Messwerten als Störung.



Analog⁹² und *Analogie* betreffen immer zwei zu vergleichende Objekte, Geschehen usw. In der Biologie gilt das z. B. für Organe, wie die Augen der Säugetiere, Insekten und Kopffüßler. In der Psychologie und Kybernetik werden so ähnliches bis gleichartiges Denken bzw. Geschehen verglichen. Es gibt viele weitere Anwendungen, In der Literatur wird z. B. Analoges fast immer bei den Fabeln gedanklich absichtlich einbezogen. Daher ergibt sich der linke (blaue) Teil von **Bild 134**. Nur in der Justiz sind Analogschlüsse nicht zugelassen [Völ79].

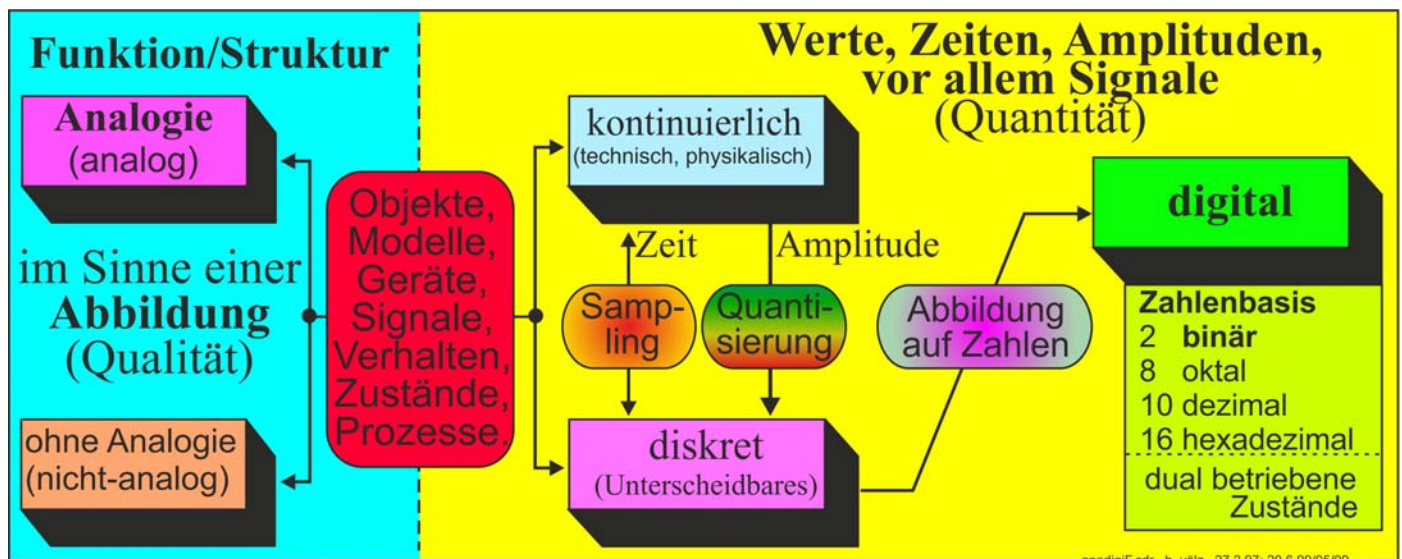


Bild 134. Die Werte von kontinuierlich bis digital.

Einzelne Werte, Zeiten usw. können folglich nicht analog existieren. Bei **kontinuierlich**⁹³ existieren mehrere, oft viele unterscheidbare, aber unmittelbar aufeinanderfolgende Einzelwerte, häufig auch

⁹² Griechisch *logos* Vernunft, lateinisch *ana* auf, wieder, aufwärts, nach oben. *analogia* mit der Vernunft übereinstimmend, Gleichmäßigkeit auch Entsprechung, Ähnlichkeit, Gleichwertigkeit, Übereinstimmung.

⁹³ Lateinisch *continens*, *continuus*: zusammenhängend, angrenzend an, unmittelbar folgend, ununterbrochen, jemand zunächst stehend und Continuare aneinanderfügen, verbinden, fortsetzen verlängern, gleich darauf, ohne weiteres.

als entsprechenden Wertefolgen. Bei **diskret**⁹⁴ treten ganze und gebrochene Zahlen sowie Werte in ihrer Dezimaldarstellung mit Ziffern hinter dem Komma auf. Weil aber unendlich viele nicht zugelassen bzw. möglich sind, dürfen nur endlich viele Ziffern hinter dem Komma auftreten. Das erste Cantorsche Diagonalverfahren muss dabei also irgendwo enden (vgl. Bild 122). Gemäß oben ist vielfach auch die Streuung der Werte mit anzugeben. Für die möglichen Zahlenarten sind auch die Bilder 121 und 123 nützlich.

Für die oft gewünschte oder notwendige **digitale**⁹⁵ Technik müssen die einzelnen Werte genau definierten, nicht unmittelbar benachbarten diskreten Werten zugeordnet werden. Das geschieht vorwiegend durch die Quantisierung⁹⁶ ihrer Amplitude *plus* dem Sampling (von englisch Probe) der Zeit (gelber Hintergrund). Häufig ist es aber für unsere Sinnesorgane und einige Techniken später wieder notwendig, daraus kontinuierlichen Werte zurückzugewinnen. Das entspricht dann eigentlich einem Umweg mit zwei Wandlungen (ADU und DAU). Es gibt aber viele Gründe für die Anwendung der Digitaltechnik, wie verlustloses Kopieren, Fehlerkorrektur und Rechentechnik. (s. u. a. Abschnitt 6.2 und 6.6).

Mit der üblichen Digitalisierungstechnik ist jedoch das Zurückwandeln selbst rein theoretisch höchstens für den Zeitverlauf, und in der Praxis sogar nur näherungsweise, möglich, s. [Völ17]. So entsteht dabei immer störendes Samplingrauschen. Deshalb wurde die **Kontinuierliche Digitaltechnik** entwickelt, die leider noch nicht benutzt wird. Für ihre Einzelheiten sei auch auf [Völ08] verwiesen.

Als binäre Werte sind nur 0 oder 1 im Sinne einer Ja/Nein-Entscheidung möglich. Ihre Anzahl wird in **Bit**⁹⁷ gezählt. Mehrere von ihnen können auf verschiedene Zahlenbasen, wie oktal, dezimal oder hexadezimal, codiert, also zusammengefasst werden (gelb). Auch das **Byte** als Zusammenfassung von 8 Bit existiert. Doch letztlich wird intern (primär) meist das rein binäre Format mit den beiden Werten genutzt (rechts grün). Auf Grenzen und Widersprüche hierbei wird am Ende des folgenden Abschnittes eingegangen.

7.3. Logik und Widersprüche

Denken ist kein Selbstzweck, sondern es soll zu gültigen, folgerichtigen, auch nützlichen Aussagen, Entscheidungen und Ergebnissen führen. So entstand schon in der Antike, spätestens und vor allen durch Aristoteles die **Logik**⁹⁸, und insbesondere die **Syllogistik**⁹⁹, auch als Schluss- und Denklehre bezeichnet. Ihre Aussage und Argumentation, besteht aus zwei Behauptungen oder Urteilen (Prämissen) und der daraus gezogenen Schlussfolgerung (Konklusion). Das berühmteste Beispiel für einen Syllogismus lautet:

1. „*Alle Menschen sind sterblich*“ (Proposia maior), 2. „*Sokrates ist ein Mensch*“ (P. minor).
Daraus folgt dann „*Auch Sokrates sterblich*“

Doch leider lassen sich so auch falsche Aussagen gewinnen. Aus den Prämissen:

1. „*Berlin ist die Hauptstadt Deutschlands*“ und 2. „*Berlin ist ein Wort aus sechs Buchstaben*“
Folgt fälschlich: „*Die Hauptstadt Deutschlands ist ein Wort aus sechs Buchstaben*“

Seit der Antike sind mehrere Logikvarianten und -methoden (Entscheidungsregeln, Prüfungen der Wahrheit usw.) entwickelt worden. Die moderne *symbolische* Logik verwendet dabei statt der natürlichen auch *künstliche Sprachen*. Ein einfaches Beispiel für ein derartig formales System ist

⁹⁴ Lateinisch *discretion* Unterscheidungsvermögen, Urteil und Entscheid

⁹⁵ Lateinisch *digitus* Finger; zählen, ziffernmäßig, in ganzen Zahlen, vor allen in 0 und 1 angeben

⁹⁶ Lateinisch *quantitas* Größe, Anzahl; *quantum* wie viel, so viel wie, inwieweit, irgendwie. Usw.

⁹⁷ Der Begriff wurde 1948 von J. W. Tukey als kleinste Nachrichteneinheit „binäri digit“ eingeführt

⁹⁸ Lateinisch. Logica, Griechisch logike Wissenschaft des Denkens, logikós zur Vernunft gehörend, *logikè téchnē* denkende Kunst.

⁹⁹ Griechisch syllogismos von *syn* zusammen und *logizesthai* rechnen: das Zusammenrechnen.

die *Aussagenlogik*. Dabei werden sogenannte atomare Aussagen durch Buchstaben ersetzt. Dann wird untersucht, ob sie wiederum aus Aussagen zusammengesetzt sind, die durch Junktoren, wie „und“, „oder“, „nicht“ miteinander verbunden sind. Enthält eine Aussage keine durch Junktoren verbundene Teilaussage, dann ist atomar, also nicht weiter zerlegbar. Die *symbolische* Logik heißt auch *mathematische* oder *formale* Logik. Bei der *klassischen* Logik müssen folgende semantischen Bedingungen erfüllt sein:

1. Jede Aussage hat genau einen von zwei Wahrheitswerten, die meist als *wahr* und *falsch* bezeichnet werden (Bivalentprinzip).
2. Der Wahrheitswert einer zusammengesetzten Aussage ist eindeutig durch die Wahrheitswerte ihrer Teilaussagen und die Art, wie diese zusammengesetzt sind, bestimmt. (Extensionalität oder Kompositionalität)

Wesentlich ist dabei das Prinzip des ausgeschlossenen Dritten. Die neuere *formale* Logik widmet sich der Aufgabe, exakte Kriterien für die **Gültigkeit** von **Schlüssen** und **Aussagen** zu entwickeln. Semantisch gültige Aussagen heißen dann Tautologien, syntaktisch gültige Theoreme. Hierzu wurden verschiedene Verfahren entwickelt. U. a. zählen hierzu *Wahrheitstabellen* als vollständige Auflistung aller Wahrheitskombinationen und die *prädikatenlogischen Verfahren* gemäß einer Reductio ad absurdum.

Für weitere Details mögen die Hinweise auf den guten Überblick [Wiki9] sowie auf [Völ01] genügen. Erstaunlich ist es jedoch, dass bei den Logiken fast nie Definitionen, Klassifikationen und Axiomatiken (vgl. Bild 20 und [Völ17]) einbezogen werden. Allerdings prüfen sie ja auch nichts, sondern erzeugen vor allem Neues. Aber genau das sollte zuweilen mehr überprüft und eingeschätzt werden. Daher ist es kaum erstaunlich, dass hauptsächlich gefundene Widersprüche bekannt sind bzw. behandelt werden. Es gab allerdings auch Zeiten, in denen die Wissenschaft fest an den Determinismus glaubte und vor allem sinnvolle Anwendungen erreichen wollte. So sind etwa drei Erappen für die Widersprüche Wesentlich.

- In der *griechischen Antike* waren bereits die „klassischen“ Widersprüche (s. u.) bekannt, wurden aber im ersten Jahrtausend vergessen.
- Im *Mittelalter* wurden die klassischen Varianten wieder entdeckt und neu diskutiert. Es entstanden über 500 Paradoxie-Sammlungen. Vorherrschend waren aber formale Betrachtungen, wie: „Wann entsteht aus einzelnen Körnern ein Haufen? oder „Kann Gott als allmächtiges Wesen einen so schweren Stein erschaffen, dass er ihn nicht heben kann?“ Mit dem aufkommenden Rationalismus wurden alle erneut vergessen.
- Die *Neuzeit* beginnt etwa mit den vier Aporien von Kant bezüglich der Eigenschaften der Welt. Russel und Goedel reichten schließlich zwei entscheidende Höhepunkte (s. u.). Teilweise werden aber die Widersprüche in der Informatik und vor allem von der harten KI negiert.

Es folgen nun einige ausgewählte Beispiele:

Bereits Xenon von Elea (≈490 – ≈430 v. Chr.) entdeckte mehrere Paradoxien zur **Bewegung**. Ein Pfeil kann entweder fliegen und deshalb an keinem festen Ort sein, oder er ruht an einem Ort und fliegt dann nicht. Das demonstriert im **Bild 135** mit dem Schuss Tells auf den Apfelschuss auf dem Kpf des Sohnes. Noch bekannter ist der Wettlauf zwischen dem schnellsten Läufer *Achill* (griechisch Achilleus bzw. lateinisch Achilles) und dem langsamsten Tier, der *Schildkröte*. Zum Start erhält die Schildkröte deshalb einen Vorsprung. Aber wenn Achill diesen Ort erreicht hat, ist die Schildkröte bereits weiter und hat erneut einen Vorsprung. Das wiederholt sich fortlaufend. Zwar werden dabei die Abstände ständig kleiner und folgen auch kürzer aufeinander, aber im Prinzip kann Achill dabei die Schildkröte nie einholen. Deswegen führte Aristoteles aus Stagira (384 – 322 v. Chr.) das Kontinuum ein. Auf diese Zusammenhänge wird später noch einmal bei Bild ### eingegangen.

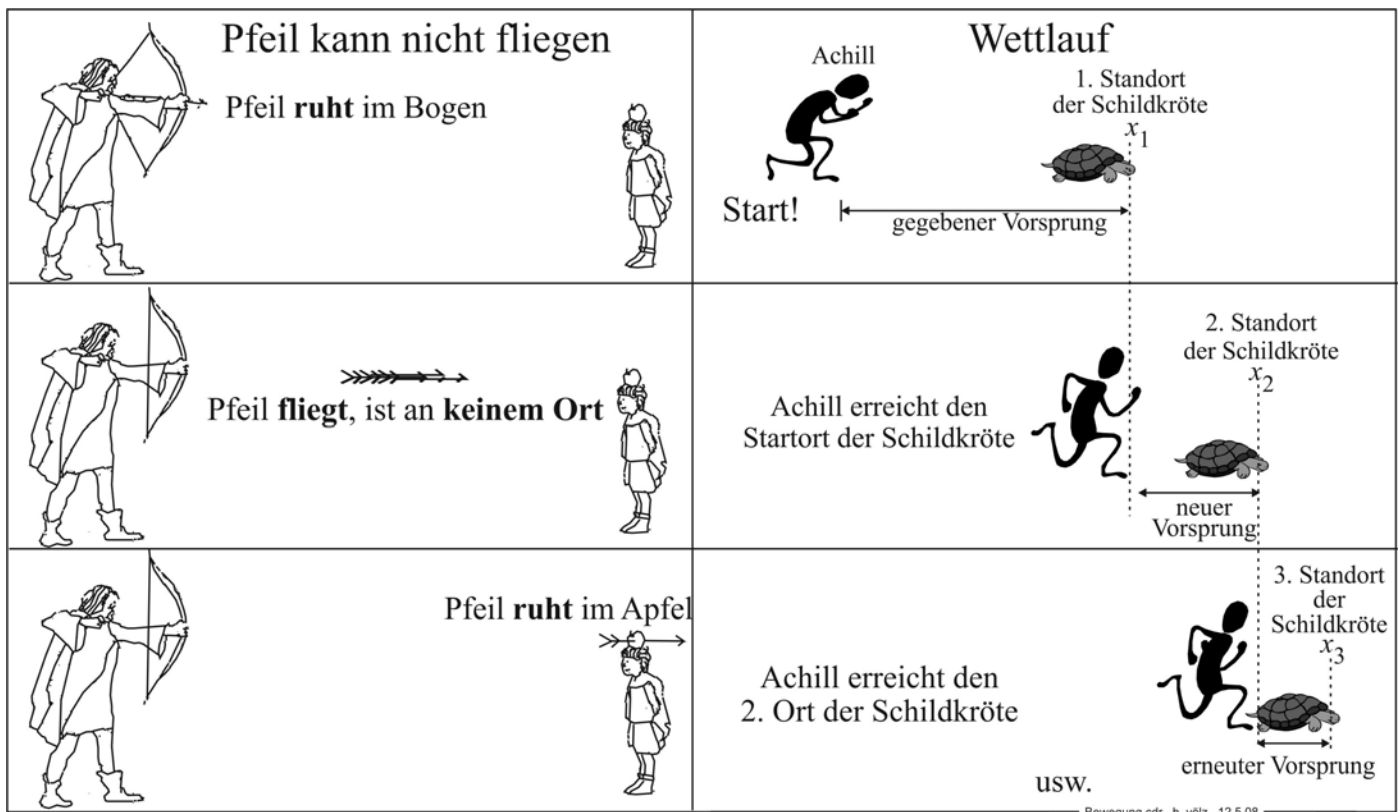


Bild 135. Bewegungsprobleme bei Tells Apfelszene und Wettlauf zwischen Achill und Schildkröte.

Der Priester **Epimendes** ist Kreter und behauptet „Alle Kreter lügen“. Was gültig ist, kann nicht entschieden werden. Aus der Antike stammt auch die Anwaltparadoxie: **Protagoras** nimmt kein Geld bei der Ausbildung seines Schülers Euathlus. Die Absprache lautet, dass er es nach dem ersten gewonnen Prozedd zu zahlen habe. Aber nach der Ausbildung führt Euathlus keine Prozesse. Da verklagt ihn Protagoras. Wie muss das Gericht entscheiden?

Typisch unentscheidbar ist auch der folgenden Text:

Die eingerahmte Aussage auf dieser Seite ist falsch.

In einer Kompanie gibt es einen Soldaten mit dem Beruf **Friseur**. Er erhält vom Kompaniechef den Befehl: „Ab morgen rasieren Sie alle, die sich nicht selbst rasieren!“ Damit er seine „Kundschaft“ kennt, muss die Kompanie antreten, alle Selbstrasierer müssen links raustreten. Das Problem wird am nächsten Morgen sichtbar. Was tut er mit sich selbst? a) rasiert er sich, so rasiert er einen, der sich selbst rasiert. Das darf er nicht! b) rasiert er sich nicht, so rasiert er einen nicht, der sich selbst nicht rasiert. Auch dies darf nicht sein!

In einer **Gerichtsverhandlung** antwortet der Angeklagte immer mit langen Ausführungen. Das stört den Richter. Ihm geht zuviel Zeit verloren. So sagt er schließlich: „Angeklagter auf jede Frage kann man kurz mit Ja oder Nein antworten. Ich fordere Sie auf, sich daran zu halten“. „Herr Richter, darf ich eine Frage stellen?“. Selbstsicher antwortet der Richter „Ja“. „Herr Richter, haben Sie aufgehört, Ihre Frau zu schlagen?“

Auch ein Scherz des Mathematikers Ernst Eduard **Kummer** (1810 - 1893) kann hier eingeordnet werden: „Meine Herren 120 ist teilbar durch 1, 2, 3, 4 und 5 ... Ich probiere weiter und finde, sie ist auch durch 6 teilbar; um nun ganz sicher zu gehen, versuche ich es noch mit der 8, mit der 10, mit der 12, und schliesslich auch mit 20 und 24. Wenn ich jetzt Physiker bin, dann sage ich: Es ist sicher, dass 120 durch alle Zahlen teilbar ist.“ Dies ist eine unzulässige Anwendung der vollständigen Induktion von n auf $n+1$.

