

Vorlesungsmaterial
von
Prof. Dr. Horst Völz

Daten und Grenzen der Speicher

Dieses Material beruht auf dem Buch

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007

Es ist u.a. auch vollständig auf der CD enthalten

Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007

Der Inhalt wurde erheblich verkürzt, auf den neuesten Stand gebracht und die Bilder farbig umgesetzt

Bei Angabe der Quelle ist das Material zum privaten Gebrauch voll nutzbar
Bei kommerzieller Nutzung bzw. in Publikationen usw. ist eine Abstimmung mit mir notwendig
Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12 verfügbar

Dieses Material wurde von aes.cs.tu-berlin.de/völz heruntergeladen
Email: [hvoelz\(at\).fpk.cs.tu-berlin.de](mailto:hvoelz(at).fpk.cs.tu-berlin.de) bzw. [h.voelz\(at\)infocity.de](mailto:h.voelz(at)infocity.de)
Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 296 31 07

Daten und Grenzen der Speicher

Das Prinzip

Die meisten heutigen Speicher beziehen sich auf **elektrische Signale** $f(t)$, die aufgezeichnet und wiedergegeben werden

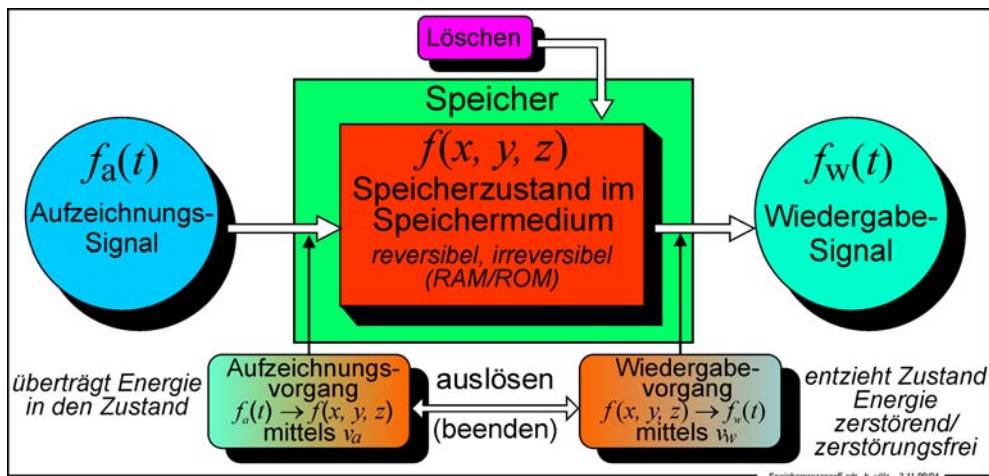
Als Signale können auch diskrete **Daten in zeitlicher Folge** $u_1, u_2, u_3 \dots$ betrachtet werden

Die meisten Signale können **diskret** angenommen werden oder werden entsprechend gesampelt

Langfristig aufbewahrt werden die Signale als **Speicherzustände** $f(x, y, z)$

Folglich sind zwei Prozesse und ein Zustand gemäß $f_a(t) \rightarrow f(x, y, z) \rightarrow f_w(t)$ zu unterscheiden

- Der **Aufzeichnungsvorgang** überträgt die Signalen in die Speicherzustände erzeugt $f_a(t) \rightarrow f(x, y, z)$. Hierbei wirkt streng lokal eine Energie auf das Speichermedium ein und erzwingt so den Speicherzustand
- Für den **Speicherzustand** $f(x, y, z)$ ist eine lang anhaltende Stabilität zu fordern. Ferner sollte je Bit ein möglichst kleines Volumen erforderlich sein.
- Der **Wiedergabevorgang** erzeugt wieder Signale gemäß $f(x, y, z) \rightarrow f_w(t)$, wobei möglichst genau $f_w(t) = f_a(t + \Delta t)$ gelten sollte. Δt ist der zeitlichen Abstand zwischen Aufzeichnung und Wiedergabe.



Primat der Speicherzustandes

Der Speicherzustand muss zumindest **zwei unterscheidbare Möglichkeiten** (0/1) besitzen

Sie müssen **primär**, also unabhängig von Aufzeichnung und Wiedergabe vorhanden sein

Andernfalls gäbe es keine **Ständigkeit der Natur**

Der **Aufzeichnungsvorgang** ist der zweite wichtigste Prozess, sonst gäbe in der Natur keine Veränderungen, Entwicklung
Für eine Speicherung ist **Irreversibilität** erforderlich, der Speicherzustand muss auch nach der Aufzeichnung erhalten bleiben
Dann wird nur **einmalig die Aufzeichnungenergie** benötigt

Der **Wiedergabevorgang** verlangt Messen und Erkennen, ist also die dritte Stufe der Speicherung

Varianten der Speicherzustände

- **Unumkehrbar** erzeugter Speicherzustand, typisch sind Lochkarten, -Bänder, bedrucktes Papier → ROM
- **Umkehrbar** erzeugter Speicherzustand, der **ohne weitere Energiezufuhr** bestehen bleibt, z.B. magnetische Hysterese, amorph $\leftrightarrow$ kristallin. Nur zum Ändern wird erneut Aufzeichnungenergie benötigt
- **Umkehrbar** erzeugter Speicherzustand, zum Erhalt muss **ständig Energie zugeführt** werden, z.B. Flip-Flop, S-RAM
- **Reversibler** Speicherzustand, der **recht lange Zeit** besteht, so dass er für die jeweilige Anwendung genügt
- **Reversibler** Speicherzustand, der nur **gewisse Zeit** besteht, der aber für Dauererhalt **ständig erneuert** werden muss (Refresh), was erhebliche Energie und Aufwand bedeutet (d-RAM)
- Speicherzustand, der **beim Lesen zerstört** wird, z.B. Ferrit-Kern-Speicher
- **Periodisch ablaufender** Speicherzustand, vorwiegend mit umlaufender Information, z.B. alte Umlaufspeicher
- **Quantenphysikalische** Speicher sind erst entstehen

Achtung! Genau genommen entspricht ein binärer Speicherzustand keinem Bit

Bit steht nämlich nach SHANNON für eine binäre Entscheidung

4 Speicherzustände ermöglichen $2^4 = 16$ unterschiedliche Signal, die nur bei Gleichverteilung mit 4 Bit zu entscheiden sind

Es fehlt noch immer eine entsprechende Maßeinheit für die Speicherkapazität

Dis ist ein ähnlicher Zustand, wie er um 1900 mit dem cgs-System vorhanden war

Speichern mit reversiblen Vorgängen

Reversible Zusammenhänge ermöglichen eigentlich keine Speicherung

Wenn nämlich die Aufzeichnungsenergie aufhört, kehrt das Material wieder in den Ausgangszustand zurück

Dies erfolgt zuweilen jedoch – wie bei **metastabilen Zuständen** – recht verzögert

Ein ähnlicher Effekt ist das langsame **Zurückkriechen**, wie es z.B. bei Gummibändern vorkommt

So kann auch für eine gewisse Zeit auch mit reversiblen Zusammenhängen eine Speicherung erfolgen

Im gewissen Sinn gehört hierzu auch die **Kondensator-Entladung**

Sie kann dynamisch durch **Refresh-Vorgänge** prinzipiell beliebig verlängert werden

Dies verlangt aber ständige **zusätzliche** Aufzeichnungs- und Refresh-Energie

Teilweise kann auch durch gute **Umwelt-Isolation** und **tiefe Temperatur** die Rückkehrzeit erheblich verlängert werden

Speichern mit periodischen Vorgängen

Hierbei **bewegen sich** Zustandsveränderungen in einem Material fort

So ist es möglich, an Ort x fortlaufend Zustände zu erzeugen und sie am anderen Ort y wiederzugeben

Auf dem Weg $\Delta l = y - x$ befinden dann mehrere Zustände, die quasi gespeichert sind

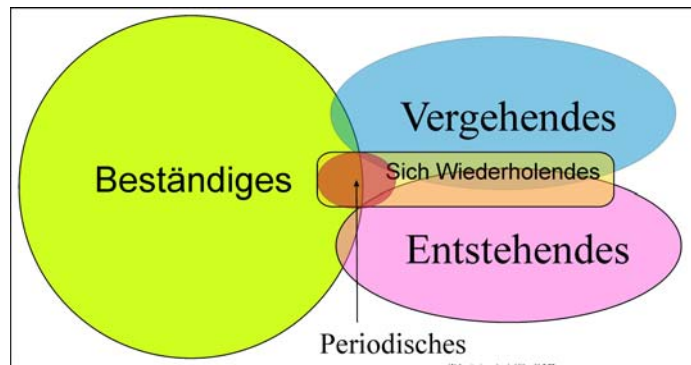
Werden die bei y wiedergegebenen Zustände erneut bei x aufgezeichnet, so bleiben alle Zustände vorhanden