In Cervantes Roman „Don Quijote“ taucht ein Fremder auf, der die folgende Empfehlung gibt: „Nehmen Sie den Rat keines Fremden an!“.

Schließlich noch die drei Gesetzen für die Roboterwelt von Isaak Asimov (1920 – 1992) [Asi82]:

- Ein Roboter soll ein menschliches Wesen nicht verletzen oder durch Untätigkeit zulassen, dass einem menschlichen Wesen Schaden zugefügt wird.
- Ein Roboter muss den Weisungen menschlicher Wesen gehorchen, ausgenommen ist der Fall, dass diese Weisungen dem ersten Gebot widersprechen.
- Ein Roboter muss seine eigene Existenz schützen, ausgenommen sind die Fälle, wo ein solcher Schutz dem ersten oder zweiten Gebot widerspricht.

Was muss der Roboter nun tun, wenn ein Mediziner bei einem Menschen eine Op. vornehmen muss?

Durch einen Widerspruchshinweis von George W. Russell (1867 – 1935) war besonders hart Gottlob Frege (1848–1925) betroffen. Hatte er doch gerade seine „Grundgesetze zur Arithmetik“ beendet. Daher teilte er im Nachwort mit (Jena 1893 Bd. II S. 253) [Fre79]:

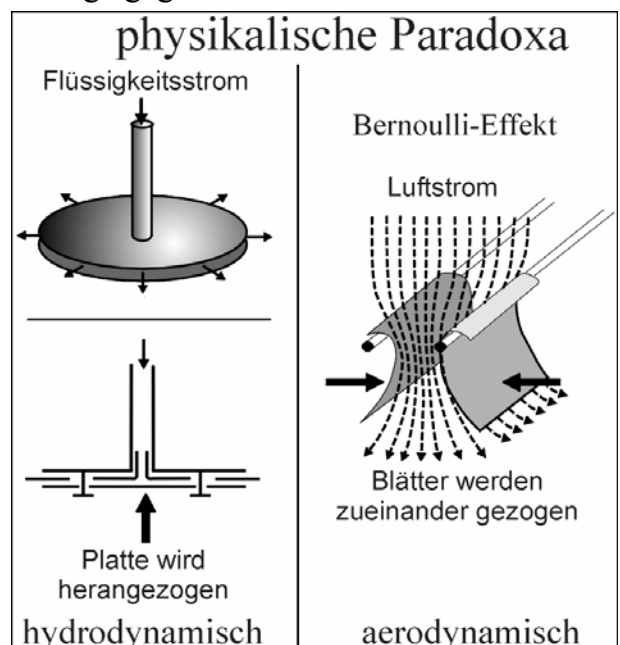
„Einem wissenschaftlichen Schriftsteller kann kaum etwas Unerwünschteres begegnen, als daß ihm nach Vollendung einer Arbeit eine der Grundlagen seines Baues erschüttert wird....In diese Lage wurde ich durch einen Brief des Herrn Bertrand Russel versetzt, als der Druck dieses Bandes sich seinem Ende näherte ... Solatium (sic!) miseres, socius habuisse molarum. Dieser Trost, wenn es einer ist, steht auch mir zur Seite; denn alle, die von Begriffumfängen, Klassen, Mengen in ihren Beweisen Gebrauch gemacht haben, sind in derselben Lage. Es handelt sich hierbei nicht um meine Begründungsweise im Besonderen, sondern um die Möglichkeit einer logischen Begründung der Arithmetik überhaupt.“

Die stärkste Auswirkung trat aber kurz danach ein, als David **Hilbert** (1862 - 1943) auf dem Mathematik-Kongress von 1900 noch die vollständige Axiomatisierung aller mathematischen Theorien gefordert hatte. Denn bereits im Sommer 1930 legte der damals 24-jährige, promovierte Kurt **Gödel** (1906 - 1978) den von ihm bewiesenen **Unvollständigkeitssatz** vor. Danach kann es keine Theorie geben, welche selbst die elementare Arithmetik umfasst und für sie entsprechenden Eigenschaften beweisbar sind.

Also gilt etwa: Ständig traten und treten neue Widersprüche auf. Sie sind heute in mehreren Büchern zusammengefasst und teilen sie teilweise auch systematisch ein: [Ber05], [Fal88], [Hem18], [Lev17] und [Völ01]. Je nach Art, Inhalt und Autor werden für die Widersprüche unterschiedliche Bezeichnungen benutzt. Alphabetisch geordnet gilt etwa:

- **Antinomie:** griech. latein.: *anti* dagegen, entgegen, griech: *nemein* (*nomie*): ordnungsgemäß. aus-, ver-, zuteilen, lenken, leiten, verwalten. Also Aussage gegen das Gesetz
- **Aporie:** griech. *aporia* Ausweglosigkeit, Schwierigkeit. Kaum noch gebräuchlich.
- **Dilemma:** griech. *di* zweifach, **lemma** Annahme, Hilfssatz, Prämisse; Etwa Entscheidungszwang, Es wird auch als Fangschluss der griechischen Logik bezeichnet. Jemand wird zwischen zwei gleichwerige Behauptungen usw. gezwungen. Er muss sich ohne Grund entscheiden. In deutschen Texten als Buridians Esel bekannt.
- **Paradoxie:** griech. *para*’, ‘*doxos*’ jenseits des Glaubens.
- **Trilemma:** griech. *tri* drei (Auswahlen), selten benutzt: Münchhausen-Trilemma.

Physikalische Paradoxa sind ziemlich anderer Art (Bild rechts). Sie widersprechen der unmittelbaren



Erwartung. Beim *hydrostatischen* Paradoxon ist der statische Druck in der Verengung deutlich geringer, obwohl gefühlsmäßig hier ja die Flüssigkeit zusammengepresst wird und damit stärker gegen die Wand drücken sollte. Beim *hydro-* und *aerodynamischen Paradoxon* sollte die bewegte Flüssigkeit bzw. Luft die beiden gegenüberstehenden Flächen auseinander drücken. Sie werden aber bis auf einen recht kleinen Abstand zusammengezogen.

Eine unmittelbar einsichtige Einteilung zeigt **Bild 136** aus [Völ01].

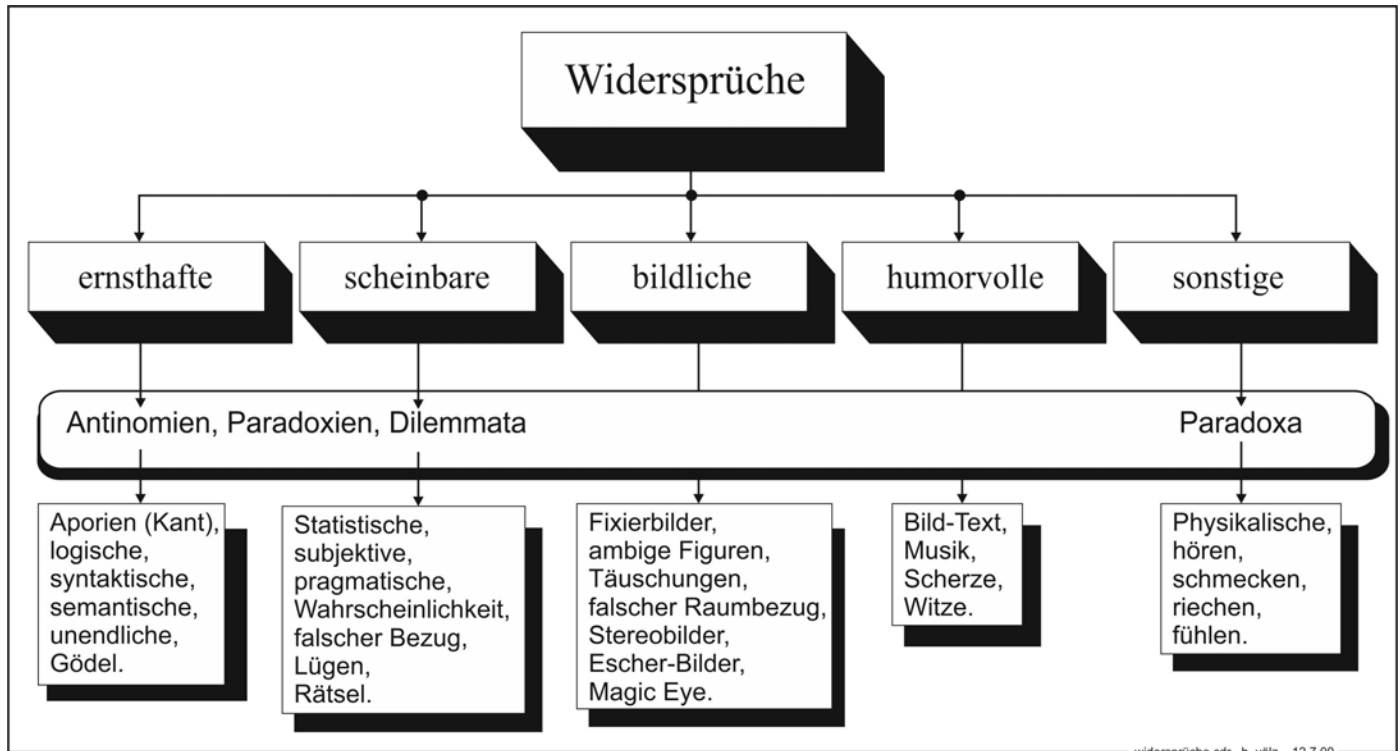


Bild 136. Versuch einer Einteilung von logischen Widersprüchen.

Obwohl es nur relativ wenig hinreichend bestimmte Ursachen für die Widersprüche gibt, ist es schwierig, eine gute Liste aufzustellen. Ein erster Versuch mit stichwortartigen Hinweisen auf die obigen Beispiele könnte etwa so lauten.

- *Binäre Entscheidungen*: Buridins Esel, Richter verlangt, Im *Folgenden* noch genauer behandelt.
- *Rück-, Selbstbezüglich*: Alle Kreter lügen, Cervantes, eingerahmter Text, später noch Fraktale.
- *Vollständige Induktion* von $n > n+1$, Zitat Kummer,
- *Zeit-, Folge-Antinomien*: Wettlauf Achill - Schildkröte. Sokrates ist sterblich.
- *Unendlichkeits-Paradoxien*: Hilbert Hotel.
- *Statistische Antinomien*: Bei 24 Personen haben mit 50 % Wahrscheinlichkeit zwei am gleichen Tag Geburtstag.
- *mathematische* und *logische* Paradoxien; Gödel
- *Bildliche* Antinomien: Umschlagbilder, mangelhafte Perspektiven Escher-Bilder.
- Physikalische Paradoxa

7.4. Von Binär über Fehler bis Zufall

Es gibt nur Ja oder Nein, wahr oder falsch, 0 oder 1, (auch nur rot oder grün!?) Es gibt aber auch: „sowohl - als auch“, „weder - noch“ usw. Ja selbst in der Boole'schen Algebra und der binären Logik gibt es mehrere Varianten, Ein Schalter kann „ein“ oder „aus“ sein. Aber bereits zwei Schalter realisieren die 5 verschiedenen Zustände von **Bild 137**. Dieser „Widerspruch“ löst sich dadurch auf, dass es bei vielen Aussagen – wie bereits im Abschnitt 7.1 gezeigt – auch hier jegliche Definition der Bezugsmenge fehlt. Dafür kann sogar die Bibel leicht geändert zitiert werden (Lukas 23:34 „Jesus aber sprach....“: „*verzeih ihnen, denn sie wissen nicht wovon sie reden!*“

kombinatorische Schaltungen voll reversibel					
YES (on)			leuchtet = ein		
NOT (off)			ist aus		
AND			bei beiden ein		
OR			bei einer oder beiden ein		
NAND			bei beiden aus		
NOR			bei mindestens einen aus		
XOR			bei nur einem ein		

Kombination.cdr h. völk 16.8.05/2012

Bild 137. Die möglichen Zustände bei einem oder zwei Schaltern Werte für jeweils **rot gedrückt**..

Analog zu den Schaltern können auch die Pegel der Digitaltechnik betrachtet werden. Wie alle elektrischen Signale, Werte usw. sind sie auch immer von Störungen überlagert, die nur selten sehr gering sind. Zumindest tritt immer das thermischen (Widerstands-) Rauschen auf. Es entsteht durch die statistische, thermodynamisch hervorgerufene Bewegung der Ladungsträger (Elektronen). Es ist vorwiegend breitbandig „weiß“. Mit der Boltzmann-Konstanten $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/grd}$, der Bandbreite B und der absoluten Temperatur T gilt für ihre Rauschleistung

$$P_r = k \cdot T \cdot B.$$

An einem Arbeitswiderstand R entsteht so die gemittelte Rausch-Spannung

$$\bar{U}_r = \sqrt{P_r \cdot R} = \sqrt{k \cdot T \cdot B \cdot R}.$$

Doch es gibt viele weitere Störungen, wobei die wesentlichen in **Bild 138** zusammengefasst sind. Doch leider ist das Bild bereits vor etwa fünfzig Jahren gewonnen. Daher dürften inzwischen die „Zivilisationsstörungen“, vor allem durch das Fernsehen, die Telefonnetze und Industrieanwendungen, erheblich zugenommen haben. Als Folge müssen fast immer Störungen durch Abschirmung, Kompensation usw. deutlich verringert werden. Dennoch bleibt letztlich jedes einzelne Signal entsprechend einer Gauß-Verteilung (vgl. Bild 13) gestört. Als Folge überlappen sich oft zwei benachbarte Signale ähnlich wie es Bild 133 zeigt. Deshalb werden bei der Anwendung das 0- und das 1-Signal durch je einen Spannungsbereich festgelegt. Für die klassische TTL-Technik (**T**ransistor **T**ransistor **L**ogik) gilt die Mitte von **Bild 139a** (gelb unterlegt). Zur höheren Sicherheit werden sogar die Signale für den Ein- und Ausgang unterschieden. Der linke, grau unterlegte Teil zeigt die kontinuierlichen Eingangspegel. Die beiden schwarzen „Schwänze“ können durch Signalbegrenzungen unwirksam gemacht werden. Jedoch der rot gezeichnete Mittelteil ist „verboten“,

kann daher fehlerhafte Interpretationen hervorrufen. Das tritt selbst dann ein, wenn zu dieser Zeit erst gar kein „TTL-Signal“ entsteht. Aus den vorhandenen TTL-Pegeln soll wieder oft ein kontinuierliches Ausgangssignal erzeugt werden. Dazu werden die Pegelbereiche weiter eingengt. Bei deren Übertragung, Anwendung treten dann aber erneut Störungen auf (rechts grau). Auch hier können die schwarzen Schwänze begrenzt werden. Jedoch die roten erzeugen erneut Fehler.

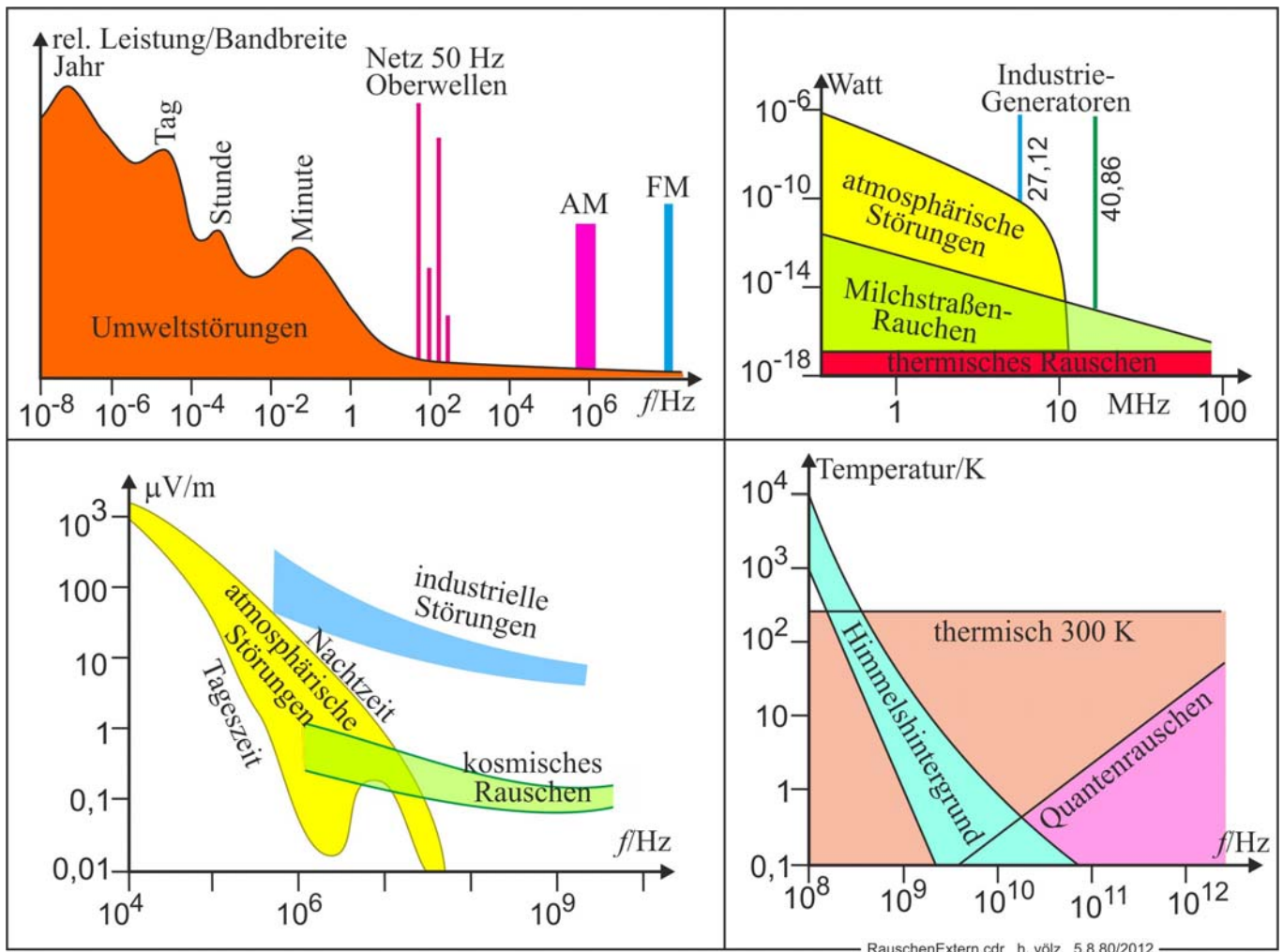


Bild 138. Überblick zu den verschiedenen Signalstörungen.

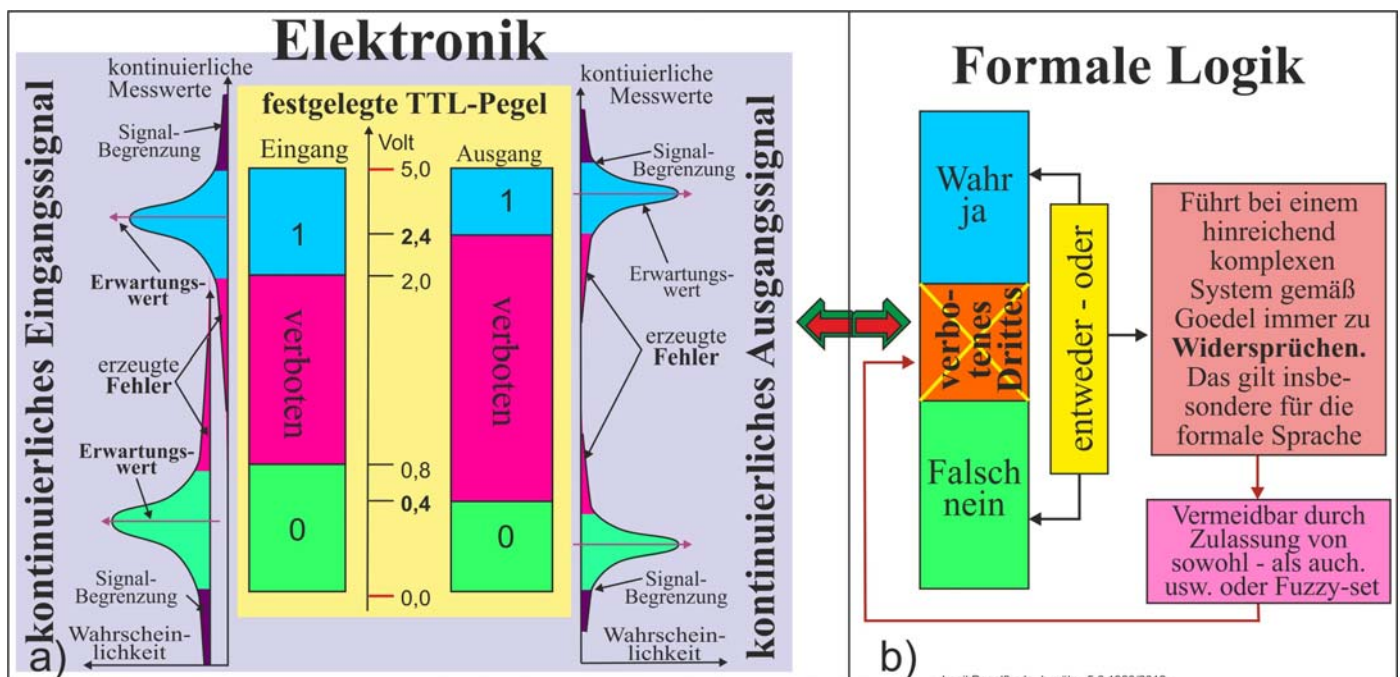


Bild 139. Störungen bei TTL-Pegeln (a) und ausgeschlossenes Drittes bei der Logik (b)

Weiter wird in Bild 139 ein Vergleich zwischen der binären Technik und der zweiwertigen Logik angestrebt. So entspricht das verbotene Dritte recht weitgehend den Störungen der TTL-Technik. Dadurch wird noch einmal deutlich, dass in beiden Fällen genau die Festlegungen und Ziele vor der Anwendung zu festzulegen sind.

Eine zusätzliche Möglichkeit bietet hierzu die 1965 von Lotfi Zadeh (1921 – 2017) entwickelte Theorie der *unscharfen Mengen*, die aber eher als **Fuzzylogik**¹⁰⁰ bekannt ist. Im Alltag werden nämlich häufig recht ungenaue Begriffe, wie kühl, warm, heiß, hoher Druck; verkehrsgünstige Lage, hohe Wohnqualität, schöne Frau, attraktiver Mann usw. benutzt. Davon könnten kühl bis heiß noch näherungsweise durch Temperaturbereiche erfasst werden, die anderen aber nicht einmal ähnlich. Dagegen fällt es auf, dass Stubenfliegen höchst komplizierte Flugmanöver durchführen. Dabei rechnen sie aber nicht, sondern nutzen wahrscheinlich mehrere unscharfe Möglichkeiten. Das regte Lotfi zu ähnlichen automatischen Verfahrensabläufen, zu seiner Fuzzysteuerung an. Solche Abläufe mussten vorher wegen ihrer Komplexität manuell überwacht und geregelt werden. Ins umgangssprachliche übersetzt könnte auf ähnliche Weise ein attraktiver Mann durch normalgewichtig, groß, charmant, potent, gutsituiert usw. beschrieben werden. Dabei kann ein einzelner recht geringer Wert durch einen anderen größeren ausgeglichen werden. Genauer werden so für jede Eigenschaft Prozentbereiche festgelegt.

7.5. Zufall und Fehlerrate

Die Aussagen und der Vergleich in Bild 139 machen auch deutlich, dass hauptsächlich der Zufall die Störungen bewirkt und auch bei der Fuzzilogik wesentlich ist. Unter anderem entstehen so bei den Übertragungen und Speicherungen die Fehlraten. Deshalb muss hier zunächst der Zufall genauer erfasst werden. Der übergeordnete Inhalt betrifft **Zusammenhänge** zwischen mehreren Inhalten. Dabei können die drei Klassen gemäß **Bild 140** unterschieden werden: **Abstrakte** Zusammenhänge existieren nicht in der Realität. Sie werden vom Menschen u. a. durch Begriffe, Klassenbildungen und Definitionen erzeugt. So gehören zum Kernobst Äpfel und Birnen. **Örtlich** (ortabhängig) sind sie in der Realität irgendwie meist fix vorhanden, so hat die Kugel eine Oberfläche und ein Land die Grenze. Sie bestimmen also oft Objekte und können teilweise gesehen, gefühlt, ertastet und oft sogar gemessen werden. Folglich sind für den weiteren Text nur die **zeitlichen** Zusammenhänge von Belang. Sie entstehen durch *Veränderungen* in der Realität hervorgerufen. Gemäß Bild 34 erzeugen sie mittelbar die Zeit. Sie treten ähnlich auch bei Denken auf. Für sie gibt es den vergangenen Zustand Z_V , der zum Vergleich gespeichert werden muss und den aktuellen Z_A . Auch ein zukünftiger ist vorstellbar Z_Z . Die zeitlichen Zusammenhänge folgen aus den möglichen Übergängen zwischen den Zuständen von $Z_V \rightarrow Z_A$ oder von $Z_A \rightarrow Z_Z$. Sie geschehen oder können im Experiment bewirkt werden. Wenn immer wieder diese Übergänge beobachtet werden, dann liegt ein *eindeutiger Ursache-Wirkungs-Zusammenhang* vor. Das geschieht relativ oft in der Natur, wie bei der Gravitation, Elektrodynamik usw. Das gilt sogar weitgehend für die klassische Physik und bestimmt den **Determinismus**¹⁰¹. Die hierfür ältere Einordnung beim Rationalismus zeigt (c). Wenn derartige Aussagen sicherer erfolgen und hierfür eine eindeutige *Ursachen* gefunden wurden, dann kann das zu einem **Gesetz** führen, das jedoch meist mathematisch formuliert wird. Ob jedoch der Zusammenhang oder das Gesetz immer gültig ist, kann nicht endgültig geklärt werden. Denn das wäre eine All-Aussage (ungültig: s. S. 150). Auch aus diesem Grunde kann es den Laplace'schen Dämon nicht geben, siehe Bild 19 und die dazugehörige Tabelle.

Die meisten Menschen haben jedoch ein und dieselbe Erscheinung (Vorgang usw.) schon recht oft gleichbleibend erlebt, Daher glauben sie, dass sie immer auftreten wird. Dass bewirkt ihren Glauben an die **Kausalität**¹⁰². Sie sind dann sehr verwundert, wenn es einmal nicht geschieht. Nicht wenige nehmen dann an, dass es so etwas, wie höhere Wesen, Geister usw. gibt, die es genau dieses

¹⁰⁰ Das englische Adjektiv *fuzzy* so viel wie fusselig, verschwommen, unscharf.

¹⁰¹ Lateinisch *determinare* begrenzen, bestimmen.

¹⁰² Lateinisch *causalis* ursächlich; *causa* Ursache

Mal so gewollt haben und die auch genau wissen warum sie es so bewirkt haben, vgl dazu Zukunftsversprechen wie Himmereich, Hölle usw.

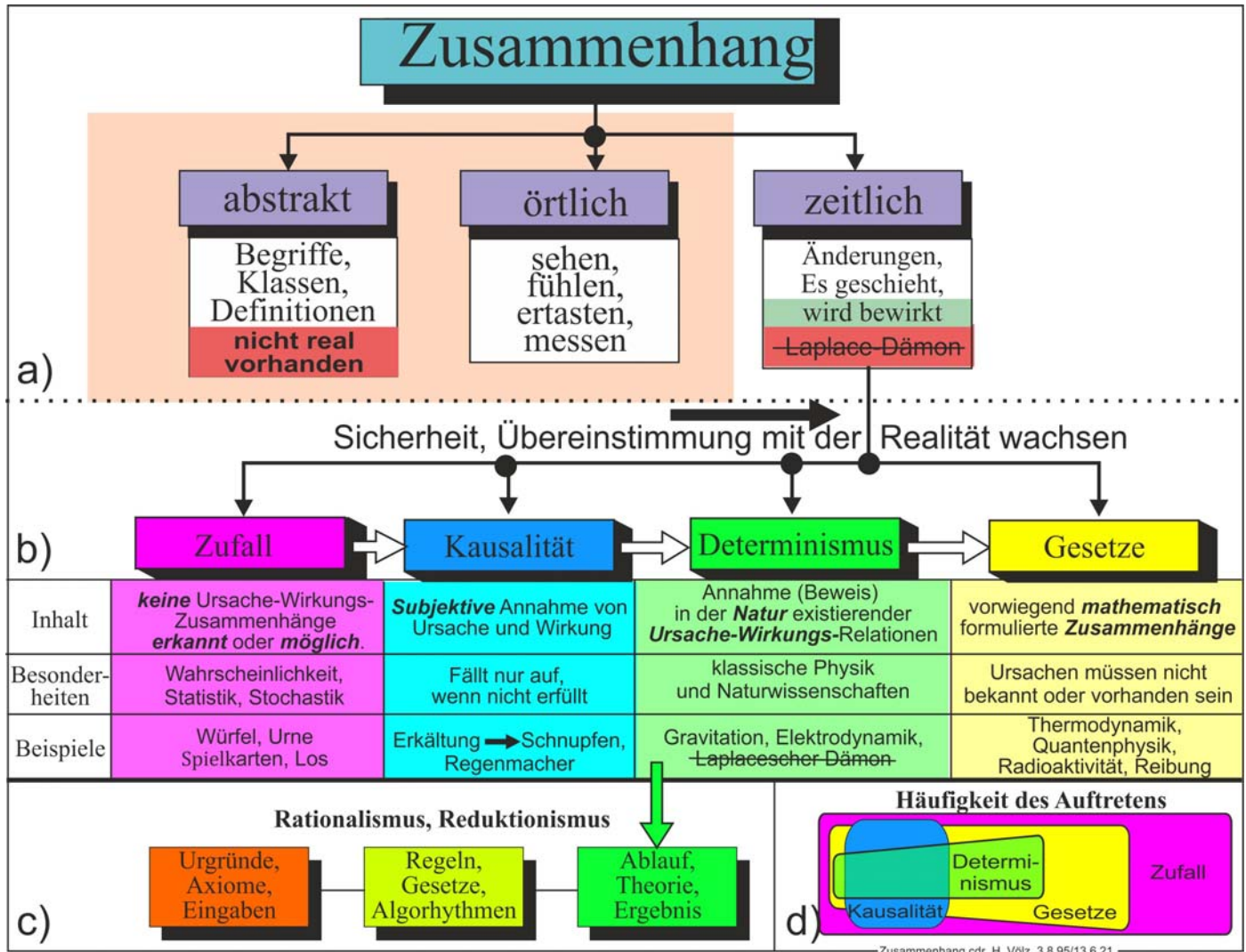


Bild 140. Überblick zu den Zusammenhängen von Gesetz bis Zufall.

Recht komplizierte Zusammenhänge existieren beim **Zufall** (Bild 142 umseitig). Schon die Ägypter und Griechen benutzten ihn u. a. bei individuellen und kollektiven Spielen. Doch seine Ergebnisse wurden meist nur als Zeichen (Orakel) höherer Macht begriffen. Erst mit dem Beginn von Versicherungen, Spielkasinos und nicht zuletzt der Thermodynamik wird der Zufall ernsthaft einbezogen und wird dann sogar teilweise berechenbar. Einen sehr extremen Durchbruch des Zufalls erzwingt aber erst die Quantentheorie (s. u.).

Schon lange werden mehrere *Arten von Zufall* unterschieden. Im vielen Fällen sind seine Ursachen recht genau bis exakt bekannt. Zuweilen entsteht er aber auch bei deterministischen Zusammenhängen und zwar dann, wenn einige Ursachen unbekannt sind, also quasi *verdeckte Parameter* existieren. Dann tritt meist eine Gauß-Verteilung der Messwerte auf. Bei der Quantentheorie gilt der *absolute Zufall*, für den es keine Ursache gibt (geben kann, s. u.).

Der Zufall bestimmt weitgehend die **Wahrscheinlichkeit** der eintretenden Ereignisse, Zustände usw. Dabei sind mehrere Arten zu unterscheiden. Die **objektive** Wahrscheinlichkeit entspricht dem realen Auftreten. Sie ist auch unabhängig von ihrem Eintreten vorhanden und daher im Voraus theoretisch und durch umfangreiche Messungen näherungsweise zu bestimmen, ist also *apriori* vorhanden. Für eine vorliegende Anzahl von Ereignissen kann die Wahrscheinlichkeit stets im Nachhinein *a posteriori* ermittelt werden. Sie ist daher eigentlich eine **Häufigkeit**.

Die *subjektive* Wahrscheinlichkeit ist eine individuell vermutete Wahrscheinlichkeit, die dadurch erheblich von der objektiven abweichen kann. Leider existieren hierfür nur wenige Ergebnisse, die in

Bild 141 zusammengestellt sind. Bei der idealen Linie sind die subjektive und objektive Wahrscheinlichkeit gleich. Die rote Kurve entspricht dem Verlauf der Auffälligkeit von Bild 150a. Bekannt sind die drei, durch farbige Pfeile angedeuteten Messungen in den Jahren 1943 bis 1956 für nur recht kleine Wahrscheinlichkeiten. Umfangreicher sind die Messungen von Helmar Frank. Er ließ hierfür Texte laut lesen und fragte nachher und unvorbereitet die vermuteten Silbenzahlen der Wörter ab. Das Ergebnis stimmt mit Ausnahme der einsilbigen Wörter recht gut mit der roten Auffälligkeitskurve überein [Fra69]. Dadurch ist eine allgemein gut bekannte Regel experimentell bestimmt: Kleine Wahrscheinlichkeiten werden immer deutlich zu groß geschätzt, große dagegen zu klein. Das ist ein wesentlicher Grund für die „Spielhöllen“ und bei Lottospielen, wo immer zu häufig Gewinne vermutet werden (vgl. Risiko [Bon95]).

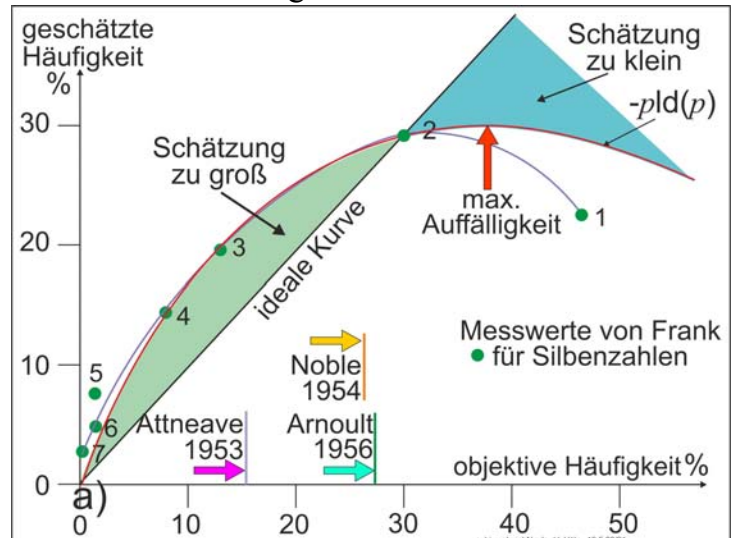


Bild 141. Ergebnisse zur subjektiven Wahrscheinlichkeit.

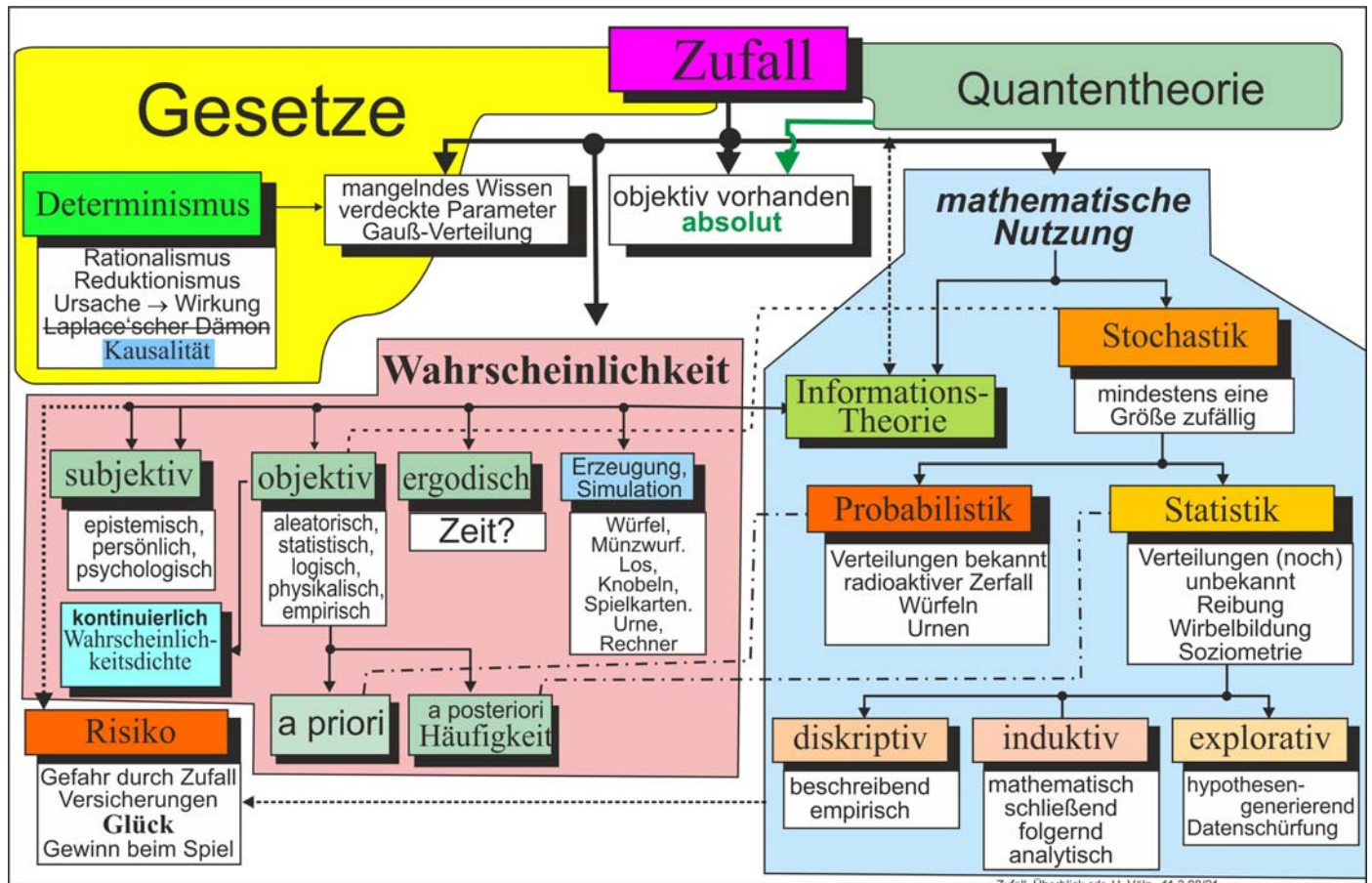


Bild 142. Zusammenhänge beim Zufall

Schließlich ist auch möglich, dass sich die Eigenschaften der Wahrscheinlichkeit mit der Zeit ändern, dann ist er *nicht ergodisch*. Das liegt z. B. bei jeder individuell benutzten Sprache vor.