Es liegt ein dynamische Speicher für diese Zustände vor

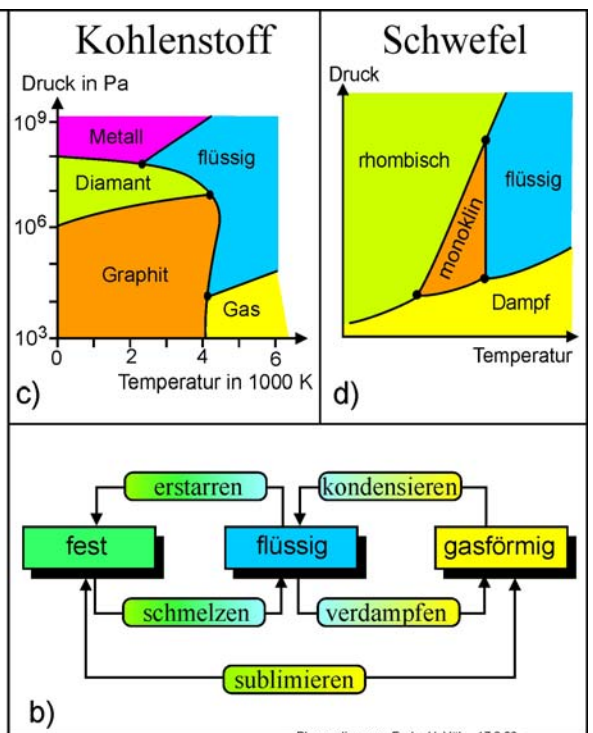
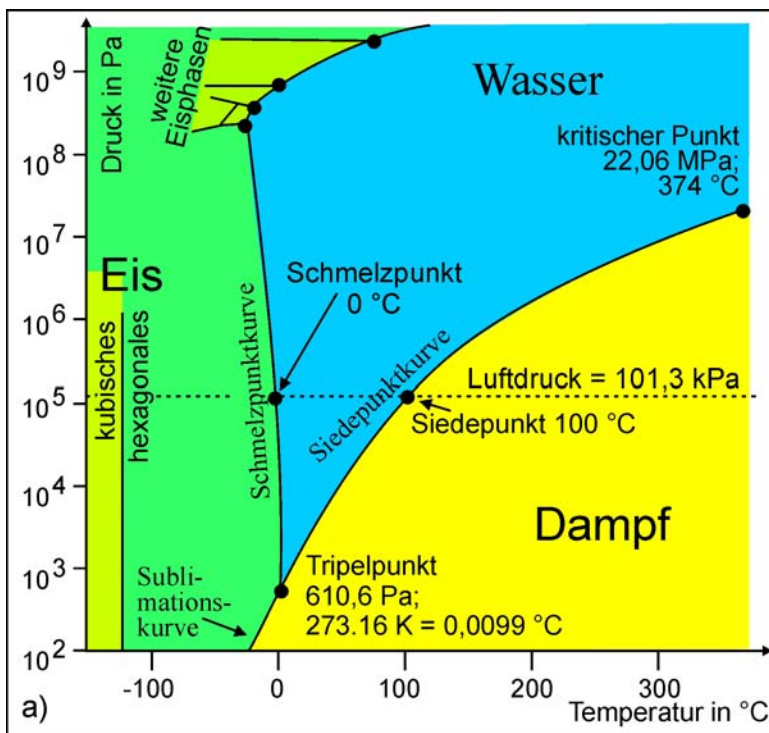
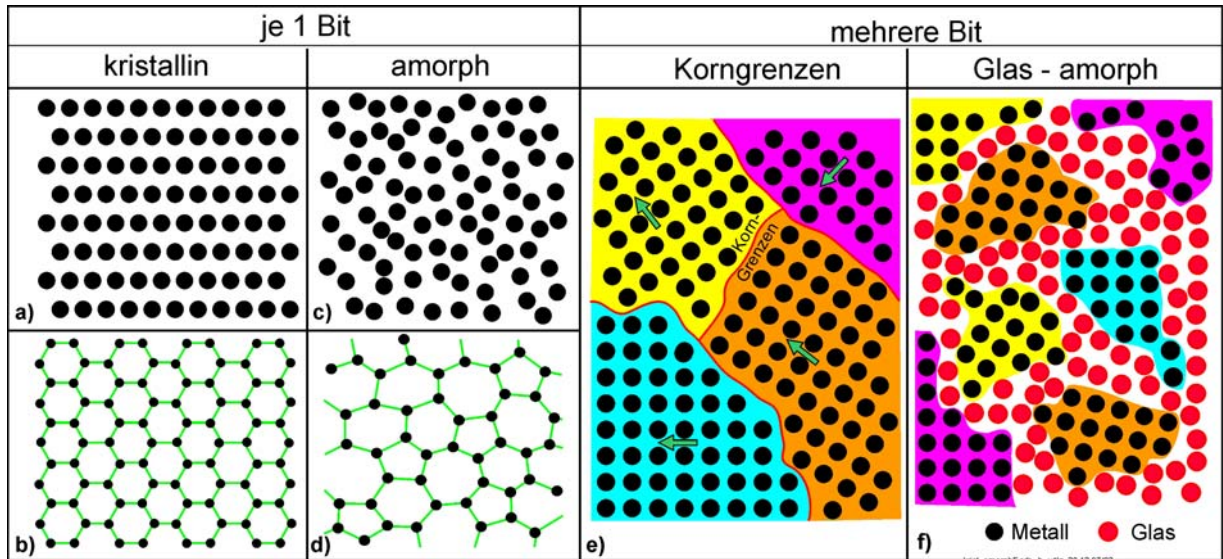
Sie gab es früher u. a. als **Laufzeitspeicher** mit Ultraschall und Hg

Die Aufzeichnungsenergie muss hierbei ständig zugeführt werden

Außerdem ist Energie für die Wiedergabeverstärker und das Refresh notwendig



Irreversibilität, Hysterese und Speicherung				
Feder	Kugel auf ebener Fläche	Kippschalter	Taster	Druckschalter
Länge ist proportional den Druck	Reibung, Kugel kann überall hin bewegt werden, bleibt dort liegen, Lage wenig stabil	zwei genau definierte, stabile Zustände, gezielt erreichbar, gut erkennbar	zwei genau definierte, Zustände, gut erkennbar, einer benötigt jedoch ständig Druck	zwei genau definierte, stabile Zustände, schwer unterscheidbar nicht gezielt erreichbar
keine Irreversibilität, keine Speicherung, nur aktueller Zustand	Ort nur bedingt zur Speicherung geeignet	sehr gut für Speicherung geeignet	nur bedingt zur Speicherung geeignet, da ständig Energie erforderlich	nur bedingt zur Speicherung geeignet, da Zustände nicht definiert erreichbar
aber Speicherung von Energie	beim Schreiben, also mit "Spur" teilweise sogar Rückschluß auf den Ablauf möglich			
≈ Kondensator		RS-Flipflop	Schmitt-Trigger	T-Flipflop



Bedeutung der Geschwindigkeit

Für die Aufzeichnung und Wiedergabe sind bezüglich des Speichermediums Geschwindigkeiten $v(x, y, z)$ notwendig

$$f_a(t) \cdot v_a(x, y, z) = f(x, y, z) \text{ bzw. } f(x, y, z)/v_w(x, y, z) = f_w(t)$$

Für $f_a(t) = f_w(t)$ muss $v_a(x, y, z) = v_w(x, y, z)$ erfüllt sein

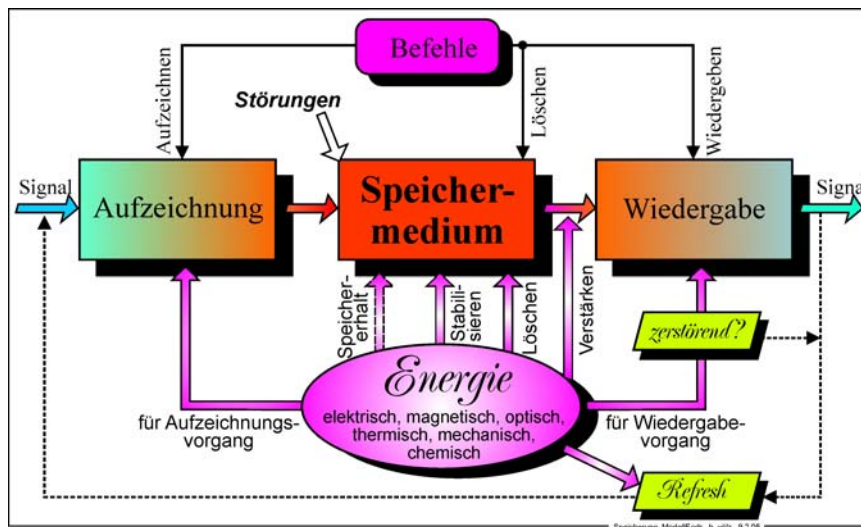
Die Bewegung (Geschwindigkeit) kann vielfältig realisiert werden. Meist benutzt sind:

- **Mechanische Bewegung**, bei der die Lage des Speichermediums und/oder des Aufzeichnungs-/Wiedergabekopfes oder beider verändert wird. Typisch hierfür sind Bandspeicher, Festplatten, Disketten, CD und DVD
- **Elektronischen Speicher** realisieren die Bewegung nahezu **virtuell**, meist über Adressierung, die vorwiegend matrixförmig geschieht. Eine inhaltsabhängige (assoziative) Adressierung ist noch ungebräuchlich
- **Lichtablenkung** geschieht z. B. bei Scannern und Laserdruckern. Künftig könnte auch direkte Lichtablenkung wichtig werden (holografische Speicher)
- Bei **Laufzeitspeichern** wird statt des Mediums oder der Wandler die gespeicherte Information selbst verschoben. Dies ist z. B. bei den CCD-Sensoren für die elektronische Fotografie üblich. Historisch gab es sie in vielen Varianten. In jeden Fall ist hierbei nur ein (**umlaufender**) **dynamischer** Speicherzustand vorhanden