Für einige Anwendungen ist es auch notwendig, den **Zufall absichtlich zu erzeugen**. Die hierfür entstanden Varianten sind im wesentlichen

- **Objekte, Geräte:** Würfel, Münzen, Karten, Lose, Urnen, Lose ziehen, Roulette, Knobeln.
- **Effekte:** Thermisches Rauschen von Widerständen, Dioden usw. aber Quanteneffekte werden kaum angewendet.

- **Zufallstabellen:** Haben keine Bedeutung mehr, sind durch Formeln ersetzt.
- **Algorithmisch, Rechentechnisch:** Zeittakt auswählen; Spezielle Formeln, ermöglichen aber nur Pseudo-Zufall-

Im letzten Fall kann zufällig die letzte Stelle der aktuellen Taktzahl herangezogen werden. Weiter gibt es Formeln zur Berechnung. Dabei entsteht jedoch nur ein Pseudozufall, bei dem sich die erzeugten Zufallszahlen nach einer bestimmten Werteanzahl periodisch wiederholen. Ein extrem einfaches Beispiel zeigt **Bild 143**.

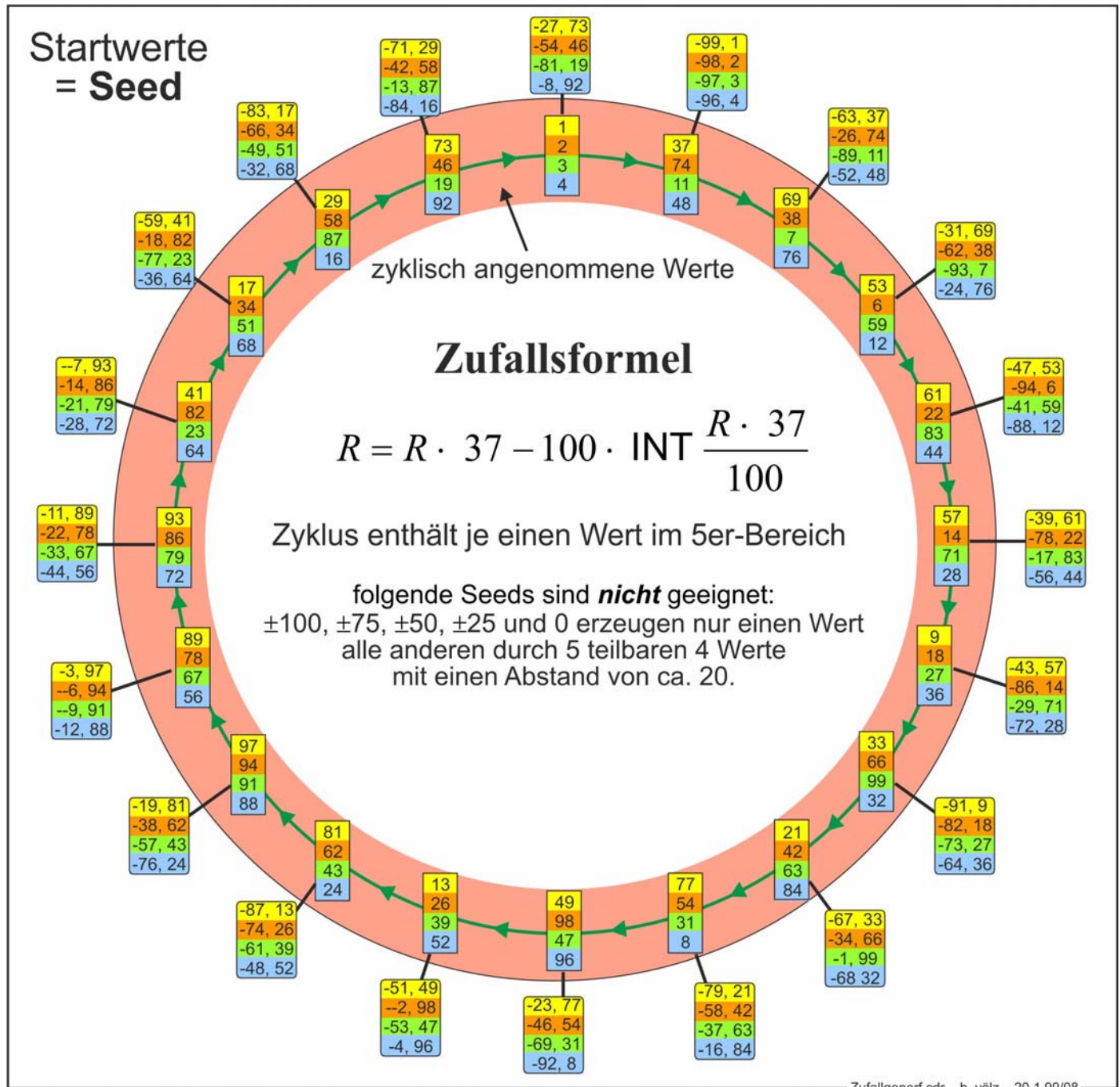


Bild 143. Sehr einfaches Beispiel für einen Zufallsgenerator.

Bei den mathematischen Anwendungen des Zufalls sind die folgenden Varianten zu unterscheiden. (Vgl. die Anordnung auf blauem Grund in Bild 142)

Deterministisch Die Ausgangsgrößen sind nur durch Ursachen bewirkt z. B. $x = v \cdot t$	Stochastisch Wenigsten eine Größe ist zufällig z. B. Teilchen der Brownschen Molekularbewegung Andererseits gelten Gesetze für viele Teilchen, z. B. $p \cdot v = \text{const.}$	
	Probabilistisch Verteilungen sind bekannt, z. B.: • Radiaktivität • Würfelspiel • Molekulargeschwindigkeit	Statistisch Verteilungen sind (noch) unbekannt, z. B.: • Reibung • Wirbelbildung

Die Wahrscheinlichkeit von Aussagen hängt weitgehend mit auftretenden Fehlern zusammen. Dabei ist die **Fehlerrate** der relative Anteil der Fehler bezüglich aller dazugehörenden Aussagen. Bei der Übertragung und Speicherung ist sie nie Null und kann mittels Fehlerkorrektur gesenkt aber nie zu Null werden. Außerdem wird selbst bei sehr stark ausgeprägtem Determinismus und Gesetzen immer eine gewisse, wenn zuweilen auch sehr kleine Fehlerrate auftreten. Teilweise ist sie sogar notwendig und nützlich. So ist erst durch sie eine Evolution möglich. In der Biologie beträgt sie bei der Zellteilung etwa 10^{-4} und bewirkt dadurch Mutationen und neue Arten. Wahrscheinlich ist so sogar nur Neues möglich. Meist wächst die Komplexität. Natürlich entsteht dabei (aus menschlicher Sicht) Vorteilhaftes und Schädliches. So gilt die Aussage: Alles lebt vom Lebendigen. Daraus folgt leider auch, dass der Mensch von den anderen Menschen lebt und Neues Wissen kann nur aus dem alten entstehen (s. Tabelle zur Evolution der Speicher S. 27). So müssen wir uns damit abfinden, dass alles Wissen mit einer gewissen, aber oft gut kalkulierbaren Unsicherheit behaftet ist. Auch unser freier Willen ist hiervon betroffen, s. [Pla29], [Pla36], [Pla38], [Pla 42], [Mar81].

Sehr kleine Fehlerraten werden insbesondere in der Technik schnell gefordert, sind aber nur schwer herzustellen und äußerst zeitaufwendig zu messen. Wie dem auszuweichen ist, zeigte sich bei unserer Entwicklung des Kosmosspeicher für die internationale Mission zum Marsmond Phobos 1980. Es wurde eine Fehlerrate von 10^{-12} gefordert. Die Messungen dafür hätten Monate gedauert und so gab es umfangreiche und langwierige Diskussionen. Dem setzte mein junger Entwickler für die Elektronik Horst Voigt raffiniert ein Ende. Er verpflichtet sich für seinen Teil die Forderung erfüllen, verlange aber, dass die Fordernden das notwendige Messgerät liefern.

7.6 Quantentheorie und Urknall

Der sechzehnjährige Max Planck (1858 – 1947) fragte 1874 nach seinem Abitur den Physiker Philipp Jolly (1809 – 1884), ob er Physik studieren solle, und erhielt den Rat: „*Studieren Sie ja nicht Physik. Das ist ein Gebiet, in dem alles Wesentliche erforscht ist, nur einige unbedeutende Lücken sind noch zu füllen*“. Damals wurde alles mit kontinuierlichen Differentialgleichungen beschrieben. Probleme gab es vor allem noch für die Strahlung des sogenannten Schwarzen Körpers. Das ist ein kugelförmiger aufheizbarer Hohlkörper, der Innen vollständig mit Russ geschwärzt ist und nur ein kleines Loch besitzt. Bei Zimmertemperatur erscheint das Loch tiefschwarz (schwärzer als der beste Samt), denn alles eintretende Licht wird innen vollständig absorbiert. Wird er aufgeheizt, so emittiert er je nach Temperatur sein typisches Strahlungsspektrum. Bis 1900 waren dafür nur die beiden Näherungsformeln von John Rayleigh (1842 – 1919) und Max Wien (1866 – 1938) Wien bekannt (nebenstehend). Sie gelten aber nur für stark eingeschränkte Frequenzbereiche. In den Formeln bedeuten ν Lichtfrequenz, T absolute Temperatur, h Plancksche Konstante, c Lichtgeschwindigkeit und k Boltzmann-Konstante. Nach sehr intensiver Arbeit fand Planck, wie er es selber ausdrückte, „mit einem Akt der Verzweif-

Raleigh-Jeans-Gesetz $\rho(\nu, T) \cdot d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k \cdot T \cdot d\nu.$ Wiensches Verschiebungsgesetz $\rho(\nu, T) \cdot d\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \cdot e^{-h\nu/kT} d\nu.$ Plancksche Strahlungsformel $\rho(\nu, T) \cdot d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu.$
--

lung“, die voll gültige Strahlungsformel. Sie unterscheidet sich nur in den rot bzw. grün gekennzeichneten Teilen von den älteren. Vorher wurde noch angenommen, dass die Energie grundsätzlich ein Kontinuum von Werten annehmen kann. Doch sein Ergebnis verlangte nun völlig unerwartet, dass diskrete Energiequanten $E = h \cdot \nu$ erforderlich sind (Einstein (1879 – 1955) benannte sie später Photonen) und das verlangt sofort eine diskret gequantelte Physik. Plancks Vortrag hierzu fand am 14.12.1900 in der Physikalischen Gesellschaft Berlin statt und gilt noch heute als der Anfang der neuen Physikära. Viel später folgte er, dass mit $E = h \cdot \nu$ **zwei Größen** sehr unterschiedlicher Natur verknüpft werden, nämlich *Energie und Schwingungszahl*. Dadurch werden der klassische **Massenpunkt** und die **Lokalität** unbrauchbar. Heisenberg fügte bald die **Unschärferelation** und Max Born (1882 – 1970) das **Atommodell** sowie weitere Konsequenzen hinzu. Weitere Details in [Bru99], [Lyr98].

Für alle Strahlungsspektren entwickelte dann Werner Heisenberg (1901 – 1976) 1925 die **Matrizenrechnung**. Nachdem Louis-Victor de Broglie (1892 – 1987) die Hypothese der **Materiewellen** vorgestellt hatte, schuf dann Erwin Schrödinger (1887 – 1961) die zur Matrizenrechnung gleichwertige **Wellen-Gleichung**

$$\nabla \psi = (W - U) \cdot \psi \cdot \frac{2 \cdot m}{h^2} .$$

Darin bedeuten W die Gesamtenergie, U die potentielle Energie, ψ die Wellenfunktion und ∇ (sprich Nabla) den Operator der zweifachen partiellen Ableitung nach den Raumkoordinaten

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} .$$

Real auftretende Materiewellen wurden jedoch erst deutlich später gefunden. Als Folge entstand das Doppelbild von Welle und (*statt oder*) Teilchen. Daraufhin schuf Bohr das **Komplementaritäts-**bzw. **Korrespondenzprinzip**. 1927 interpretiert er die Wellenfunktion als Bewegung der Teilchen und das Betragsquadrat der Zustandsfunktion als ihre **Aufenthalts-Wahrscheinlichkeit** im Volumen V :

$$dW = |\psi|^2 \cdot dV .$$

Doch diese **Wahrscheinlichkeit** unterscheidet sich deutlich von ihrer klassischen Variante (s. oben), welche zumindest theoretisch deterministische Zusammenhänge voraussetzt, selbst wenn sie auch teilweise kein oder nur mangelhaftes Wissen enthält. Die quantenphysikalische ist dagegen **absolut**. Denn für ihr Eintreten existieren grundsätzlich keine Ursachen. Wann und weshalb ein Atom durch die Radioaktivität zerfällt, ist prinzipiell nicht ermittelbar. Das bedeutet jedoch kein Nichtwissen. Sie stellt einfach alles dar, was wir über das Quantensystem wissen können, aber z. T. nicht erfahren werden. So beschreibt die Wellenfunktion ψ nicht den Zustand eines Quantenobjekts, sondern gibt nur die Wahrscheinlichkeit dafür an, was bei einer makroskopischen Messung des Objekts erhalten werden kann. Elektronenbahnen und Schalen existieren real nicht mehr. Die Elektronen befinden sich im Raum um den Atomkern mit unterschiedlicher Ortswahrscheinlichkeit. Das führt zu den Orbitalen, die inzwischen für die Chemie unentbehrlich wurden.. Die Schalen, in denen sich die Elektronen bewegen, sind so gesehen nur abstrakte Mittelwerte. Es gelten das Bändermodell der Halbleiter, der Tunneleffekt und die Supraleitung. Es gibt eben nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen und unser Alltag ist die wahrscheinlichste aller Welten. Dennoch ist die Quantenphysik sehr genau gültig und es gibt immer nur einen *einzigsten* Weltverlauf.

Auf diesen Grundlagen entstand wohl Einsteins etwas legiere Aussage: „Der Alte würfelt nicht“. Das hat mehreren Karikaturisten Bilder entlockt. Die drei im umseitigen **Bild 144** habe ich aufgehoben und zusammengefasst, aber leider gingen mir im Laufe der Zeit die Autornamen verloren. Dafür bitte ich um Entschuldigung.

Inzwischen gibt es einige Anwendungen der Quantenphysik z. B. die Kryptografie, aber der erwartete Quantencomputer steht immer noch aus.



Bild 144.
Wie Ein-
stein Gott
annimmt.

Für die Quantenberechnungen wird heute fast immer die Wellengleichung von Schrödinger benutzt. Sie ist wesentlich einfacher zu handhaben als die Matrizenmechanik. Einen deutlich anderen Weg schuf 1958 Paul Dirac (1902 – 1984) mit einer eleganten, aber stark abstrakten Schreibweise. Sie benutzt einen komplexen Wert $\xi = a + b \cdot i$ mit $i = \sqrt{-1}$. Für die Zeile der Matrix wird $\langle \xi |$ (gesprochen *bra*) und für die Spalte $|\xi\rangle$ (*ket*) eingeführt. Recht übersichtlich ist sie für die einfachsten quantenphysikalischen Systeme mit nur zwei orthogonalen Zuständen, den Standardzuständen, also $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Für den Elektronenspin gilt entsprechend up $|\uparrow\rangle$ und down $|\downarrow\rangle$, bei einer polarisierten Welle horizontal $|\leftrightarrow\rangle$ und vertikal $|\updownarrow\rangle$. Das zeigt die folgende Tabelle:

<i>Abstraktes (binäres) System</i>	<i>Elektronenspin</i>	<i>Photon-Polarisation</i>	<i>Stark verfactes atomares System</i>
$ 0\rangle$	up $ \uparrow\rangle$	horizontal $ \leftrightarrow\rangle$	Grundzustand
$ 1\rangle$	down $ \downarrow\rangle$	vertikal $ \updownarrow\rangle$	angeregter Zustand
<i>Standardbeschreibung</i>	<i>Stern-Gerlach-Versuch</i>	<i>Polarisator</i>	<i>Energieniveaus</i>

Für den Betrag der Matrix gilt $\langle \xi | \xi \rangle$ (gesprochen *bra-ket*, englisch Klammer) und für die Schrödinger-Gleichung mit den zwei Lösungen (Zustände) A und B, ist dann $\langle A | B \rangle$ ihr Skalarprodukt. Für ein gegenüber den Einwirkungen der Außenwelt abgeschirmtes Quantensystem gilt:

$$\Psi = c_1 \cdot |A\rangle + c_2 \cdot |B\rangle \text{ mit } c_1^2 + c_2^2 = 1.$$

Darin sind c_1 und c_2 beliebige, (reelle) frei verfügbare Konstanten. Es gilt: **Alle** möglichen Quantenzustände existieren gleichzeitig. Sie sind als **Superposition** überlagert und das ist durch die Bloch-Kugel gut darstellbar. Sie fasst alle Punkte auf der Kugeloberfläche mit $r = \langle A|B \rangle$ zusammen. Am oberen „Nordpol“ befindet sich der eine Zustand (z. B. A), am unteren „Südpol“ B. Wird eine Superposition durch eine (thermische) Störung oder eine andere externe Einwirkung, z. B. makroskopische Messung beeinflusst, so verbleibt nur noch ein einzelner, absolut zufälliger makroskopischer Zustand. Trotz der vielen „Unbestimmtheiten“ prägte 1995 Benjamin W. Schumacher für die Superposition den Begriff quantenphysikalisches Bit = QuBit, auch qbit, QBit, Qbit usw. sind gebräuchlich:

$$\text{QuBit} = \{c_1|0\rangle + c_2|1\rangle\}.$$

Es existiert nur so lange fest, wie kein äußerer Einfluss erfolgt. Deshalb sind meist extrem tiefe Temperaturen von nK bis mK notwendig. Sie können nur mit komplizierter mehrstufiger Kühlung hergestellt und erhalten werden. Die Folge der Einwirkung auf das QuBit ist die **Dekohärenz** als aufgehobene Superposition. Dabei gibt es eine **Dekohärenzzeit** t_{De} und danach existiert nur noch ein einziger Wert $x = c_{1m} \cdot 0 + c_{2m} \cdot 1$, der im abgeschlossenen Intervall $[-1 \dots +1]$ liegt. Ein QuBit mit 1 g Masse und 1 cm Durchmesser ist bereits nach ca. 10^{-23} s zerstört. Annähernd gilt: je größer die Masse, desto kürzer ist die Zeit. Die typischen Dekohärenzzeiten hängen aber auch erheblich vom verwendeten Quantensystem ab. Sehr gute Werte wurden beim gut „abgeschirmten“ **Kernspin** mit etwa 10 s erreicht. In sehr weit gefasster Analogie ähnelt daher jede Messung an einem Quantensystem der zerstörenden Wiedergabe beim dRAM oder Ferritkernspeicher. Im Gegensatz dazu ist aber kein „Refresh“ möglich, welches die unendlich vielen Zustände der Superposition und die tiefe Temperatur wieder herstellen müsste. Weiter ist technisch keine Kopie (Vervielfältigung, Klonen, Backup) der Superposition möglich. Selbst eine Fehlerkorrektur dürfte kaum möglich sein. Das sind auch Folgen der Heisenberg-Unschärfe.

Quantenphysikalische Teilchen (auch QuBit) lassen sich zu einer festen Gesamtheit verkoppeln. Sie besitzen dann nur noch gemeinsame Eigenschaften. Hierfür hat 1935 Schrödinger den Begriff **Verschränkung** eingeführt. Passiert z. B. ein Photon einen speziellen Kristall, so können dadurch zwei verschränkte Photonen mit jeweils halber Energie (Frequenz) entstehen. Beide befinden sich in unbekannten Superpositionen, aber ihre Polarisierungen stehen grundsätzlich senkrecht zueinander. Sie können sich in verschiedene Richtungen bewegen. Wird eines irgendwo gemessen, so verschwindet die Superposition (Dekohärenz) wodurch seine Polarisationsrichtung feststeht. Infolge der Verschränkung wird sofort auch die Superposition des zweiten aufgehoben und es nimmt dabei die senkrechte Polarisation an. Dabei ist die Entfernung beider Photonen ohne Einfluss, was eine unendliche Geschwindigkeit für die „Wechselwirkung“ der verschränkten Teilchen bedeutet. Dieser Effekt kann aber nicht zur Übertragung von Nachrichten, sondern nur bei der Kryptografie zur Erkennung von einer illegalen Beobachtung genutzt werden. Einstein, Podolsky und Rosen sprachen wegen der unendlichen Geschwindigkeit von einer spukhaften Fernwirkung (EPR-Experiment). Heute ist Nicht-Lokalität üblich.

Eine Veranschaulichung des QuBit demonstriert **Bild 145**. Es benutzt das ehemalige Kinderspielzeug Traumaskop. Sein Prinzip demonstriert (a): Auf einem Faden ist eine Scheibe befestigt, die vorne und hinten je ein Bild trägt. Auf der nicht dargestellten Rückseite soll sich ein Baum mit veränderter Krone befinden. Durch schnelles Drehen des Fadens zwischen Daumen und Zeigefinger wird dann ein sich bewegender Baum wahrgenommen. Damals übliche Varianten waren Jonglieren, Hüpfen, Tanzen, Hofknicks, Abschied usw. Eine etwas andere Anwendung ergänzt zwei Teilbilder zu einem Ganzen (b). Für die Darstellung der Superposition gemäß der obigen Gleichung wurde ein Doppeltraumaskop (c) geschaffen. Dabei stehen beide Achsen (c_1 , c_2) senkrecht zueinander und drehen sich unterschiedlich schnell. Die Belegung der beiden Scheiben erfolge gemäß (d). Durch die beiden Rotationen ergeben sich dann sichtbare Bildreihen für die Zustände von A und B. Mit

Blitzlichtaufnahmen können einzelne Beispielzustände (e) gewonnen werden. Über die Zeit integriert zeigt dann das Doppeltraumaskop alle unendlich vielen Zustände der obigen Gleichung. Für die Quantenphysik muss es nur noch extrem klein angenommen werden. Die Energie des Blitzes bei einer Aufnahme muss dagegen so groß, dass sie das Traumaskop und damit auch die überlagerten Zustände (Superposition) zerstört. Auf dem Bild entsteht dann nur noch ein zufällig ausgewählter Zustand, etwa B_1 bis B_3 gemäß (e).

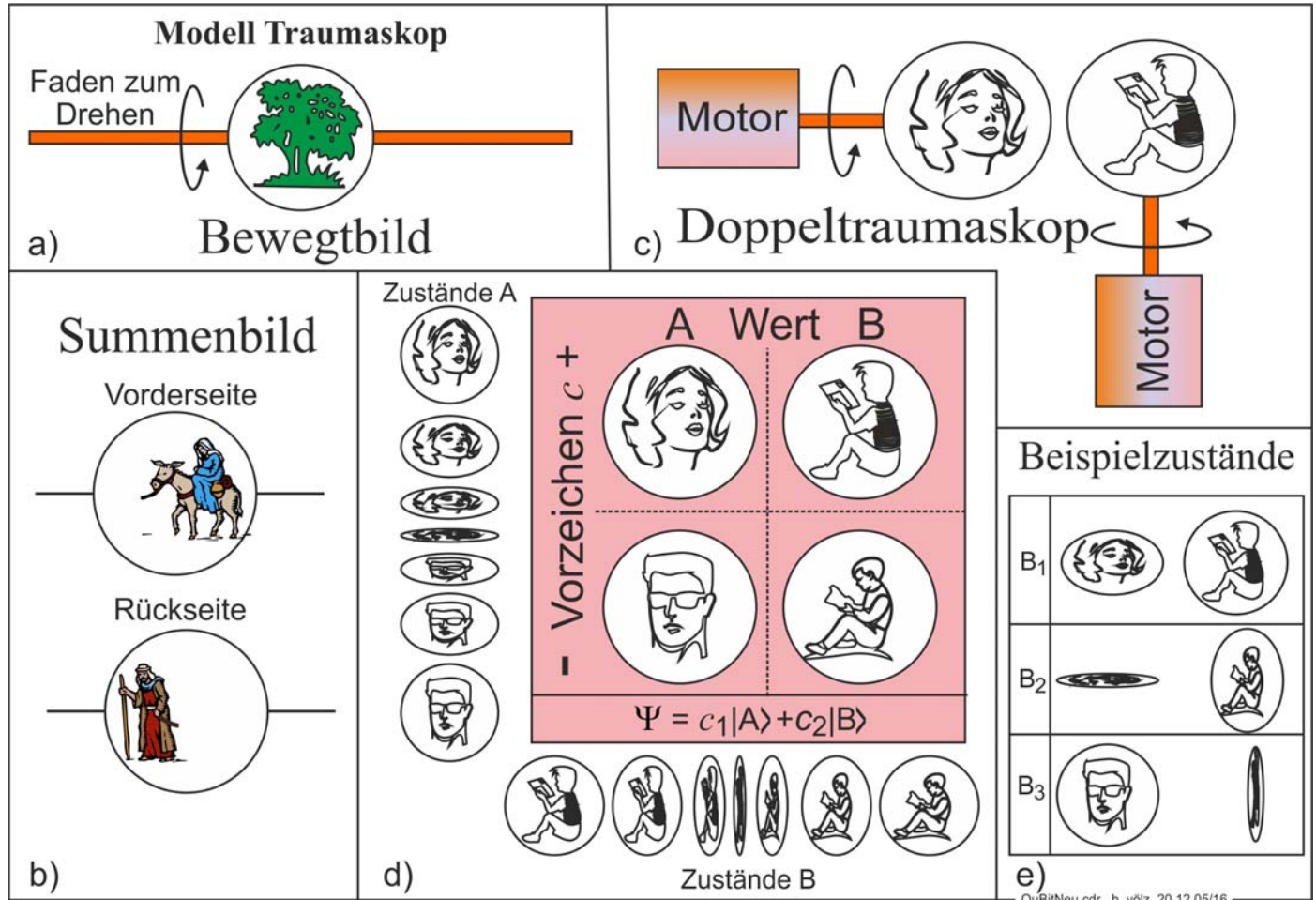


Bild 145. Vom Traumaskop zu einer anschaulichen QuBit-Darstellung.

Der **Urknall** gehört zwar nicht zur Quantenphysik, aber immerhin zur neuen Physik, nämlich der allgemeinen Relativitätstheorie. Außerdem wird der Urknall häufig als Quantenfluktuation interpretiert. Einstein war zunächst davon überzeugt, dass das Universum statisch und unveränderlich sei. Jedoch die Theorie zeigte zu seiner eigenen Überraschung etwas anderes. Deshalb fügte er 1917 den ursprünglichen Gleichungen einen „Antischwerkraftterm“ Λ , die sogenannte kosmologische Konstante hinzu und erzwang so Stabilität. 1922 schuf Friedmann auf der Basis der Theorie kosmologische Modelle, die ohne diese Konstante auskamen. 1927 entwickelte Lemaître eine erste Theorie des „Urknalls“ (englisch: big bang). 1929 gewann Hubble über die Rotverschiebung der Sternspektren Hinweise auf ein sich ausdehnende Weltall. 1932 gab dann Einstein seinen Irrtum zu und empfahl Λ als „die größte Eselei meines Lebens“ aus den Gleichungen zu verbannen. **Bild 146d** zeigt den heute angenommenen und z. T. berechneten Evolutionsverlauf. Recht unwahrscheinlich erscheinen dabei u. a. die anfänglich Temperatur $>10^{30}$ K, wodurch sich noch nicht existierende Teilchen wesentlich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen müssten. Auch die dazu gehörende extrem kurze Planklänge von 10^{-33} m macht das unmöglich und schließlich sei noch auf die völlig ungewöhnliche Zeitskala hingewiesen. In allen Wissenschaften und speziell auch in der Physik gibt es keinen, auch nur annähernd ähnlichen Zeitverlauf. Für alle möglichen, mehr als 60 messbaren Eigenschaften ist eine logarithmische Skaleneinteilung erforderlich. Auch für die etwa 20 Konstanten ist eine exponentielle Zahlenschreibweise notwendig [Völ96]. Lediglich für die Erdbe-

schleunigung mit $g \approx 9,81 \text{ ms}^{-2}$ und die relative Atommasse mit 1,0008 genügen einfache Zahlen. Auch hier, in diesem Buch benötigen 14 Bilder eine logarithmische, 10 eine lineare und 8 eine gemischt logarithmische plus lineare Einteilung. Lediglich Bild 123 verlangt für alle Zahlen eine noch steilere Einteilung. Hinzu kommt, dass die logarithmischen Zeitskalen in der frühen Vergangenheit immer größere Zeitschritte als in der Gegenwart verlangen (von früher existieren eben weniger Kenntnisse!), also genau umgekehrt wie beim Urknallmodell. Alle diese Skalen mit den Beispielen (a) bis (c) zum Vergleich hinzugefügt. Der Verlauf beim Urknall widerspricht also sehr deutlich allen sonst bekannten Abläufen und könnte daher fraglich sein. Das wird noch deutlicher durch den zeitlich umgekehrten Vergleich des Urknalls mit dem Paradox des logarithmischen Annäherns von Achill beim Wettlauf mit der Schildkröte (e). Die Schritte werden dabei ganz analog immer kleiner und schneller.

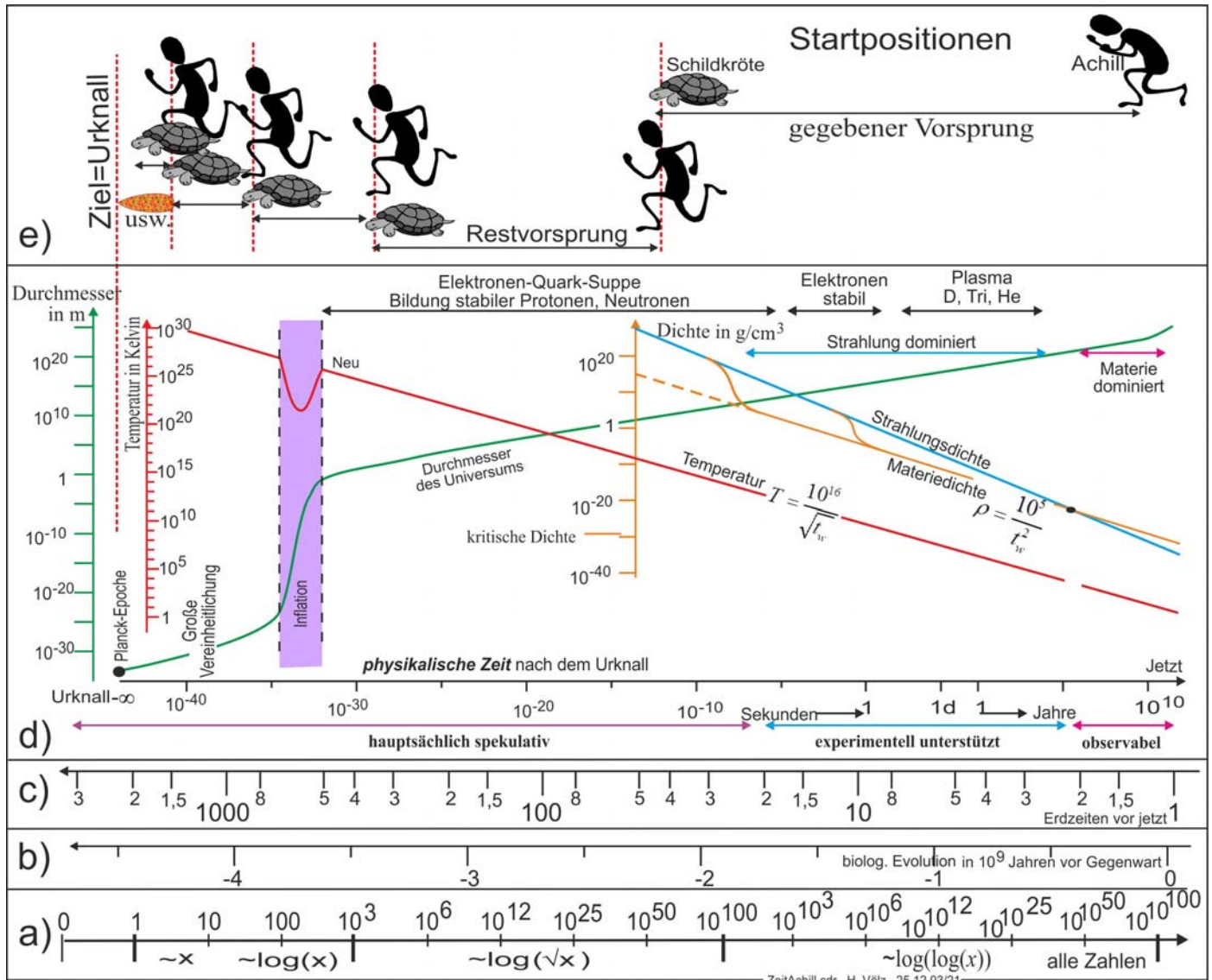


Bild 146. Urknall und Wettlauf Achill mit Schildkröte sowie genutzte Skalen.

Es wurden auch andere Versuche zur Erklärung des Effektes erprobt, u. a. [Völ14a] und [Völ16]. Günstig, wenn auch ohne entscheidenden Erfolg, war dabei die **Systemzeit**, welche sich auf Eigenschaften des aktuellen Systems bezieht. Sie wirkt sich dann ganz ähnlich wie die Steigerung der Haltbarkeit von Lebensmitteln im Kühlschrank aus.

7.7 Rekursivität und Fraktale

Der Begriff Fraktal¹⁰³ wurde 1975 von Mandelbrot für „vielfältig gebrochene Gebilde, Linien und Strukturen“ eingeführt [Man87]. Wesentlich für ihre Erzeugung ist die Rekursion (s. Abschnitt 6.4.6). Daher gab es schon deutlich früher solche Strukturen, die teilweise auch Monsterkurven genannt werden (s. u.), jedoch erst später bei den Fraktalen eingeordnet wurden. Sie entstehen oft durch Rekursion, aber inzwischen gibt es für ihre Erzeugung mehrere Methoden (s. u.) Teilweise kommen die Gebilde auch in der Realität vor. Darauf wies auch Mandelbrot deutlich hin und das wird ganz besonders deutlich durch die vielen, auch farbig darstellten, aber rechentechnisch erzeugten Pflanzen in [Pru90] belegt.

Bei der komplexen Funktionentheorie ist es wichtig zu wissen, bis zu welcher radialen Entfernung vom Ursprung eine Funktion noch sicher konvergiert, also nicht über alle Grenzen hinaus wächst. Das wird klassisch durch ihren Konvergenzradius angegeben. Es ist aber bekannt, dass dennoch in mehreren Richtungen darüber hinaus Konvergenz existiert. Dies ist aber nur extrem aufwändig zu berechnen. 1980 konnte hierfür Benoit B. Mandelbrot (1924 – 2010) erstmals die leistungsfähige Rechentechnik mit Grafikausgabe einsetzen und so den genauen Verlauf der Konvergenzgrenze erfassen. Dabei begann er mit der einfachen quadratischen Gleichung $\xi := \xi^2 + \chi$. In reeller Schreibweise lautet dafür die Iteration

$$x := x^2 - y^2 - c \quad \text{und} \quad y := 2 \cdot x \cdot y - d.$$

Dabei bestimmen c und d die Bildkoordinaten. Zu seinem großen Erstaunen erhielt er hierbei das heute als Apfelmännchen bezeichnet **Bild 147a**. Die Konvergenzgrenze war zu einer höchst komplexen (verkrüppelten, daher unendlich langen) Grenze zwischen rot und grün entartet. Zunächst vermutete er einen Programmierfehler. Doch es war alles korrekt. Bei den Berechnungen ist die Divergenz bereits dann gesichert, wenn bei der Rekursion erstmalig ein Ergebnis

$$a = \sqrt{x^2 + y^2} > 1$$

auftritt. Das kann auch bereits nach 1, 2, 3 usw. Iterationsschritten erfolgen. Die entsprechenden Bereiche können dann im Sinne einer Höhendarstellung mit verschiedenen Farben gekennzeichnet werden (b). Wie extrem stark die Konvergenz-Grenzlinie „**verschrumpelt**“ ist, zeigt sich vor allem im Seepferdchental zwischen den beiden größten Äpfeln in (b) mit blauem Kreis. Außerdem ist gut sichtbar, dass sich einzelne Bildteile – wie das in c) rechts oben rot umgebene Seepferdchen – sehr häufig wiederholen. Das ist die typische **Selbstähnlichkeit**, die auch häufig das Apfelmännchen selbst betrifft und bei allen Fraktalen auftritt. Bei mehreren anderen Iterationsgleichungen (als oben) entstehen häufig hoch ästhetisch anmutende Bilder, und zwar ähnlich, wie sie in [Pru90] gezeigt sind. Mit der Verfügbarkeit von Heimcomputern wurden schließlich auch von vielen Amateuren sehr viele rekursive Berechnungen mit anderen Rekursionsgleichungen durchgeführt und die gewonnenen Bilder oft sogar als Glückwunschkarten versandt und publiziert.