Bedeutung der Energie

Energie wird bei der Speicherung vielfältig benötigt

- Für den **Aufzeichnungsvorgang** ist **Bewegungsenergie** notwendig, um die Information an definierte Orte zu bringen
- Der **Aufzeichnungsvorgang** muss im Speichermaterial **lokale Veränderungen** von elektrischen, magnetischen, optischen, thermischen, mechanischen, strukturellen und/oder chemischen Eigenschaften bewirken
- Im **Speichermedium** kann eine **Energie** notwendig sein, welche den Speicherzustand **aufrecht erhält**, z.B. Refresh (statische $\leftrightarrow$ dynamische Speicher)
- Im **Speichermedium** muss eine **Energieschwelle** vorhanden sein, welche die erreichten Eigenschaften des Speicherzustands gegenüber Störungen möglichst lange stabil hält
- Auch bei der **Wiedergabe** ist – um die gewünschte Information zu finden – **Bewegungsenergie** notwendig
- Der **Wiedergabevorgang** entspricht einer Messung, die den **Speicherzustand** energetisch **beeinflusst**
- Damit der **Wiedergabevorgang** den Speicherzustand möglichst wenig verändert, ist eine **Signalverstärkung** nützlich
- **Zerstörende Wiedergabe** und **Umlaufspeicher** erfordern ein Refresh- und Bewegungsenergie
- **Löschen** von Information erfordert ebenfalls Energie

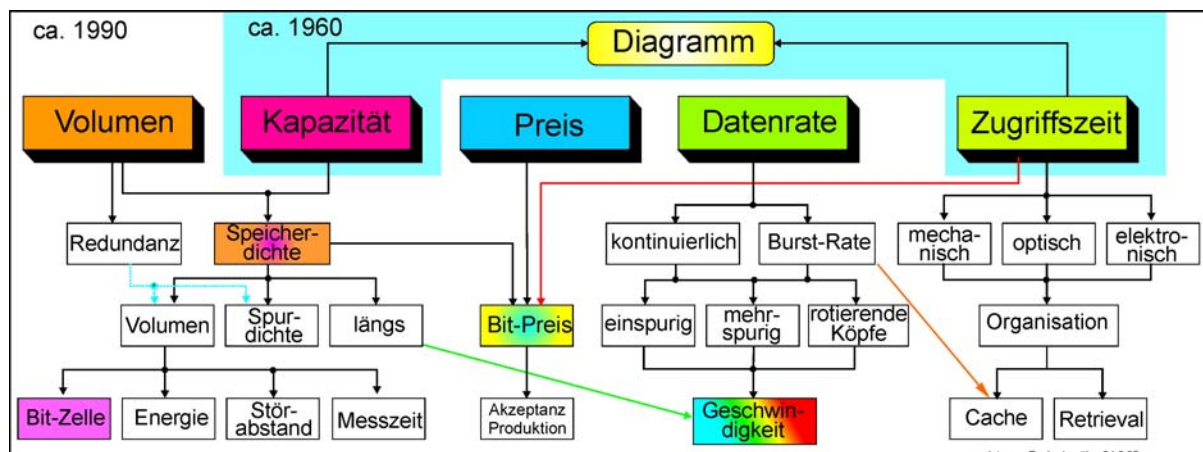


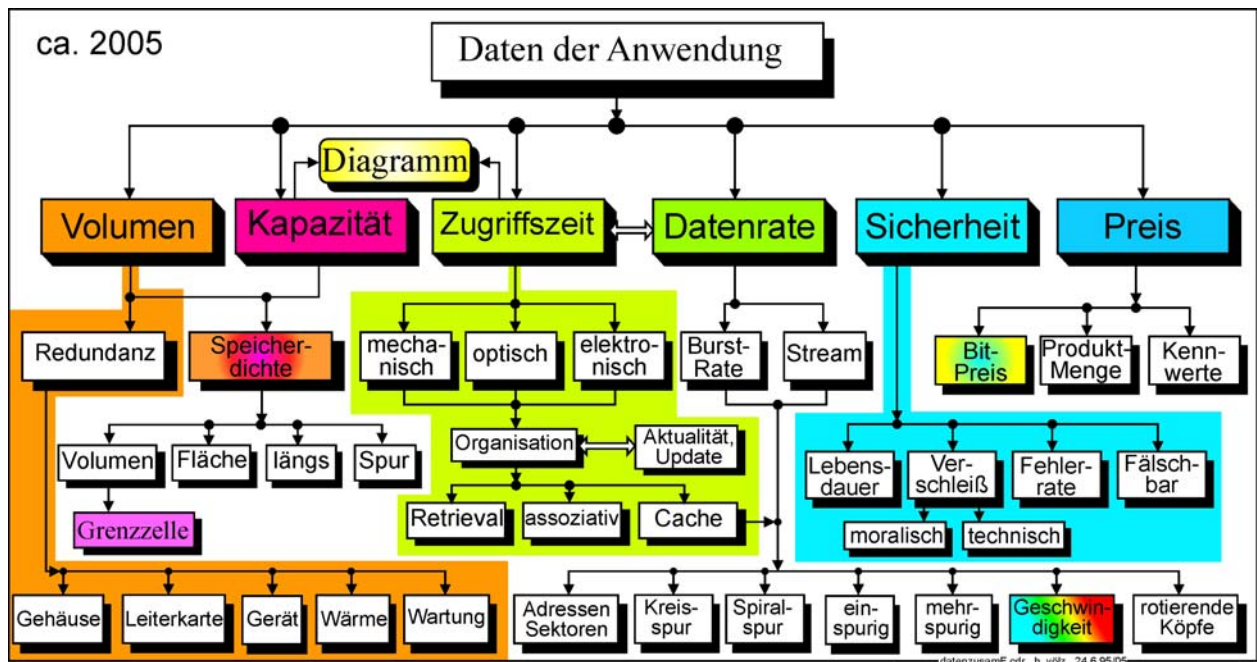
Daten der Speicher

Im Laufe der Entwicklung wurden **immer mehr Daten** für Speicher wichtig. Natürlich sind die einzelnen Daten zumindest **teilweise voneinander abhängig**. Für die Daten gibt es **Grenzwerte**, die von bestimmten Bedingungen abhängen:

1. Wünsche für einen „idealen“ Speicher
2. **Theoretisch** (physikalische) **erreichbare** Grenzen für die Daten
3. **Technisch realisierbare** Daten
4. z.Z. **technisch erreichte** Daten
5. je nach **Anwendung** notwendige, erforderliche Daten

Die Reihenfolge ist so gewählt, dass die Leistungsfähigkeit von 1. bis 4. abnimmt. Die 5. Stufe kann sowohl weniger als auch mehr Leistungsfähigkeit als die 4. Stufe fordern





Für einen „idealen“ Speicher ist rein formal gewünscht

Eigenschaft	Maßeinheit	anzustreben
Speicherkapazität digital (analog)	Bit	$\rightarrow \infty$
Aufzeichnungsdauer	Stunden	$\rightarrow \infty$
Zugriffszeit	Sekunden	$\rightarrow 0$
Datenstrom (fortlaufend), Bandbreite	Bit/s; Hz	$\rightarrow \infty$
Volumen (Gerät und Medium)	m^3	$\rightarrow 0$
Daten-Aktualisierung, Update	Tage, Stunden	$\rightarrow 0$
Energieverbrauch (Medium, Gerät)	Watt	$\rightarrow 0$
Lebensdauer (Gerät, Medium)	Jahre	$\rightarrow \infty$
Fehlerrate	relativ	$\rightarrow 0$
Datensicherheit, Betriebssicherheit	relativ	$\rightarrow \infty$
Fälschbarkeit, Manipulierbarkeit	relativ	$\rightarrow 0$
Preis (total oder je Bit)	€	$\rightarrow 0$

Theoretische Grenzen

Die theoretischen Grenzen betreffen bzw. werden erzwungen durch:

- Erreichbare Speicherdichte** $\Leftrightarrow$ mögliche **Energiedichte im Medium** J/cm^3 , die noch von der **Massedichte** abhängt, die meist zwischen $0,1$ und $10 g/cm^3$ liegt
Theoretische Grenze ist EINSTEIN-Beziehung $E = m \cdot c^2$
- Stabilität** (Fehlerrate) bzw. **zeitliche Haltbarkeit** des Speicherzustandes $\Leftrightarrow$ gespeicherte **Energie/Bit** und Arbeits- bzw. Lager-**Temperatur**
- Erzeugbare Speicherdichte** $\Leftrightarrow$ räumliche, flächige **Energiekonzentration** bei der Aufzeichnung
- Wiedergebbare Speicherdichte** $\Leftrightarrow$ **Wirkungsgrad** des Wiedergabewandlers
- Wiedergabe zerstörend** (refresh erforderlich) $\Leftrightarrow$ starke **Wechselwirkung** zwischen **Wiedergabewandler** und **Speichermedium**
- Fehlerrate** bei der Wiedergabe $\Leftrightarrow$ **Sinal-Störabstand** auch Arbeitstemperatur