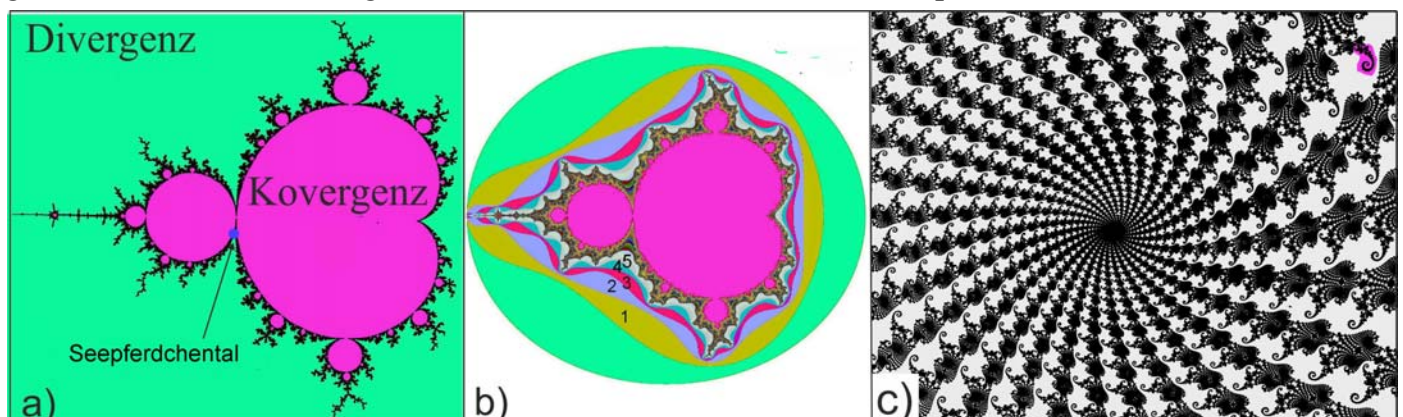


Bild 147. Verschiedene Darstellungen des Apfelmännchens und seines Seepferdchentales (c).

¹⁰³ Lateinisch *fractum* gebrochen

Eine andere Betrachtung der Fraktale führt auch zu ihren Attraktoren. Das sind bestimmte, meist linienhafte Strukturen im Grenzgebiet zwischen Konvergenz und Divergenz. Man nennt sie auch **Julia-Menge**. Wählt man einen zu dieser Menge gehörenden Punkt aus und führt mit ihm die Iteration durch, so können ständig nur Punkte dieser Menge erreicht werden. Die Menge ist dabei in sich abgeschlossen. Hinzu kommt aber, dass viele Punkte außerhalb dieser Menge die Tendenz zeigen, zu dieser Menge hin zustreben.

Weitere Varianten zur Erzeugung von Fraktalen sind **Ersetzungsregeln**. Sie ergeben die in der Mathematik lange bekannten **Monsterkurven**. Sie werden mittels eines *rekursiven Generator-Prinzips* erzeugt. Von ihnen ist die **Kochkurve** bereits seit 1904 gemäß **Bild 148** (links) bekannt. Die Ausgangsgerade (oben) wird zunächst in drei gleiche Abschnitte geteilt. Der mittlere Teil wird dann durch zwei Geraden je mit der Länge des ausgeschnittenen Teils ersetzt. So entsteht ein dachartiges Gebilde in der Mitte der Geraden. Die dann vorhandenen vier Geraden haben je die Länge von $1/3$ der Ausgangslänge und ergeben eine Gesamtlänge von $4/3$. Rekursiv wird dann für jede neu entstanden Strecke die Dreiteilung ständig wiederholt. Bereits nach 4 Schritten entsteht dann das typische Aussehen der Kochkurve. Nach n Wiederholungen beträgt die Gesamtlänge $(4/3)^n$ und die Kurve strebt gegen eine unendliche Länge. Die einzelnen „Messradien“ sinken dabei auf jeweils $(1/3)^n$. Ihre hier nicht weiter behandelte Hausdorff-Dimension beträgt $D = \log(4)/\log(3) \approx 1,2618$.

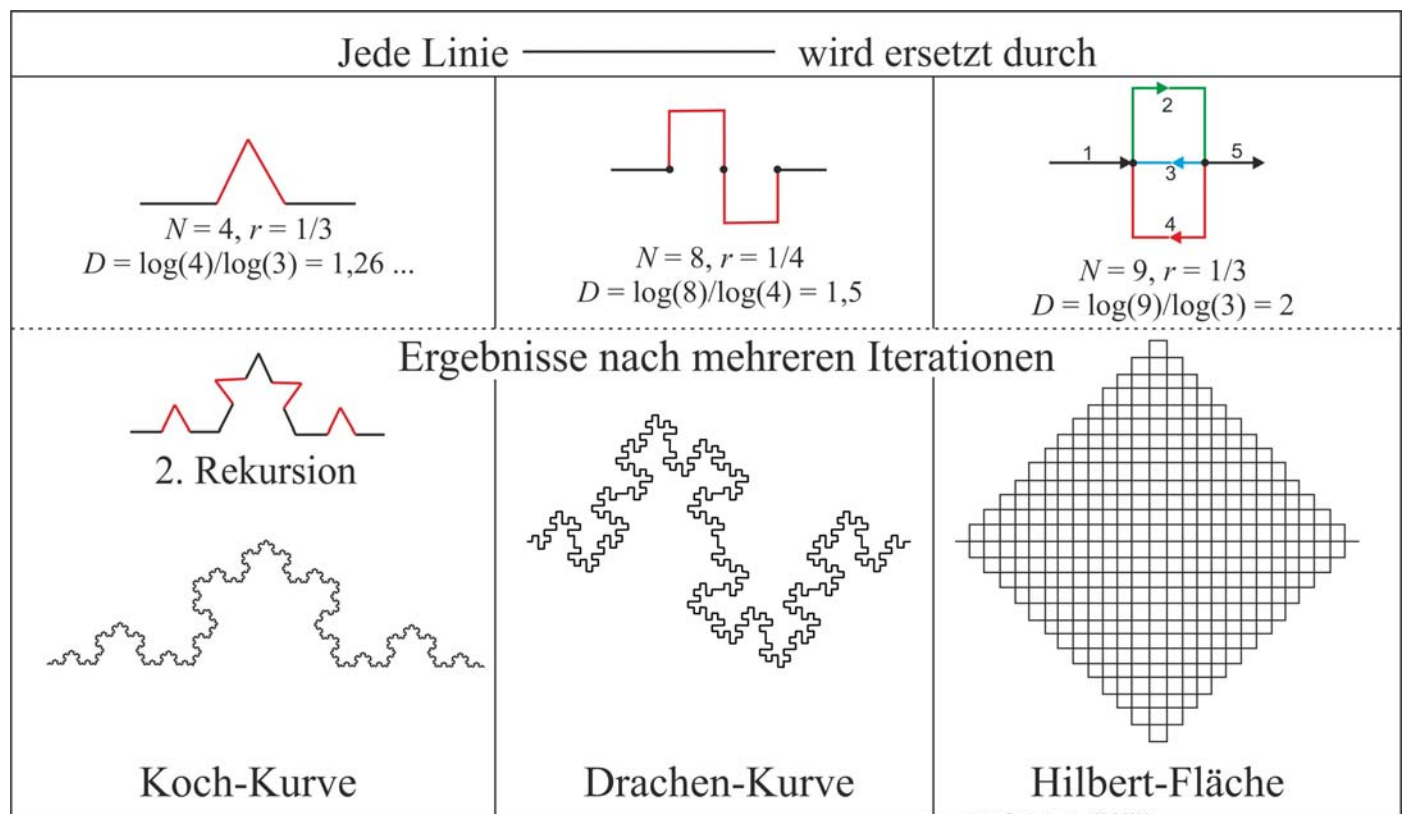


Bild 148. Die drei wichtigsten Monsterkurven.

Zwei weitere wichtige Varianten sind die Drachen- und Hilbertkurve. Letztere ist noch dadurch gekennzeichnet, dass sie für $n \rightarrow \infty$ jeden Punkt des Quadrats erreicht. Daher hat sie die Hausdorff-Dimension 2. Das geschilderte Generator-Prinzip lässt eine Vielzahl von Konstruktionsvarianten zu:

- Die Strecke kann im beliebigen Maßstab in unterschiedlich viele Strecken geteilt werden.
- An die Stelle des gleichseitigen Dreiecks können relativ frei gestaltete Streckenzüge, wie Mäander, Vierecke und n -Ecke für jede herausgenommene Strecke eingefügt werden.
- Zu Beginn braucht auch keine Gerade vorhanden zu sein. Es können beliebige Kurven verwendet werden.

Bei allen diesen Kurven tritt auch *Selbstähnlichkeit* in Abschnitten aus dem Gesamtbild auf.

Sehr umfangreiche Bilder in [Pru90] legen es nahe, dass die genetischen Algorithmen nach ähnlichen Prinzipien funktionieren könnten. Vielleicht trifft das teilweise auch auf unser Sehen zu (s. u.). So erkennen wir z. B. im Winter die Bäume allein an ihrem Verzweigungsmuster (**Bild 150**). Dabei ist die Eiche durch fortlaufende, dreifache Verzweigung mit kleinen Längen dazwischen gut zu erkennen. Die Ulme verzweigt sich dagegen nur zweifach mit deutlich größeren Längen (Zeichnungen links oben). Rechts oben steht ein Beispielbild aus [Pru90], vielleicht blühender Flieder. Die restlichen vier Bilder sind Winterfotografien und betreffen 1. die *Linde*, 2. den *Essigbaum*, 3. die *Kastanie* und 4. die *Eiche*.

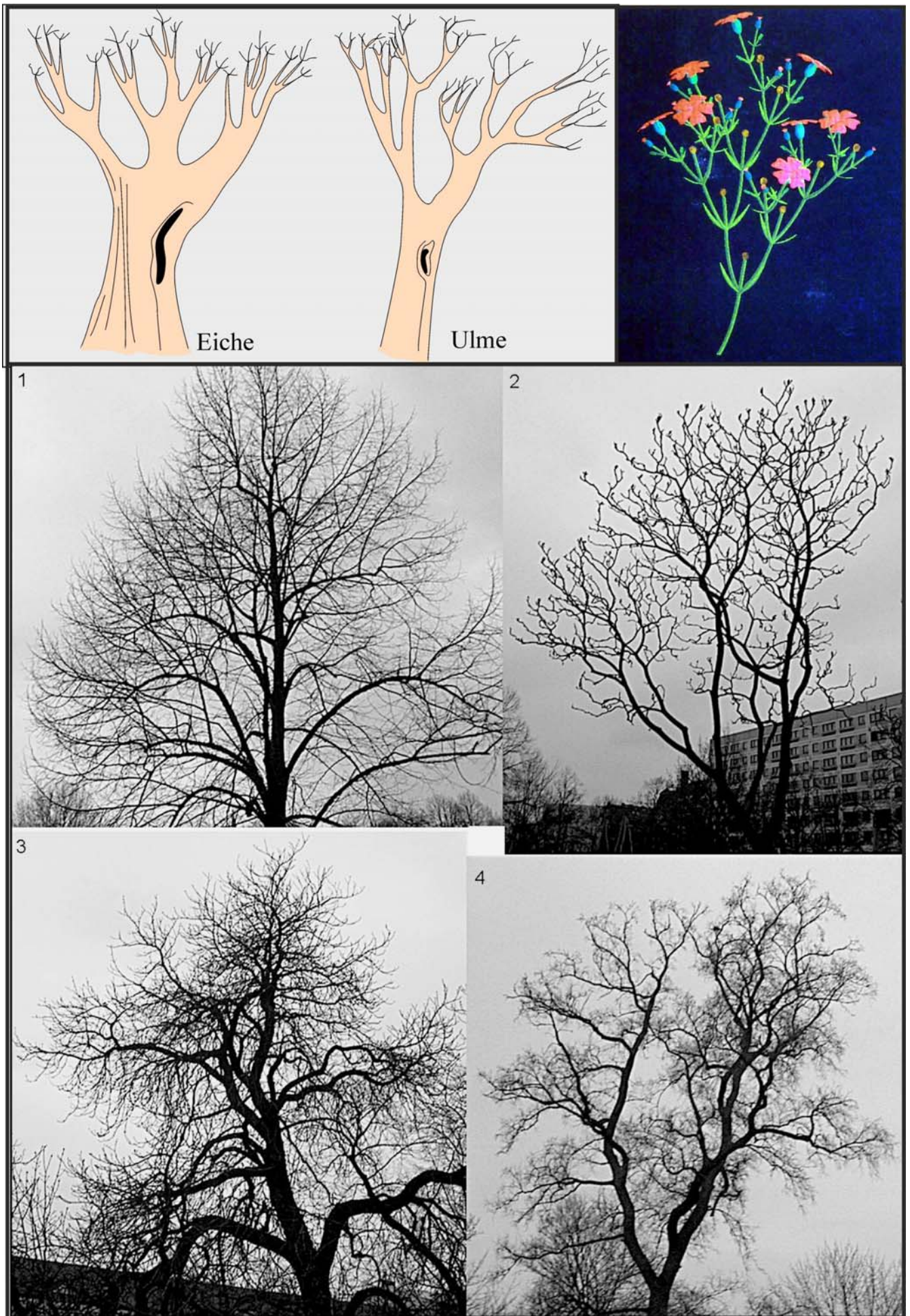


Bild 150. Beispielbilder, die auf L-Systeme zumindest deutlich hinweisen (s. Text).

Das starke, unerwartete „verkumpelte“ Verhalten wurde bald für fast alle physikalischen Grenzen, insbesondere bei Land-, Wasser- und Ländergrenzen, bei Rändern von Blättern usw. gefunden. Ausführlich wurde es u. a. 1961 von Lewis Richardson untersucht. Dabei ergab sich **Bild 151a**. Danach hängt die Länge einer Grenze deutlich vom Maßstab der Darstellung ab. Benachbarte Länder geben sogar offiziell die Länge ihrer gemeinsamen Grenze unterschiedlich an, z. B. Spanien $\leftrightarrow$ Portugal: 987 $\leftrightarrow$ 1214 km sowie Niederlande $\leftrightarrow$ Belgien 380 $\leftrightarrow$ 449 km. Dieser Einfluss zeigt sich deutlich auch bei Landkarten, wie der Ostküste der USA (b): Globus: 3 000 km, große Karte: 7 000 km, Seekarte: 17 000 km, zu Fuß ablaufen: 24 000 km.

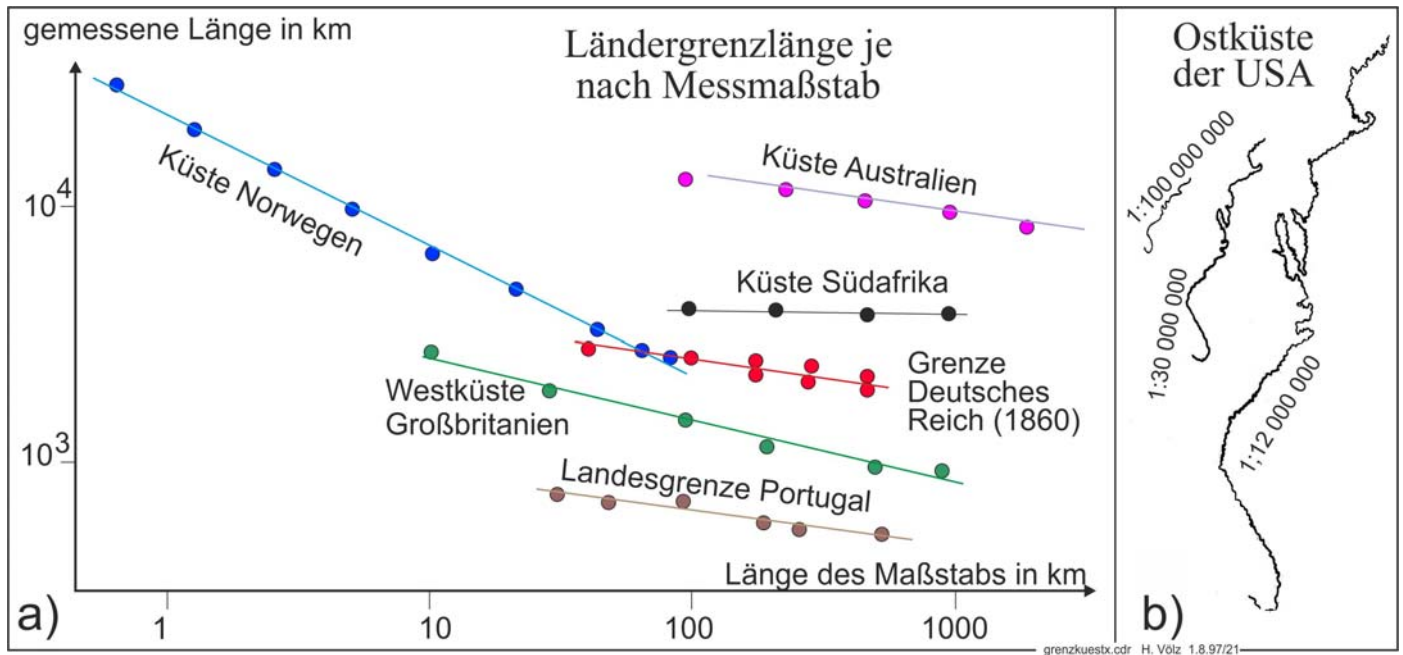


Bild 151. Grenzlänge und Maßstab.

Um 1985 schlug u. a. Peitgen für die rekursive Erzeugung von Fraktalen eine **Kopiermaschine** vor [Jür89], [Pei86]. Mathematisch war das Prinzip bereits früher als iterative *Drehmultiplikation* (kontraktive Transformation) bekannt. **Bild 152** zeigt dazu eine noch recht übersichtliche Variante.