Klassisch-physikalische Grenzen

Heute übliche Speicherverfahren benutzen die **klassische Physik**

Dadurch ist eine **deterministische (zuverlässige, fehlerfreie) Speicherung** gesichert

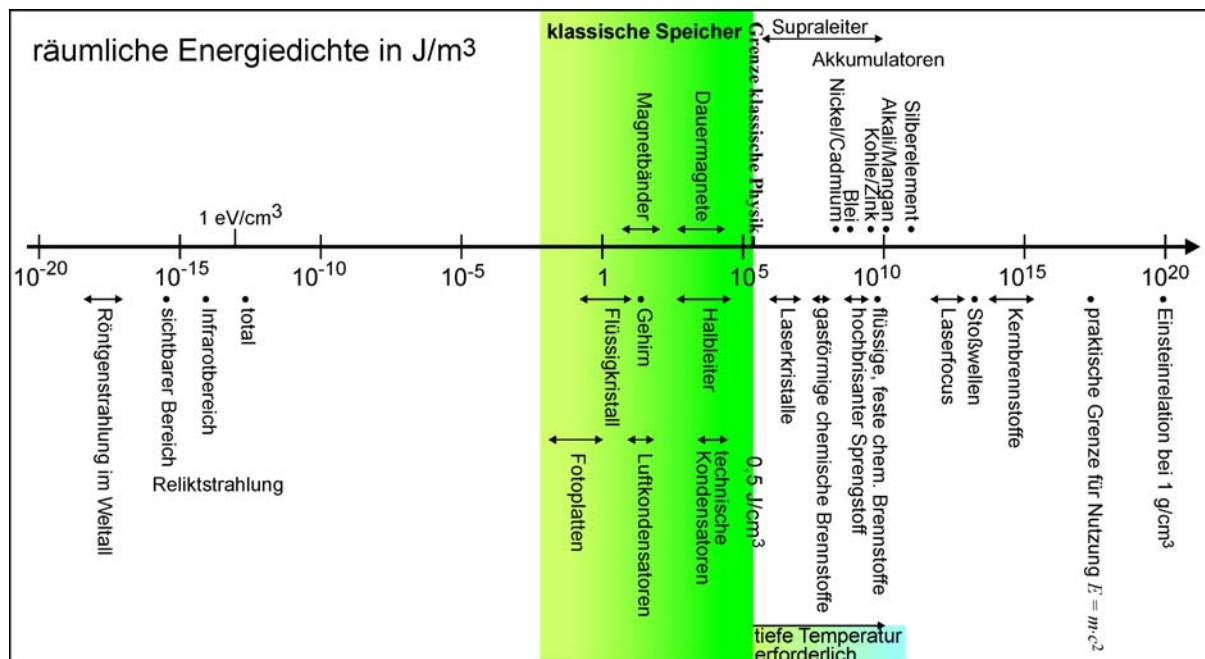
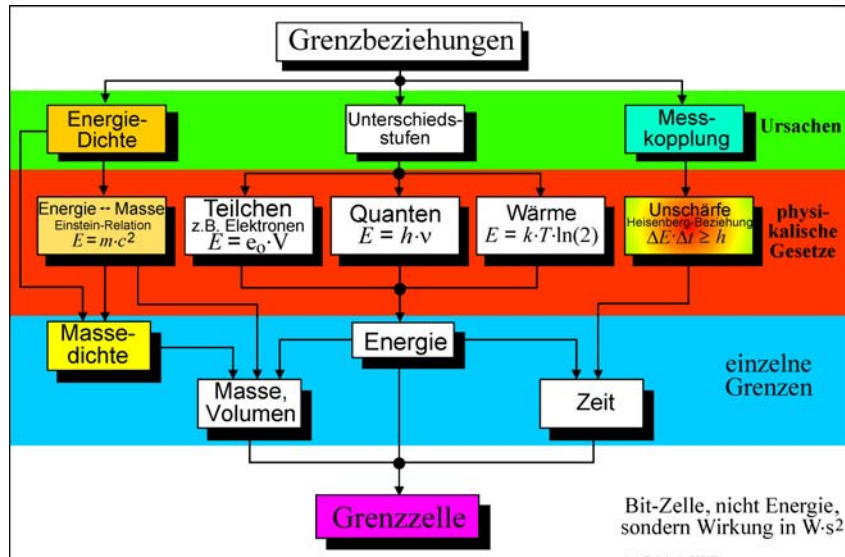
Hierzu sind etwa 1000 Atome notwendig $\rightarrow$ Volumen etwa $10^{-20} cm^3$

Bei Zimmertemperatur ($\approx 300 K$) ist es nicht möglich, eine Energiedichte von $\approx 0,5 J/cm^3$ zu überschreiten

In einem **magnetische Material** ist auch theoretisch nicht mehr Energie in unterzubringen

Bei Kondensatoren erfolgt ein Durchschlag bei allen bekannten Dielektrika

Allerdings ermöglichen einige Effekte bei **tiefen Temperaturen** höhere Energiedichten



Unterschiedsstufen

Um einen Unterschied (1 Bit) zu erzeugen, existieren zumindest drei Möglichkeiten

- **Elementarteilchen**, u.a. Elektronen, Atomen oder Molekülen als 1/0 Teilchen oder einzelne Quantenzustände wie Terme oder Spin
- **Quantenenergie** entsprechend $h \cdot \nu$, $m \cdot c^2$ oder $m \cdot v^2/2$
- Störgrenze infolge der **thermischen Energie**

Bewusst vereinfachte (anschauliche) **quantentheoretische** Betrachtung mittels zweifach entarteten Systems
Vor der Messung (Wiedergabe) befindet sich die „Kugel“ mit der Wahrscheinlichkeit $1/2$ in einem der beiden Zustände
Gemäß BOLTZMANN-Gleichung gilt dann

$$S_{Vor} = k \cdot \ln(1/2) = -k \cdot \ln(2).$$

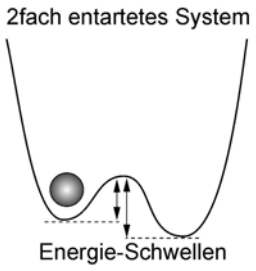
Nach der Messung steht der Zustand (Lage der Kugel) fest, und daher gilt

$$S_{Nach} = k \cdot \ln(1) = 0.$$

Differenz beider Aussagen (Zeitpunkte) entspricht der für 1 Bit notwendigen thermodynamischen Entropie-Änderung ΔS
Bei der absoluten Temperatur T , ergibt sich dazu die Energie (in der Wärmelehre Q statt E bzw. W)

$$\Delta Q = \Delta S \cdot T = k \cdot T \cdot \ln(2)$$

Zimmertemperatur $\approx 300 \text{ K} \rightarrow$ für 1 Bit: $3 \cdot 10^{-21} \text{ J}$, 0,02 eV oder Photonen mit $4 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ bzw. $\lambda = 70 \mu\text{m}$

Bit-Energie aus thermodynamischer Sicht		
Boltzmann-Formel	$S = k \cdot \ln(W)$	2fach entartetes System  Energie-Schwellen
Vor der Messung	$S = k \cdot \ln(0,5) = -k \cdot \ln(2)$	
Nach der Messung	$S = k \cdot \ln(1) = 0$	
Wärme-Menge, die bei der Messung verbraucht wird	$\Delta Q = \Delta S \cdot T = k \cdot T \cdot \ln(2)$	Es bedeuten: S = thermodynamische Entropie W = Zustands-Wahrscheinlichkeit k = Boltzmann-Konstante T = absolute Temperatur

Informationstheoretische Ableitung

In einem Übertragungskanal der Bandbreite B tritt bei der absoluten Temperatur T eine **thermischen Störung** auf:

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

(k = BOLTZMANN-Konstante). Bei einer Nutzleistung P_N beträgt die dann mögliche SHANNON-Kanalkapazität

$$C \leq B \cdot \lg\left(\frac{P_N + P_S}{P_S}\right).$$

Das Verhältnis beider Leistungen kann durch einen Faktor z gemäß $P_N = z \cdot P_S$ ausgedrückt werden. Dann gilt

$$C = B \cdot \lg(1+z).$$

Und weiter

$$\frac{P_N}{C} = k \cdot T \cdot \frac{z}{\lg(1+z)}.$$

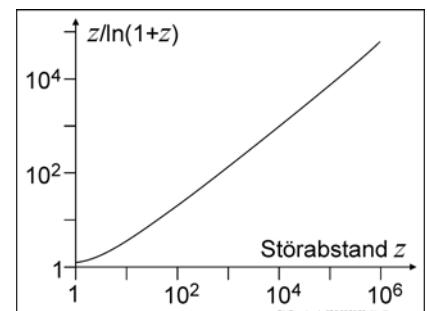
Dies Verhältnis wird in W je Bit/s bzw. J/Bit gemessen → Energie/Bit.

Der Term $z/\ln(1+z)$ kann in eine Reihe entwickelt werden:

$$\frac{z}{\ln(1+z)} = \frac{1}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{3} - \frac{z^3}{4} \pm \dots} \quad \text{mit} \quad 1 < \frac{z}{\ln(1+z)} \xrightarrow{\lim z=0} 1.$$

Für $P_N = P_S \Rightarrow z = 1$ (bedeutet ∞ Dekodierzeit) folgt ebenfalls

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



Zeiteinfluss

Bei der Wiedergabe ist die Wechselwirkung zwischen Speicherzustand und Mess-, Wiedergabegerät wichtig

Gemäß der HEISENBERG-Unschärfe (WERNER KARL HEISENBERG; 1901 – 1976) geht dabei auch die Messzeit Δt ein:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h.$$

$h \approx 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J·s ist die PLANCK-Konstanten die (MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK; 1858 – 1947). Mit oben folgt:

$$\Delta t \geq \frac{h \cdot \ln(1+z)}{k \cdot T \cdot z} \approx \frac{6,9 \cdot 10^{-11}}{T \cdot z}.$$

Für Zimmertemperatur ($T \approx 300$ K) und Störabstand 60 dB ($z \approx 1000$) folgen $\approx 2 \cdot 10^{-16}$ s.

Technische Wiedergabezeiten sind durch zusätzliche technische Faktoren deutlich länger

Die Grenzzelle

Aus Energiedichte, Unterschiedsstufen und Messkopplung folgt schließlich die Grenzzelle der Speicherung. Sie besitzt die Dimension einer **Wirkung** ($W \cdot s^2 = J \cdot s$), ist also ein **Produkt aus Energie und Zeit**. Technisch ist dies Produkt bei elektronischen Schaltungen als **Schaltleistung $\times$ Schaltzeit** bekannt. Hohe Geschwindigkeit und Speicherdichte sind nicht gleichzeitig zu fordern. Eine Größe wächst auf Kosten der anderen, **Optimierung** ist notwendig! Ferner gilt: Je tiefer die **Temperatur** desto größer kann das Produkt aus Speicherdichte und Geschwindigkeit sein. ERWIN SCHRÖDINGER (1887 – 1961) fragte sich in „Was ist Leben“. Wieso sind die Nukleinsäuren (DNS) bei ihren sehr geringen **Energie-Schwellen** über eine hinreichend lange Zeit stabil? Doch wegen der Grenzzelle muss zusätzlich die sehr „langsame“ Duplikation (≤ 2000 Sequenzen/s) beachtet werden.

Grenze bei der Aufzeichnung

Bereist bei der Aufzeichnung muss eine hinreichende Energie auf die einzelne Speicherzelle wirken. Dies bedeutet eine entsprechende Energiekonzentration der Aufzeichnungsapparatur. Klassisch physikalisch ist die mit Bündelung von elektromagnetischer Strahlung (Licht) zu erreichen. Bei Apertur A_n und Wellenlänge λ gilt für den Brennfleck (Beugung)

$$\text{Durchmesser} \approx 0,6 \cdot \lambda / A_n, \text{ Länge} \approx \lambda \cdot A_n$$

Das Beugungsvolumen ist daher praktisch unabhängig von der Apertur

$$V_{Bg} \approx \lambda^3$$

Ein einzelnes Photon besitzt dann die Energie (ν Frequenz des Photons, $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s Lichtgeschwindigkeit)

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

Im Beugungsvolumen V_{Bg} herrscht daher die mittlere Energiedichte

$$w = \frac{E}{V_{Bg}} = \frac{h \cdot c}{\lambda^4} \cdot \rightarrow \lambda = \sqrt[4]{\frac{h \cdot c}{w}}.$$

Für eine Aufzeichnung muss sie mindestens die Energiedichte im Speichermedium erreichen. Bei der klassischen Grenze ($w \geq 0,5$ J/cm³) folgt die kürzeste anzuwendende Wellenlänge zu **25 nm** (fernes UV). Dieser Wert führt zum Grenzvolumen ≈ 500 nm³ und zu einer Speicherdichte $\approx 10^{22}$ Bit/m³. Die 25 nm erreicht die Halbleiterlithographie in der Strichbreite, in der Tiefe sogar weniger.

Ergänzungen

Durch **nichtlineare Optik**, **nichtklassische Beugungsverfahren** usw. sind ≈ 10 -fach bessere Grenzwerte möglich. Ferner könnten auch **Elektronenstrahlen**, **Materiewellen**, **Tunnelkraftmikroskop** usw. benutzt werden. Der obige Wert ist jedoch noch weit von technischen Realisierungen entfernt, daher ist hierzu z.Z. keine Betrachtung nötig. Eine nahe liegende Technik beginnt gerade eine Kombination von Magnetspalt und Magnetooptik zu benutzen. Aus theoretischer Sicht und in allen praktischen Fällen gilt immer für die Speicherdichte

$$S_{\text{Aufzeichnung}} (\rightarrow \infty) \geq S_{\text{Speicherzustand}} \text{ (klassisch } \approx 10^{26} \text{ Bit/m}^3) \geq S_{\text{Wiedergabe}}$$

Beständigkeit der Speicherung

Die zeitliche Beständigkeit eines Speicherzustandes hängt mit der Geschwindigkeit chemischer Reaktionen zusammen. Hierfür gilt die 1896 von SVANTE AUGUST ARRHENIUS (1859 - 1927) abgeleitete Gleichung

$$M = A \cdot e^{\frac{-E_A}{k \cdot T}}.$$

M ist die relative Konzentration (Menge), A eine charakteristische Konstante, $k \approx 1,38066 \cdot 10^{-23}$ J/K die BOLTZMANN-Konstante (LUDWIG BOLTZMANN; 1844 - 1906), T die absolute Temperatur in K.

Bei einer Aktivierungsenergie E_A ergibt sich für die **Halbwertszeit** der Reaktion

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

Die Zeitkonstante t_0 hängt von vielen Parametern, u.a. Umweltisolierung ab.

Für Elektronenbahnen beträgt sie etwa $3 \cdot 10^{-15}$ s und für Gitterschwingungen ca. 10^{-4} s

Fehlerrate

Die Halbwertszeit entspricht 50 % Datenverlust. Die nutzbare Speicherzeit ist also sehr kleiner
 Sie wird besser durch eine **Fehlerrate** beschrieben. Hierzu kann die MAXWELL-BOLTZMANN-Verteilung benutzt werden
 1860 für ein ideales Gas mit nur einer Molekülsorte der Masse m von JAMES CLERK MAXWELL (1831 – 1879)
 Danach besitzen Teilchen mit der Energie W die relative Wahrscheinlichkeit

$$f(W) \cdot dW = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (k \cdot T)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{W} \cdot e^{-\frac{W}{k \cdot T}} dW.$$

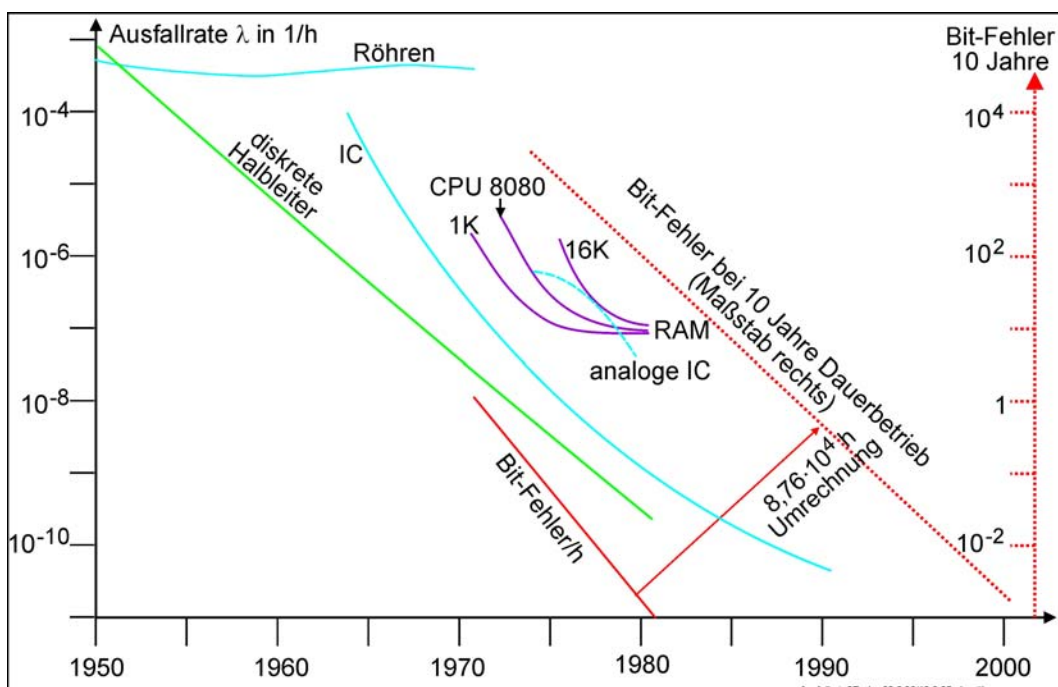
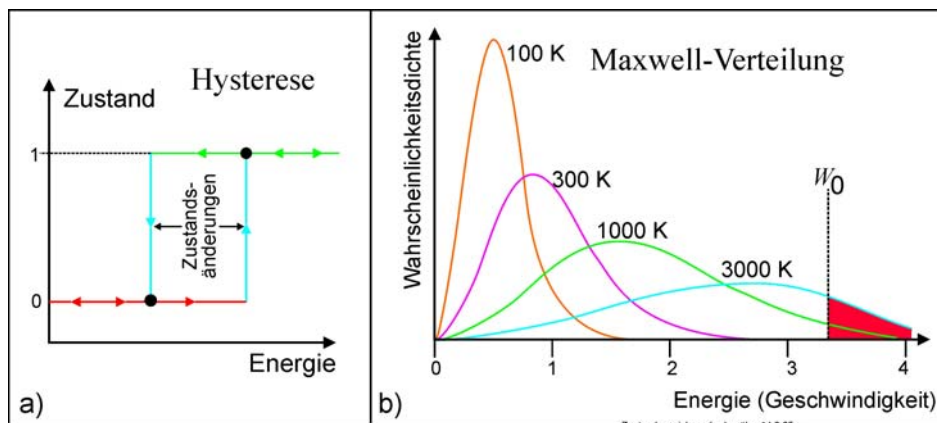
Die Stabilität eines Speicherzustandes mit W_0 ist nur durch Teilchen gefährdet, mit $W \geq W_0$
 Das Maximum der Geschwindigkeitsverteilung (Energie-Maximum) liegt bei