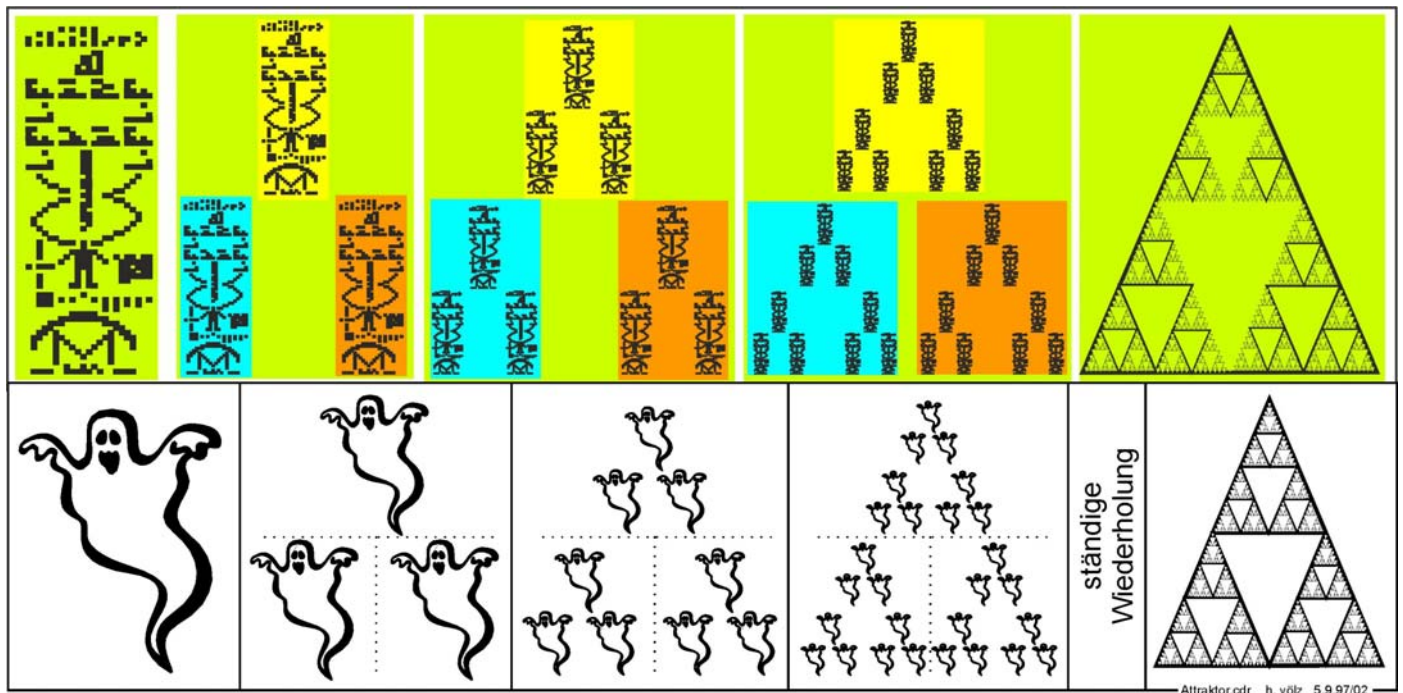


Bild 152. Wie Kopiermaschine (Drehmultiplikation) zum Sierpinski-Dreieck

Unten beginnt der Prozess ganz links mit dem Bild eines „Geistes“, oben mit dem Bild des Signals, das am 16.11.1974 mit dem 300 m-Teleskop in Arecibo für Außerirdische zum Sternhaufen M13 gesandt wurde [Dra97]. Beim gewählten Kopierprozess wird jeweils das Ursprungsbild auf etwa 1/3 verkleinert und je einmal oben sowie darunter links und rechts zu dem neuen Bild zusammengefasst. Mit dem neu entstandenen 3-fach-Bild wird dieser Schritt rekursiv wiederholt. In beiden Fällen entsteht schließlich ganz rechts das bereits 1915 auf andere Weise ebenfalls rekursiv entdeckte Sierpinski-Dreieck. Beim Kopieren ist also offensichtlich das Ursprungsbild völlig belanglos. Allein der spezielle Kopierprozess bestimmt das Ergebnis. Daher ist er eine neue Art der Bilderzeugung.

Schließlich sei noch die betont statistische Variante von Michael, F. **Barnsley** erwähnt, die oft auch „Hüpfer“ genannt wird [Bar93]. Sie verwendet zwei Gleichungssysteme mit zufällig wechselnder Wiederholung:

$$x := A_n \cdot x + B_n \cdot y + C_n \quad \text{sowie} \quad y := D_n \cdot x + E_n \cdot y + F_n$$

Die Koeffizienten A_n bis F_n bestimmen dann das entstehende Bild. Für den ausgewählten Farn (**Bild 153a**) betragen sie:

Gleichung n	A	B	C	D	E	F
1.	0	0	0	0	0	0
2.	0,2	-0,26	0,23	0,22	0	1,6
3.	-0,15	0,28	0,26	0,24	0	0,44
4.	0,85	0,04	-0,04	0,85	0	1,6

Barnsleys Meinung, dass die Koeffizienten recht wenig das entstehende Bild beeinflussen, hat sich nicht bestätigt. Das zeigen deutlich die zusätzlichen Bilder für folgende Werte: (b) $A_4 = 0.99$; (c) $A_2 = 0,7$, (d) $F_2 = 16$ und schließlich (e) $F_2 = 16$ sowie $A_4 = 0,65$. Es sei aber noch erwähnt, dass mit dieser Methode auch eine hocheffektive Datenkomprimierung möglich wurde.

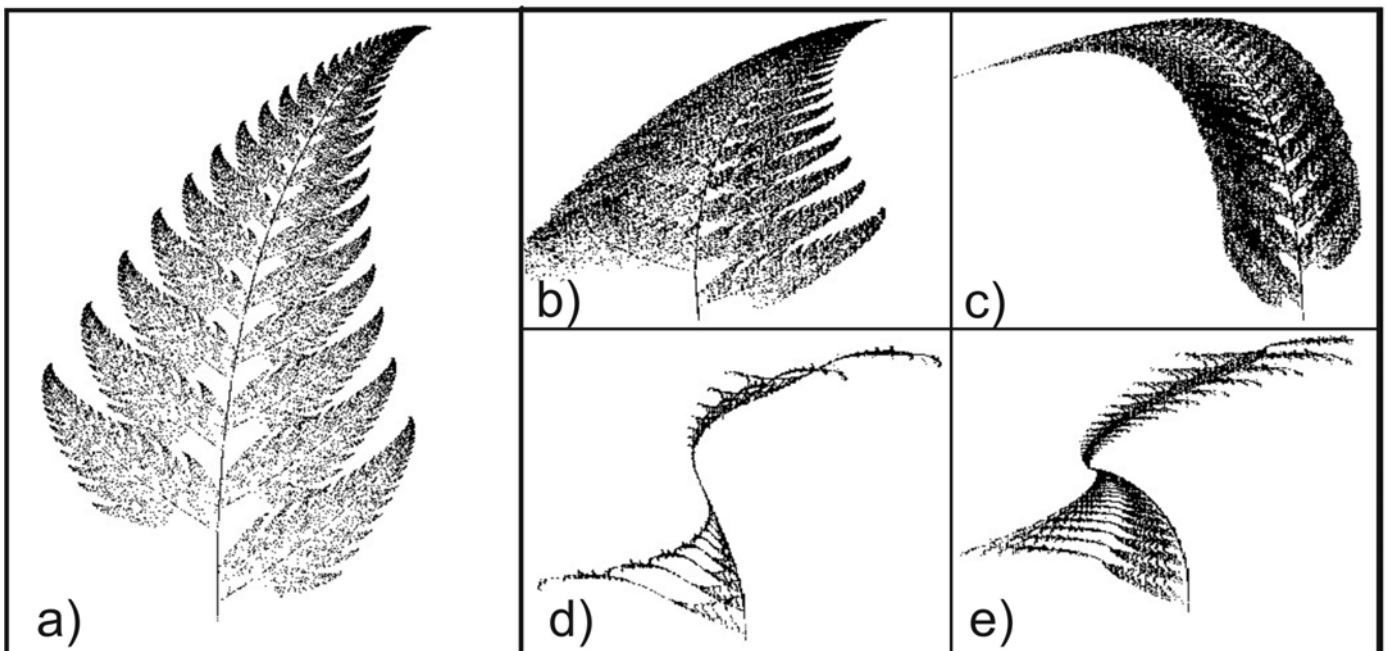


Bild 153. Mit dem Hüpfer erzeugte „Farn“-Bilder.

Zusammengefasst besitzen Fraktale folgende Besonderheiten:

- Sie werden durch **rekursive Verfahren** erzeugt, benötigen dabei viel **Zeit**.
- Sie besitzen hoch **verkrüppelte** Kurven und dadurch eine hohe **Komplexität**.
- Sie enthalten umfangreich **selbstähnliche Teilstrukturen**.
- Besitzen häufig sehr große **Ähnlichkeit** mit Strukturen der **Realität**.

- Die verschiedenen Verfahren **erzeugen** vielfach **die gleichen Bilder**.
- Sehr oft besteht eine Verquickung von Zufälligkeit und Gesetzmäßigkeit.
- Besitzen meist beachtliche **ästhetische Wirkung**, daher wichtig für **Computer-Kunst**.
- Beim Kopierverfahren ist das **Startbild** völlig **gleichgültig**.
- Sie erzeugen eine **neue**, sonst nicht erreichbare **Bildklasse**.

So ergibt sich der folgende Vergleich mit der Euklidischen Geometrie:

Euklidische Geometrie	Fraktale Geometrie
• über 2000 Jahre alt. • geeignet für Objekte, die von Menschen erzeugt wurden. • beschreibbar durch eine Formel oder mit Zirkel und Lineal. • Grundelemente mit bestimmter Größe.	• knapp 50 Jahre alt. • geeignet für natürlicher Objekte. • rekursiver Algorithmus. • gut skalierbar.

Weiter lassen sich dadurch **zwei Bildklassen** deutlich unterscheiden:

In der Natur vorhanden

- **Kugelförmige** Objekte, die durch Reibung und Abnützung entstehen.
- **Fraktale Gebilde**, die durch Zusammenwirken **vieler** (zufälliger) **Einflüsse** entstanden (Grenzen, Küsten usw.).
- **Fraktale Strukturen**, die rekursiv mit der Evolution erzeugt wurden und werden.
- Geraden sind sehr selten, nur bei echt kristallinen Strukturen, die spaltbar sind.

Von Menschen geschaffen

- Mit beachtlichen Aufwand werden ebene, **rechteckförmige** Gebilde systematisch konstruiert.
- Für die Konstruktion sind **Zirkel** und **Lineal** wichtig.
- Objekte mit einem „**Sinn**“ (Kultur, Kunst und Mystik) werden bevorzugt mit **geringer Komplexität** geschaffen.
- **Kugelflächen** sind selten, vorwiegend nur bei Herstellung von Linsen und Kugellagern.

Für die Fraktale ist die Rekursion unumgänglich, also zentral. Dagegen ist uns aber **rekursives Denken** offensichtlich (noch) nicht möglich. Eine Ursache dafür könnte sein, dass Rekursivität erst 1936 mit dem Turing-Automaten und dann mit der Church-These hinreichend bekannt wurde. Außerdem mussten für die vielen notwendigen Rekursionsschritte erst die elektronischen Rechner ab 1950 und für deren Bilder die Computer-Grafik ab 1980 zur Verfügung stehen. Andererseits ist es recht wahrscheinlich, dass unser **Gehirn** rekursive Bilder *analysieren könnte*. *Da die Evolution die Rekursion benutzte*, dürfte sie auch irgendwie in unserem **Gehirn verankert** sein. Die hoch parallelen Schichten im Sehzentrum sprechen auch dafür. Ohne Rekursion könnten wir wohl auch kaum ein Gesicht unabhängig von der (Bild-) Größe und Lage erkennen. Weiter spricht dafür, dass wir Karikaturen schneller als Fotos erkennen. Die Euklidische Geometrie ist uns jedoch seit der griechischen Antike voll vertraut.

Den Problemen der Fraktalen bin ich 1995/96 an der Technischen Universität Berlin in drei Semestern mit Seminaren und Projekten mit je etwa 30 ausgewählt guten Studenten systematisch nachgegangen. Dabei wurde uns u. a. immer deutlicher: Keinem von uns gelang es, vom Algorithmus und seiner Abänderung im Voraus Angaben für das zu erwartende Bild zu benennen. Noch weniger gelang es, für ein unbekanntes Fraktal einen Erzeugungsalgorithmus anzugeben. Einen beachtlichen Erfolg erzielten jedoch zwei Studenten mit einer sehr umfangreichen Diplomarbeit [Opp95]. Sie zogen dabei auch die Hilfe von Prof. Rechenberg und seinen komplexen Suchalgorithmen ein. So konnten sie für die Fotografie eines unbekannten Fraktals etwa gleichwertig die 3 L-Formeln gewinnen: $F = F[+F]F[-F]F$ oder $F = FF[+FF]FF[-FF]$ bzw. $F = F[+F][+F]F[-F]F$ gewinnen.

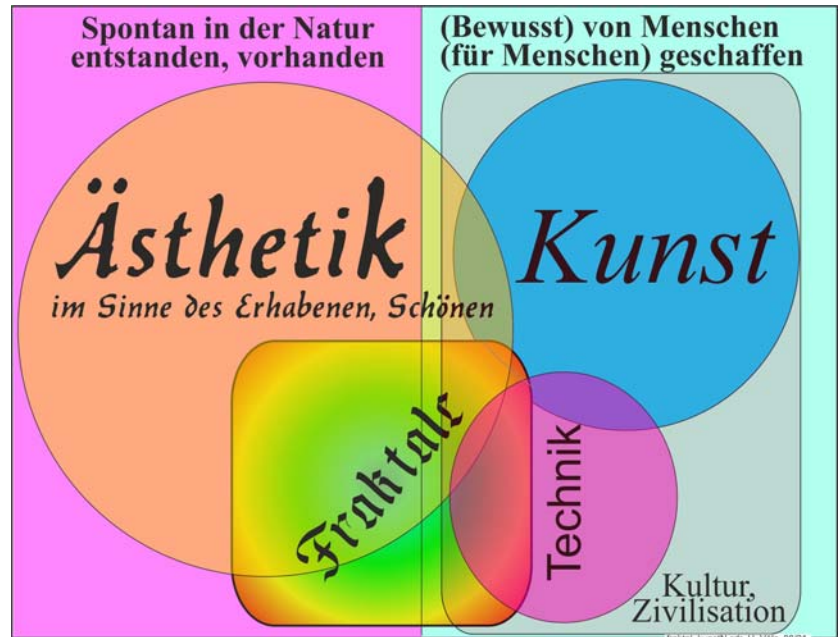
Mit den Fraktalen fand Mitchell Jay Feigenbaum (geb. 1945) auch so etwas wie eine Naturkonstante. Zur Rekursion benutzte die Verhulst-Gleichung

$$a := a \cdot (a - 1) \cdot x.$$

Hierbei entstehen u. a. Einschwingvorgänge die zwischen den Werten 2, 4, 8 usw. sich wiederholen und dabei gewann er dann den Wert für die Periodenverdopplung $F=4,6692016090\dots$ Er war allerdings schon vorher ihm in anderen Kontext von Grossmann entdeckt worden.

Bezüglich der *Ästhetik* und sogar der „Kunst“ bei Fraktalen wurde ich 1987/88 für eine Tagung der Universität Leipzig um einen Vortrag gebeten [Völ88a]. Dafür entstand u. a. – die damals noch einfachere Gestaltung von **Bild 154**. Da Kunst stets von Menschen für Menschen geschaffen wird, können hierzu die Fraktale nicht gehören. Aber genau wie die Natur können sie ästhetische Wirkungen hervorrufen. Unabhängig von den beiden Auffassungen der Mathematik (s. o.) gehören sie dabei sowohl zu spontan Vorhandenem als auch zu dem vom Menschen Geschaffenem.

Bild 154. Eine mögliche Einordnung der Fraktale.



*+

Es folgen nur noch Folgerungen und Einleitung mit einigen Bildern . Doch sie werden hier nicht mehr, sondern nur im Buch „Ichrealität - Meine Weltvorstellung bei Shaker-Verlag erscheinen

Literatur

- [Asi82] Asimov, I.: Alle Roboter-Geschichten. Bastei-Verlag, Bergisch Gladbach 1982.
- [Ass97] Assmann, J.: Das kulturelle Gedächtnis. Beck, München 1997
- [Bar06] Barrow, J. D.: Das 1×1 des Universums. Rororo, Reinbeck b. Hamburg 2006
- [Bar93] Barnsley, M. F.; Hurd L. P.: Fractal Image Compression, AK Peters Ltd., Wellesley, MA, 1993
- [Bar94] Barrow, J. D.: Ein Himmel voller Zahlen. Spektrum-Verlag. Heidelberg - Berlin - Oxford 1994
- [Bau09] Bauer, f. l.: Kurze Geschichte der Informatik. Wilhelm Fink Verlag, München 2009
- [Beb86] Bebedikt, H. E.: Die Kabbala. Verlag H. Bauer, Freiburg im Breisgau 1986
- [Ber05] Berger, J.: Paradoxien aus Naturwissenschaft, Geschichte und Philosophie. Anaconda, Köln 2005
- [Böl58] Böll, H. Doktor Murkes gesammeltes Schweigen. Kiepenheuer & Witsch. Köln, 1958
- [Bor94] Bormann, S.: Virtuelle Realität - Genese und Evaluation. Addison - Wesley, Bonn u.a. 1994
- [Bon95] Bonß, W.: Vom Risiko - Unsicherheit und Ungewissheit in der Moderne. Hamburger edition, , Hamburg, 1995
- [Brü17] Brückler, F. M.: Geschichte der Mathematik kompkt Springer Spektrum, Berlin 2017
- [Bru99] Bruß, D.: Quanteninformation. Fischer, Frankfurt 2003.
- [Bür98] Bürgin, L.: Irrtümer der Wissenschaft: Gondrom Verlag 1998
- [Cap20] Capek, K.: „R.U.R. Werstands Universal Robots“. Tschechisch 1920
- [Cap77] Capek, K.: Wie in alten Zeiten. In: Wie in alten Zeiten - Das Buch der Apokryphen (1938). Aufbauverlag Berlin 1977, S.40 -43. Aufbau-Verlag Berlin 1977

- [Chu90] Churchland, P.: Ist die denkende Maschine möglich? Spektrum der Wissenschaft, März 1990, S. 40 – 54.
- [Daw87] Dawkins, R.: Der blinde Uhrmacher. Kindler, München 1987
- [Dra97] Drake, F., Sobel, D.: Signale von anderen Welten. Weltbild Verlag, Augsburg 1997
- [Dre85] Dreyfus, H. L.: Was Computer nicht können - Die Grenzen künstlicher Intelligenz, Athenäum, Frankfurt a/M 1989. 1. Aufl. 1985
- [Dri72] Drischel, H.: Das neuronale Gedächtnis. Nova acta Leopoldina Band 37/1, Nr. 206. S. 325 - 353. Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1972
- [Ebb85] Ebbinghaus, H.: Über das Gedächtnis. Dunker, Leipzig 1885
- [Ebe96] Ebert, S.: Rhythmus und Eigenzeiten. Hirzel. Stuttgart - Leipzig 1995
- [Fal88] Falletta, N.: Paradoxien. Fischer - Logo, Frankfurt/M 1988/1990 [FAL]
- [Fle51] Fleischmann, R.: „Struktur des physikalischen Begriffssystems“. Zeitschrift Physik 129 (1951), S. 377 – 400
- [Foe93] Foerster, H. v.: Wissen und Gewissen. Suhrkamp, Frankfurt/M 1993
- [Fra64] Frank, H.: Kybernetische Analysen subjektiver Sachverhalte. Verlag Schnelle, Quickborn bei Hamburg 1964
- [Fra69] Frank, H.: Kybernetische Grundlagen der Pädagogik. 2. Aufl. Bd. 1 + 2. Agis - Verlag Baden-Baden 1969
- [Fre79], Gottlob Frege: Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens. Halle/Saale 1879. Auszugsweise abgedruckt z. B. in: Karel Berka, Lothar Kreiser, Siegfried Gottwald, Werner Stelzner: Logik-Texte. Kommentierte Auswahl zur Geschichte der modernen Logik. 4. Auflage. Akademie-Verlag, Berlin 1986
- [Fro76] Fromm, E.: Haben oder Sein. Die seelischen Grundlagen einer neuen Gesellschaft (1976), [Fun99] Funk, R.: Langeweile und Suchtverhalten nach Erich Fromm. Pdf im Interbet.
- [Gla73] Glade, H., Mannteufel, K.: Am Anfang stand der Abacus. Urania-Verlag, Leipzig, Jena. Berlin 1973
- [Goe30] Goedel, K.: Über die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionenkalküls. Dissertation
- [Goe31] Goedel, K.: Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. in: Monatshefte für Mathematik und Physik. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 38.1931, S. 173 - 198.
- [Gof99] Goff, J. L.: und Gedächtnis. Ullstein, Berlin, 1999
- [Heg66] Helmer, O. u. a.: 50 Jahre Zukunft. Mosaik-Verlag, Hamburg, 1967, engl. Original: Basis Books, New York 1966
- [Hem18] Hemme, H. Das große Buch der Paradoxien. Anaconda Verlag, Köln 2018
- [Hen97] Hennig, A.: Die andere Wirklichkeit - Virtual Reality - Konzepte - Standard - Lösungen. Addison-Wesley. Bonn u. a. 1997
- [Hof09] Hoffmann, D. W.: Theoretische Informatik. Hanser Verlag, München 2009
- [Hör21] Hörisch, J.: Hände, Eine Kulturgeschichte. München 2021
- [Jür89] Jürgens, H., Peitgen, H. - O. und Saupe, D.: Fraktale eine komplexe Sprache für komplexe Strukturen. Spektrum der Wissenschaft; (1989) S. 106 - 118
- [Kap72] Kaplan, R. W.: Der Ursprung des Lebens, Georg Thieme, Stuttgart 1972
- [Kla34] Klages, L.: Vom Wesen des Rhythmus. Niels Kampmann Verlag, Kampen 1934
- [Kla63] Klaus, G.: Die Macht des Wortes. 5. Aufl. Deutscher Verlag der Wissenschaften. Berlin 1969 (1. Aufl. 1963)
- [Kli83] Klix, F.: Information und Verhalten. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1983 (1971)
- [Kli93] Klix, F.: Erwachendes Denken. 2. Aufl. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1983 Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford 1993
- [Kra00] Krause, W.: Denken und Gedächtnis. Hogrefe, Göttingen - Bern - Toronto - Seattle 2000