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m}} \quad \text{bzw.} \quad W_{\max} = k \cdot T.$$

Für die Fehlerwahrscheinlichkeit ist über alle Teilchen mit einer $W \geq W_0$ zu integrieren
 Sie entspricht der Fläche des „Schwanzes“ unter der Verteilungskurve

$$F(\geq W_0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{W_0}{k \cdot T}} \cdot e^{-\frac{W_0}{k \cdot T}}.$$

Bei dieser Rechnung ist eine ideale Rechteck-Hysterese vorausgesetzt
 Andernfalls wird die Fehlerrate größer



Speicherkapazität und Zugriffszeit

Zu Beginn der technischen Entwicklung waren nur die Speicherkapazität und Zugriffszeit bedeutsam

Zugriffszeit ist hier vereinfacht, jene Zeit, die vom Aufruf einer Adresse bis zum Erhalt der dortigen Daten vergeht

1960 konnte ich zeigen, dass die damals bekannten Speicher nur einem engen Kapazitäts-Zugriffsbereich herzustellen waren
Entsprechende „Flächen“ gibt es bis heute für alle Speicher, sie verlagern sich mit der Entwicklung

Um 1970 wurde deutlich, dass drei Zugriffsgrenzen zu unterscheiden sind

1. für **elektronische** Speicher $\ll 1 \mu\text{s}$
2. **mechanisch bewegte** Speicher $\geq 1 \text{ ms}$
3. Speicher mit **menschlichem Zugriff** $\geq 1 \text{ s}$
4. heute sollte hinzugefügt werden **optisch, Tieftemperatur und Quanten** $\leq 1 \text{ ps}$

Ferner zeichneten sich erstmal Grenzen für die erreichbare Speicherkapazität bei etwa 10^{15} bzw. 10^{20} Bit ab

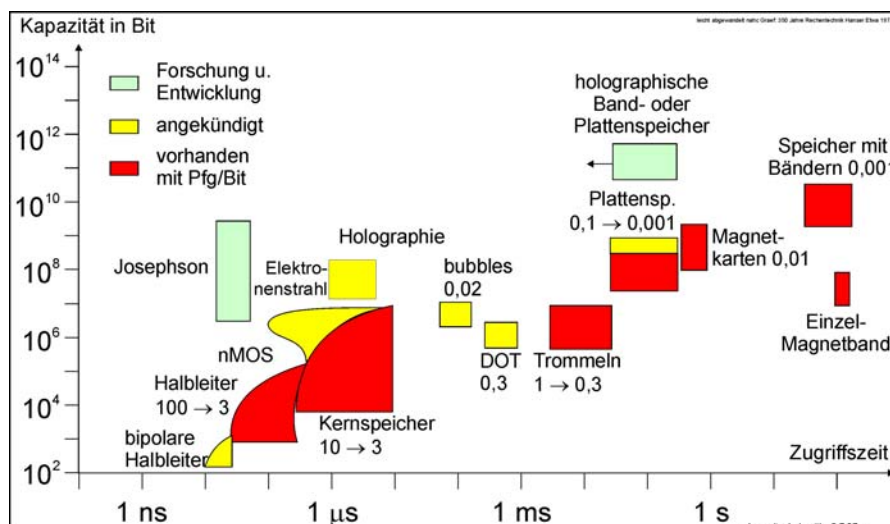
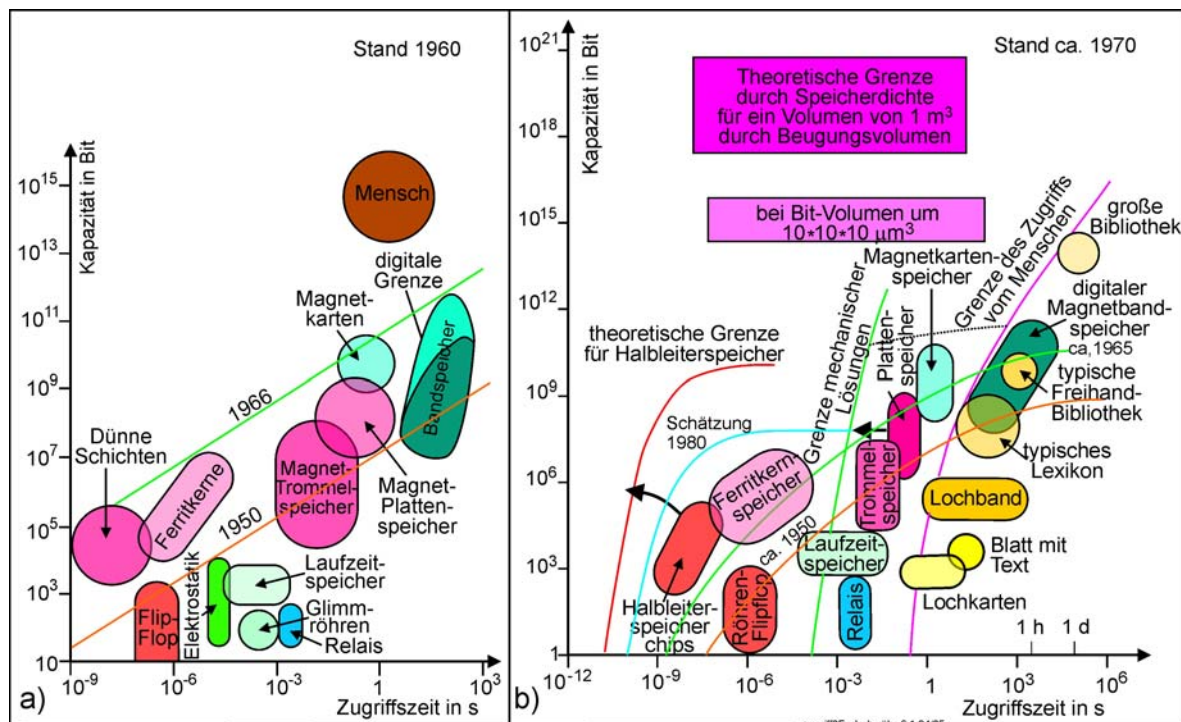
Auch die neuronale Speicherung, sowie unser Gedächtnis war mit etwa konstanter Zugriffszeit um 0,1 s einzuordnen

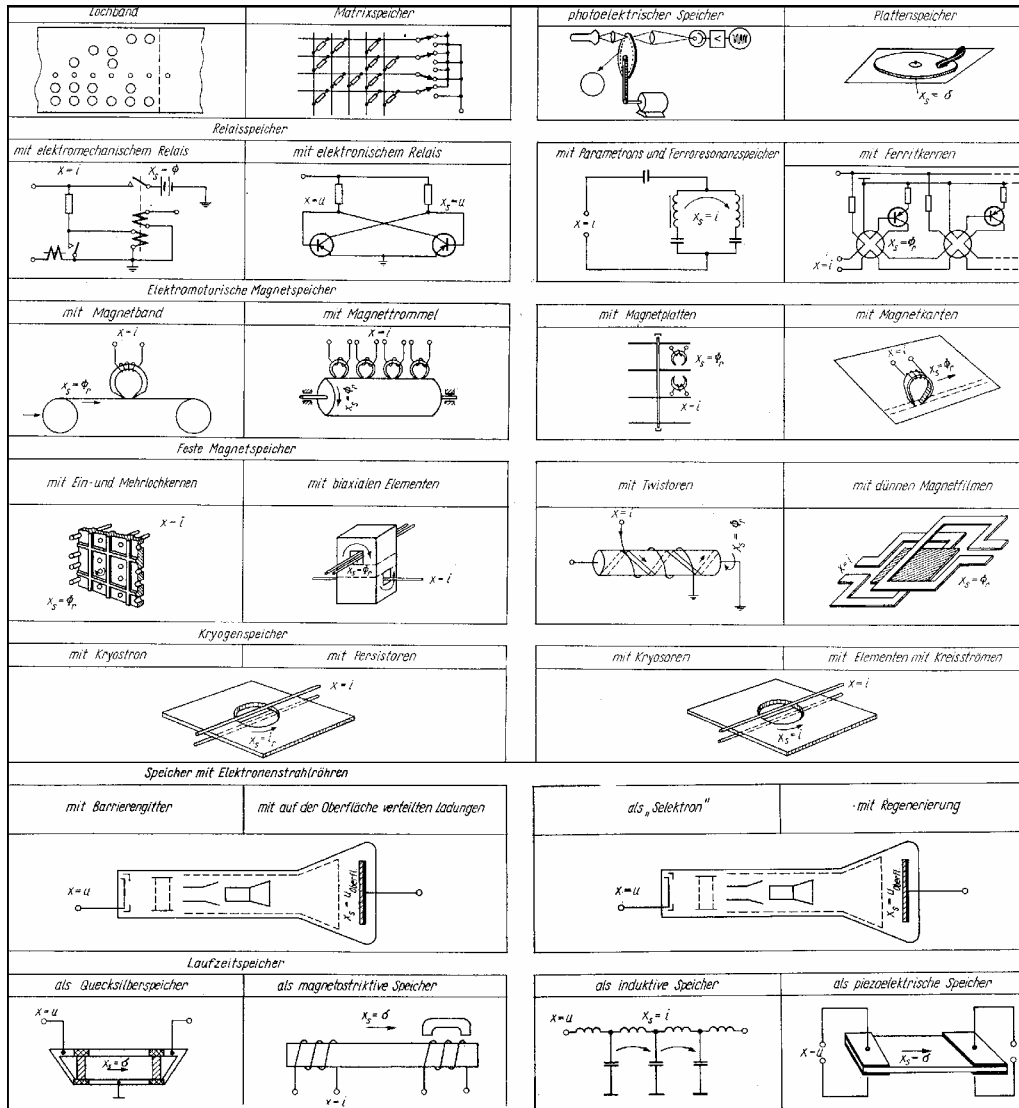
Für die Genetik ergab wegen der betont seriellen Verarbeitung ein konstanter Quotient $C/T_Z \approx 2000$ Nukleotide/s