- [Kuh67] Kuhn, Th.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Suhrkamp-Verlag, Frankfurt/M. 1967. Original: The Structure of Scientific Revolutions 1962
- [Ler79] Lerner, A.: Grundzüge der Kybernetik. Verlag Technik, Berlin 1970
- [Lev17] Levy, J.: Paradoxien und Gedankenexperimente. Anaconda-Verlag, Köln 2017
- [Lev93] Levy, St. KL - Künstliches Leben aus dem Computer. Droemer Knaur, München 1993.
- [Lyr98] Lyre, H.: Die Quantentheorie der Information. Springer Akademischer Verlag, Berlin 1998
- [Man87] Mandelbrot, B. B.: Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, Basel - Boston, 1987
- [Mar81] Marquard, O.: Abschied vom Prinzipiellen. Philipp Reclam jun. Stuttgart 1981
+ : Apologie des Zufälligen. Philipp Reclam jun. Stuttgart 1986
- [Mea72] Meadows, D. u. a.: Die Grenzen des Wachstums. Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart 1972.
- [N.N95] N.N.: „Die 100 des Jahrhunderts“ bei den Schriftstellern, Naturwissenschaftlern, Filmregisseuren, Malern und Komponisten, Boscüren bei rororo 1995.
- [Neu58] Neuman, J. v.: Die Rechenmaschine und das Gehirn. Oldenbourg, München 1965 (engl. Original 1958)
- [Mag20] Magnason, A. S.: Wasser und Zeit - Eine Geschichte unserer Zukunft . Insel-Verlag, Berlin 2020
- [Man87] Mandelbrot, B. B.: Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, Basel - Boston, 1987
- [Mod94] Modis, Th.: Die Berechenbarkeit der Zukunft. Birkhäuser Verlag. Basel – Boston – Berlin 1994.
- [Mor72] Morris, C.: Grundlagen der Zeichentheorie. Hanser-Verlag, München 1972
- [Mül90] Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften - Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer - Verlag. Heidelberg u.a. 1990
- [Oer98] Oerter, R., Montada, L. (Hergb.): Entwicklungspsychologie. 4. Auflag. Psychologie Verlags Union, Weinheim 1998
- [Omm58] Omm, P.: Messkunst ordnet die Welt - Eine Geschichte des Messens und der Messgeräte. Impuls-Verlag, Buchschlag bei Frankfurt/M, 1958.
- [Opp95] Oppermann, D., Ludwig, A.: Möglichkeiten zur Approximation von L-Systemen durch Evolution. Diplomarbeit, TU-Berlin 1995
- [Opi21] Opitz, M.: Lange Nacht über die Hand. Deutschlandfunk Kultur. 13.2.21. 00:05
- [Ort00] Orth, B.: Einführung in die Theorie des Messens (Manuskript)
- [Pei31] Peirce, C. S.: Collected Papers, Herausgeber: Charles Hartshorne / Paul Weiss, Harvard UP 1931, 2.243. dt.: Vorlesungen über Pragmatismus. Felix Meiner Verlag, Hamburg 1973
- [Pei86] Peitgen, H.O. u. Richter P.H.: The Beauty of Fraktals. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1986
- [Pia74] Piaget, J.: Die Bildung der Zeitbegriffe beim Kinde. Frankfurt: Suhrkamp, 1974
- [Pla29] Planck, M.: Das Weltbild der neuen Physik. Barth, Leipzig 1929
- [Pla36] Planck, M.: Vom Wesen der Willensfreiheit. Barth, Leipzig 1936
- [Pla38] Planck, M.: Determinismus oder Indeterminismus. Barth, Leipzig 1938
- [Pla42] Planck, M.: Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft. Barth, Leipzig 1942
- [Pop34] Popper, K., R.: Logik der Forschung (1.Aufl. 1934), 10. Aufl.; Mohr, Tübingen 1994
- [Pru90] Prusinkiewicz, P.; u. a.: The Algorithmic Beauty of Plants. Springer-Verlag, New York, 1990.
- [Ruc90] Rucker, R.: Der Ozean der Wahrheit. Fischer-Logo, Frankfurt/M 1990
- [Sch18] Schmidt, M.: Reise zur Information c't, 2018. H. 13. S. 188
- [Sch39] Schneider, E.: Von der Null bis zur Unendlichkeit. Wegweiser-Verlag, Berlin 1939
- [Sch41] Schmidt, H.: Denkschrift zur Gründung eines Institutes für Regelungstechnik VDI - Druck 1941
- [Sch51] Schrödinger, E.: Was ist Leben. Franke, Bern 1951
- [Sch66] Schleichert, H.: Elemente der physikalischen Semantik. Oldenbourg, Wien – München 1966

- [Sch78] Schrauber, H.; Unpubliziertes Manuskript, Hochschule für Ökonomie 1978. Infolge der Wende nicht mehr publiziert.
- [Sch93] Schmidt, R. F. u. Thews, G. (Hrsg.): Physiologie des Menschen, 25. Aufl. Springer Berlin u.a. 1993
- [Sha76] Shannon, C. E., Weaver, W.: Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. Oldenbourg 1976. Original: A Mathematical Theorie of
- [Sea90] Searl, J. R. u. a.: Ist der menschliche Geist ein Computerprogramm? Spektrum der Wissenschaft, März 1990, S. 40 – 54.
- [Sku54] Skudrzyk, E.: Die Grundlagen der Akustik. Springer - Verlag Wien 1954
- [Ste21] Stegemann, B.: Die Öffentlichkeit und ihre Feindw. klet-kotta. Stuttgart 2021
- [Ste72] Steinbuch, K.: Mensch und Maschine. In: Nova Acta Leopoldina, Neue Folge Nr. 206 Band 37/1, S. 451 ff. J.A. Barth, Leipzig 1972.
- [Szi29] Szillard, I.: Über die Entropieminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen. Zeitschr. für Physik 53 (1929) 11/12. S. 840 - 856
- [Thi67] Thiel, R.: Qualität oder Begriff. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1967
- [Völ01] Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Allgemeine Grundlagen für Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Shaker Verlag, Aachen 2001.
- [Völ03] Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 1 Grundlagen und Anwendung in Natur, Leben und Gesellschaft. Shaker Verlag, Aachen 2003.
- [Völ05] Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 2 Technik und vorelektronischer Medien. Shaker Verlag, Aachen 2005.
- [Völ07] Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag, Aachen 2007.
- [Völ07a] Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007. *Dies ist die digitalisierte und verlinkte Zusammenfassung der vier voranstehenden Bücher.*
- [Völ08] Völz, H.: Kontinuierliche Digitaltechnik. Shaker-Verlag. Aachen 2008
- [Völ14] Völz, H.: Grundlagen und Inhalte der vier Varianten von Information. Springer Verlag. Wiesbaden 2014.
- [Völ14a] Völz, H.: Maßstäbe für die Zeit. Shaker Verlag, Aachen 2014
- [Völ15] Völz, H.: Zur Relativität der Zeit. GrKG. 56 (2015) H.2. S. 55 – 64
- [Völ16] Völz, H.: Das ist Zeit. Shaker Verlag, Aachen 2016
- [Völ17] Völz, H.: Das ist Information. Shaker Verlag Aachen 2017.
- [Völ19] Völz, H.: Speicher für Alles. Shaker Verlag, Düren 2019.
- [Völ20] Völz, H.: Von Information bis Kreativität. Shaker-Verlag Düren 2020
- [Völ20a] Völz, H.: Information und Medienwissenschaft. Shaker-Verlag Düren 2020
- [Völ5extra] Völz, H.: Weniger Störgeräusche durch Antischall. rfe 2005, H. 4, S. 35 – 37
- [Völ56] Völz, H.: RC-Generatoren. Elektron. Rundschau 10 (1956) 1, 21-24; 2, 49 – 52
 Der RC-Resonanzverstärker. Elektron. Rundschau 10 (1956) 3, 69 – 70
 Der Phasenschiebergenerator. Elektron. Rundschau 10 (1956) 10, 275 – 278; 11, 308 – 309
- [Völ59] Völz, H.: Beitrag zum Verstärker mit extrem kleinem Innenwiderstand. Frequenz 13 (1959) 7, 212 – 222
- [Völ66] Völz, H.: Elektronische Spannungsstabilisation. VEB Verlag Technik Berlin 1966, 2. Aufl. 1969
- [Völ67] Völz, H.: Betrachtungen zum Zusammenhang von Speicherdichte und Zugriffszeit. Wiss. Zeitschrift f. Elektrotechnik 9 (1967) H. 2, S. 95 – 107
- [Völ74] Elektronik für Naturwissenschaftler. Akademie Verlag Berlin 1974
- [Völ75] Völz, H.: Beitrag zur formalen Musikanalyse und -synthese. Beiträge zur Musikwissenschaft 17 (1975) 2/3, S. 127 – 154

- [Völ76] Völz, H.: Diskussionsbeitrag zur Information und Emotion. In: Philosophische und ethische Probleme der Biowissenschaften. Akademie - Verlag Berlin 1976, S. 269 – 277
- [Völ82] Völz, H.: Information I - Studie zur Vielfalt und Einheit der Information. Akademie Verlag, Berlin 1982
- [Völ83] Völz, H.: Information II, Theorie und Anwendung vor allem in der Biologie, Medizin und Semiotik. Akademie - Verlag Berlin 1983.
- [Völ88] Völz, H.: Entropie und Auffälligkeit. Wissenschaft und Fortschritt 38 (1988) 10, 272 – 275
+ Das Maß für Auffälligkeit und die Schönheit des Hauses. GrKG 33(1992) 2, 80 – 86.
- [Völ88a] Völz, H.: Fraktale - Ästhetik - Kunst. Spectrum 19 (1988) H. 8, S. 16-19
- [Völ89] Völz, H.: Elektronik - Grundlagen - Prinzipien - Zusammenhänge. 5. Aufl. Akademie Verlag, Berlin 1989
- [Völ89a] Völz, H.: Computer und Kunst. Reihe akzent 87. Urania - Verlag Leipzig Jena - Berlin 1989. 2. Aufl. 1990.
- [Völ90] Völz, H.: Computer und Kunst. Reihe akzent 87. Urania - Verlag Leipzig Jena - Berlin 1998. 2. Aufl. 1990
- [Völ91] Völz, H.: Grundlagen der Information. Akademie - Verlag, Berlin 1991
- [Völ94] Völz, H.: Information verstehen - Facetten eines neuen Zugangs zur Welt. Vieweg & Sohn, Braunschweig - Wiesbaden, 1994
- [Völ96] Völz, H., Ackermann, P.: Die Welt in Zahlen und Skalen, mit, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford, 1996
- [Völ99] Völz, H.: Das Mensch-Technik-System. Expert-Verlag, Renningen, Malsheim 1999
- [Wei77] Weizenbaum, J.: Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft. Suhrkamp, Frankfurt/M., 1977
- [Wel90] Wells, D.: Lexikon der Zahlen. Fischer Logo. Frankfurt a. M. 1990
- [Wie48] Wiener, N.: "Cybernetics or control and communication in the animal and the machine" Hermann, Paris 1948. "Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und in der Maschine", Econ - Verlag, Düsseldorf - Wien 1963. Econ - Verlag, Düsseldorf - Wien - New York - Moskau, 1992
- [Win89] Winograd, T. u. Flores, F.: Erkenntnis - Maschinen - Verstehen; Rotbuch - Verlag; Berlin 1989
- [Wuß97] Wußing, H. u.a.: Vom Zählstein zum Computer. Verlag Franz Becker, Hildesheim 1997
- [Zem75] Zemanek, H.: Elementare Informationstheorie. R. Oldenbourg Verlag, München - Wien 1975
- [Zem88] Zemanek, H.: Der Geist in der Flasche. Warum der Computer nicht ausschaut. Informationstechnik 30(1988) 1, S. 3 – 10.
- [Wit22] Wittgenstein, L.: Tractatus logico-philosophicus (dt. u. engl.). K. Paul, Trench, Trubner & Co, London 1922 (dt. Nachdruck: Suhrkamp-Verlag [Wiki1] „Internationales Einheitensystem“ download 7.1.21
- [Wit53] Wittgenstein, L.: Philosophical investigations (Philosophische Untersuchungen (dt. u. engl.) Blackwell, Oxford 1953 (dt. Nachdruck: Philosophische Untersuchungen. Suhrkamp-Verlag, Frankfurt/M. 1964
- [Wiki1] „Internationales Einheitensystem“ download 7.1.21
- [Wiki2] „Liste physikalischer Größen“ download 7.1.21 (*alle umfangreich aufgelistet*)
- [Wiki3] „Basisgröße“ download 7.1.21 (*insbesondere zu allen Größen und Basisgrößen*)
- [Wiki4] „Experiment“ download 18.1.21
- [Wiki5] „Langeweile“ download 7.2.21
- [Wiki6] focus.de/wissen/mensch/intelligenz/durchschnitts-iq-sinkt-die-menschheit-wird-immer-duemmer_id_9103645.html. download 01.07.2019.
+ welt.de/kmpkt/article168685677/Warum-die-Menschheit-scheinbar-wieder-duemmer-wird.html, download 01.07.2019.

[Wiki7] Wikipedia: „Judentum“ download 01.07.2019.

[Wiki8] Wikipedia: „Traum“ und „Tagtraum“ download 01.07.2019.

[Wiki9] Wikipedia: „Logik“ download 02.06.1021

Inhalt

1. Vom Ich zur Realität.....	1
2. Geschehen in der Realität	6
2.1. Unmittelbarer Weg durch Wahrnehmen und Messen.....	7
2.2. Aktive Einwirkungen bei Experimenten	14
2.3. Wissenschaft und Theorien.....	16
2.4. Nachweis von Wahrheit	23
3. Objekte und Änderungen erkennen mittels Speicher.....	25
3.1 Möglichkeiten und Grenzen des Gedächtnisses.....	27
3.2. Der Raum.....	31
3.3. Die Vielfalt der Zeit.....	33
3.3.1. Die Zählung der Zeit	33
3.3.2. Die subjektive Zeit	34
3.3.3. Die Eigen- bzw. Systemzeit	38
3.3.4. Die radioaktive Zeit.....	41
3.3.5. Gibt es eine universelle Zeit?	41
3.4. Voraussagen und Prognosen	43
3.5. Schwierigkeiten für Rückrechnungen.....	47
3.6. Über Anfang und Ende von Zeit.....	47
II. Der Mensch entsteht und begreift.....	49
4. Der Mensch erlebt die Realität	49
4.1 Vom Leben zur Hand.....	49
4.2. Entwicklung zum Denken.....	52
4.3. Die verbale Sprache entsteht und Vergleich mit a verbalen Varianten.....	53
4.4. Von der Sprache zu Schrift und Zahlen.....	56
4.5. Vergleich von Sprache, Schrift und Denken.....	58
5. Kognition: Bewusstsein, Wissen usw.	59
5.1. Wissen.....	60
5.2. Intelligenz	62
5.2.1. Intelligenz-Test (IQ).....	63
5.2.2. Intelligenz-Änderungen.....	64
5.2.3. Künstliche Intelligenz.....	65
5.3. Bildung.....	68
5.4. Kreativität.....	68
5.5. Die Wissenspyramide	70
III Vom Werkzeug zur Technik	73
6. Einführung der Kybernetik.....	73
6.1. Die Vielfalt der Verstärker.....	77
6.1.1. G-Verstärker mittels Austausch-Energie.	78
6.1.2. S-Verstärker mit Transistoren	81
6.1.3. Bipolar-Transistoren.....	81
6.1.4. Feldeffekt-Transistoren	83
6.1.5. Die verschiedenen MOS-FET	84
6.1.6. Betriebsarten elektronischer Verstärker	86
6.1.7. Transistorgeschichte	89
6.1.8. Beispiele für komplexe Verstärker.....	90
6.2. Wandlungen.....	94

6.2.1. Akustische Wandlungen.....	95
6.2.2 Bildvergrößerung und Visualisierung	98
6.3. Schaltungen.....	106
6.4. Speicher	110
6.5. Information.....	123
6.5.1. Die Informationsarten.....	125
6.5.2. Zur Vielfalt der Entropien	128
6.5.3. Die Auffälligkeit.....	130
6.5.4. Die beiden letzten Informationsarten	132
6.6. Von den Zahlen bis zur Informatik	132
6.6.1. Von den Zahlen zur Mathematik.....	133
6.6.2. Die Rechentechnik entsteht.....	139
6.6.3. Vom Programmieren zu Turing-Automaten	140
6.6.4. Church-These und Rekursion.....	142
6.6.5. Zeitkomplexität	145
6.6.6. Grundaufbau des Universal-Rechners.....	147
7. Bewertungen und Vorschläge.....	149
7.1. Bewertung von Eigenschaften	149
7.2. Zahlen für kontinuierlich bis digital	151
7.3. Logik und Widersprüche.....	152
7.4. Von Binär über Fehler bis Zufall.....	156
7.5. Zufall und Fehlerrate.....	159
7.6 Quantentheorie und Urknall.....	163
7.7 Rekursivität und Fraktale	169
<i>Literatur.....</i>	<i>176</i>
<i>Inhalt.....</i>	<i>181</i>
Anhänge.	