So einen Quotienten gibt es auch für obere Grenzen aller, zu einer Zeit verfügbaren technischen Speicher

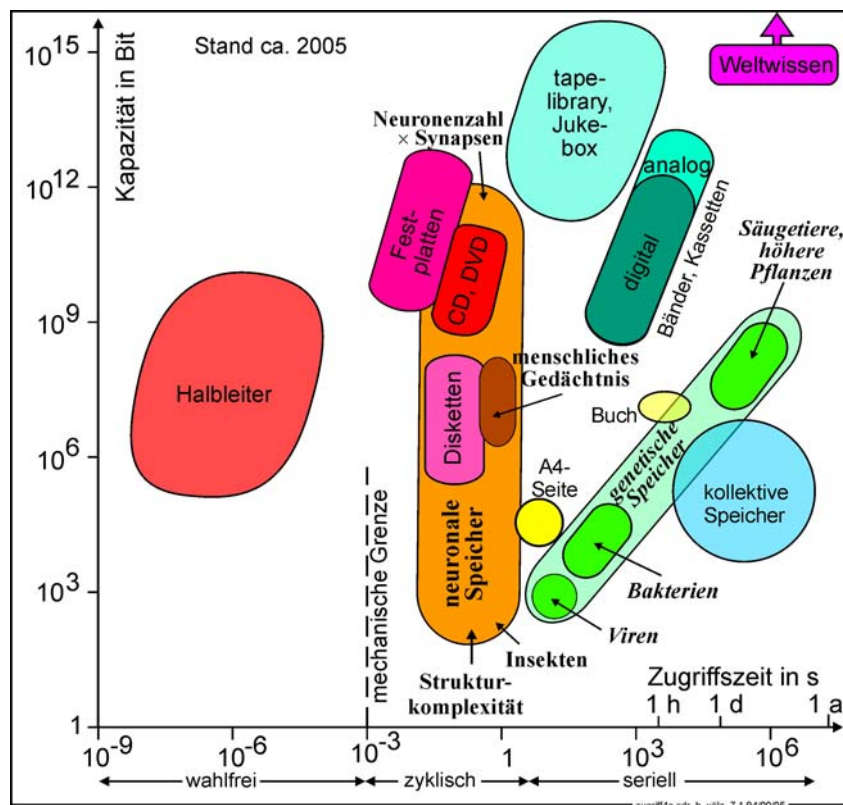
Er wird **Kapazität-zugriff** genannt und ist trotz seiner Dimension in Bit/s keine Datenrate!

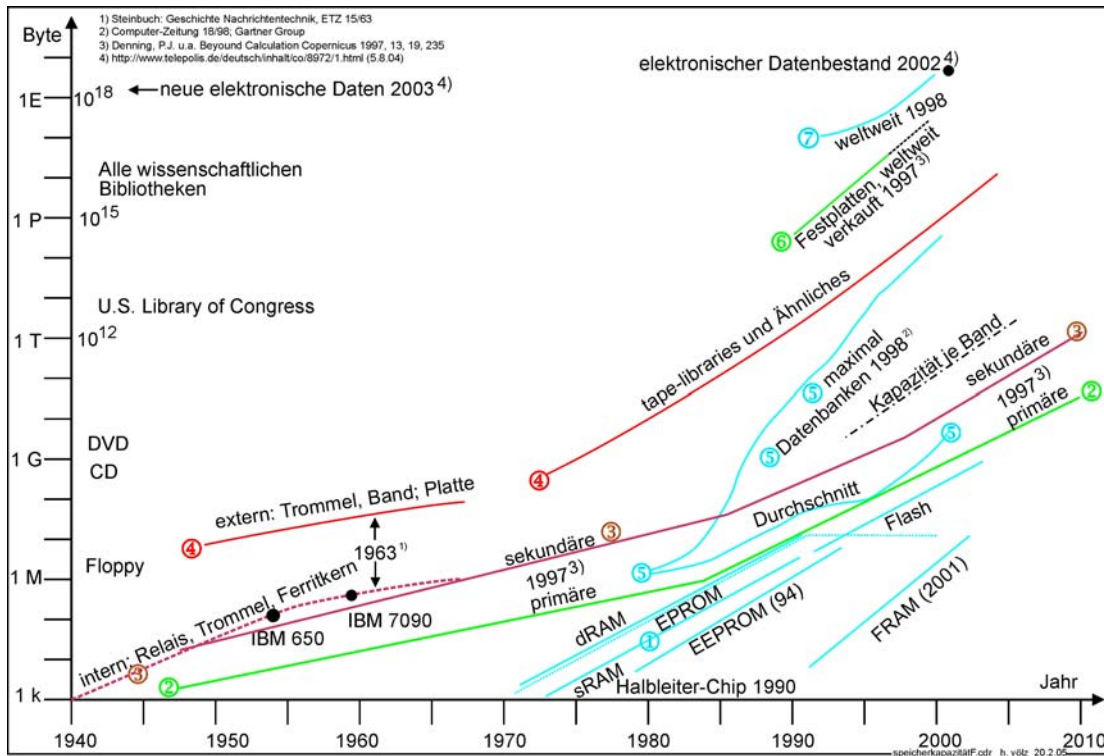
Jahr	1950	1965	1980	2000
Bit/s	10^7	10^9	10^{11}	10^{13}





Lerner 1970





Einteilung der Speichermedien

- ① **Halbleiterchips** erst ab etwa 1975 verfügbar: dRAM, sRAM, EPROM, EEPROM und Flash
- ② **Primäre Speicher** = **Arbeitsspeicher von Rechnern** erst mit Heimcomputer (ab ca. 1975) und PC (ab 1981), steiler Anstieg um 1985. Bei Großrechnern mit Elektronenröhren usw. zunächst ähnlich
- ③ **Sekundäre** = früher **interne** Speicher: Speicherausbau eines Rechners. Heute vor allem Festplatten
- ④ Für **Backups** usw. große Speichereinrichtungen mit eigenem Stellplatz oder gar speziellen Räumen. U.a. Roboter gesteuerte **tape-libraries**, Juke-Boxen, CD-ROM-Archiven usw. setzen ab 1975 Tendenzkurve von Großrechnern fort

Ergänzungen

- ⑤ **Datenbanken** fassen viele Fakten und Dokumente für Recherchen zusammen
- ⑥ Umfang der weltweit **verkauften Festplatten**
- ⑦ Weltweiter **elektronischer Datenbestand**, aber immer noch weitaus mehr Daten auf Papier, Mikrofilm vorhanden

Benötigte Speicherkapazität

Bis etwa 1995 galten folgende Aussagen:

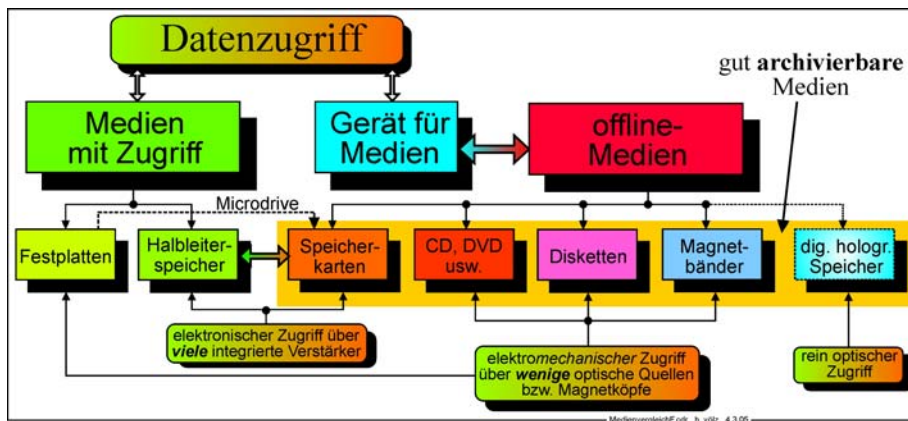
- Wie viel Speicherkapazität auch durch die Weiterentwicklungen der Technik zusätzlich bereitgestellt wird, stets fordern die leistungsfähigeren Betriebssysteme und Anwendungen wesentlich mehr
- Die Forderungen an die Speichertechnik steigen schneller als der Zuwachs durch weiterentwickelte Techniken

Doch dann trat eine unerwartete, bis heute nicht erklärte und zuweilen noch gar nicht erfasste Wende ein. Ziemlich plötzlich konnte preiswert mehr Speicherkapazität zur Verfügung gestellt werden, als genutzt wurde. Das geschah sogar etwa gleichzeitig für Halbleiterspeicher, Festplatten und optische Medien (CD). Preisverfall und -schwankungen waren die Folge, die bis heute anhalten (s. Speicherpreise!).

Varianten des Zugriffs

Folgende Techniken sind vorhanden bzw. in der Entwicklung:

- **Wahlfreier, adressbezogener** Zugriff in mehreren Varianten, z.B. elektronische Speicher (RAM)
- **Periodischer, zyklischer** Zugriff mit Kreis- bzw. Spiralspur, z. B. Festplatte, CD, DVD
- **Serieller Zugriff**, z.B. Magnetbänder und Genetik
- **Manuell, menschlicher** Zugriff, z.B. bei Büchern und Bibliotheken
- **Assoziativer, hoch paralleler** Zugriff mit nur indirekt definierter Zugriffszeit, elektronisch nur Muster vorhanden
- Elektronischer **Lichtablenkung**, erst in der Entwicklung
- **Holographischer** hochparalleler Zugriff (elektronisch) erst in der Entwicklung



Verschiedene Zugriffszeiten

Zeiten für **Aufzeichnung** sind oft deutlich **länger** als für **Wiedergabe**, z. B. Flash

Bei **zerstörender Wiedergabe** gilt das Umgekehrte, hier muss nämlich erneut die Aufzeichnung folgen, Refresh bei dRAM
Auch bei der Suche in **großen Datenbanken** dauert die Wiedergabe meist erheblich länger als eine Neuaufzeichnung

Meist sind **unterschiedlicher Anteile** des Zugriffs zu unterscheiden, z.B. bei der Festplatte:

1. Bestimmen der Spur
2. Ansteuern und Erreichen der Spur mit Kontrolle
3. Bestimmen und Warten auf den richtigen Sektor
4. a) **Lesen** des Sektors, Signalgenerierung und Dekodierung
b) Umschalten zum Aufzeichnen, **Aufzeichnen**, Kontrolle, Sektor als aufgezeichnet kennzeichnen
5. a) Ausgabe der Daten bzw. b) Bestätigung der Aufzeichnung

Speicher-Hierarchie

Große Speicherkapazitäten (Band) besitzen lange Zugriffszeiten, kleine Speicher (elektronisch) sind schnell

Deshalb ist eine Kombination mehrerer Varianten günstig

Das führt zur Speicherhierarchie, die inzwischen sehr weit ausgebaut ist, u.a. Information-lifecycle-management

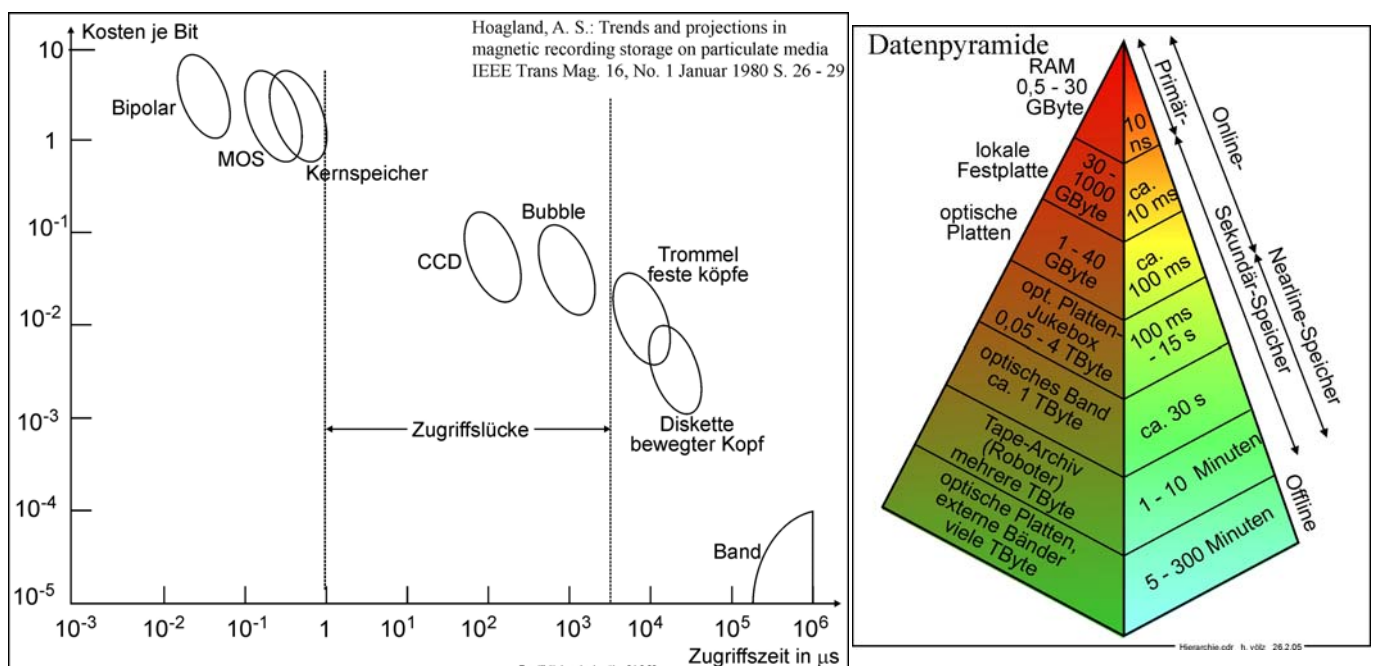
Um **1980 glaubten** mehrere Wissenschaftler, dass es eine nachteilige **Zugriffslücke** gäbe

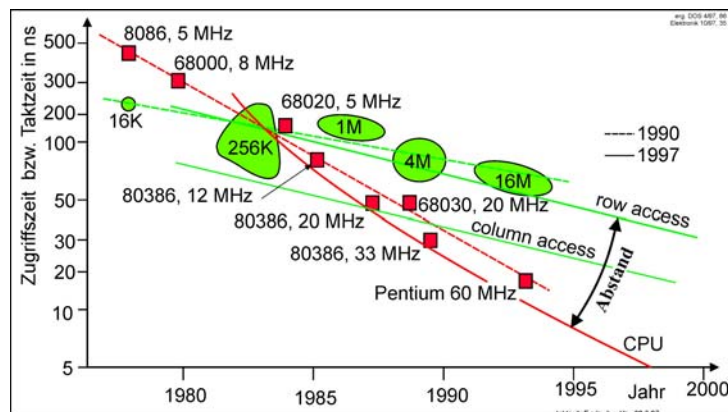
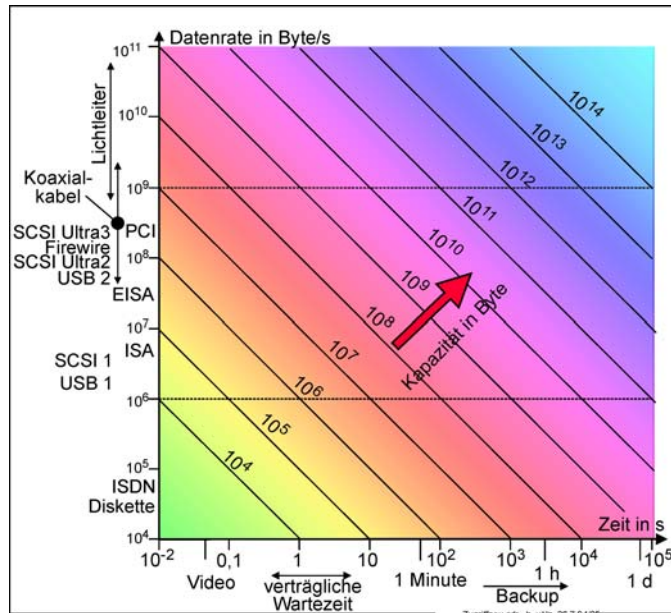
Deshalb wurden neuartige Speicher erdacht. Doch dies war ein Irrtum

Um **1985** machte sich dann eine andere „Lücke“ bemerkbar

Die **CPU** wurden **schneller** als die Speicher, Heute müssen CPUs etwa 500 Takte warten bis ein dRAM gelesen ist

Deshalb wurden sehr bald verschiedene **Cache**-Speicher eingeführt

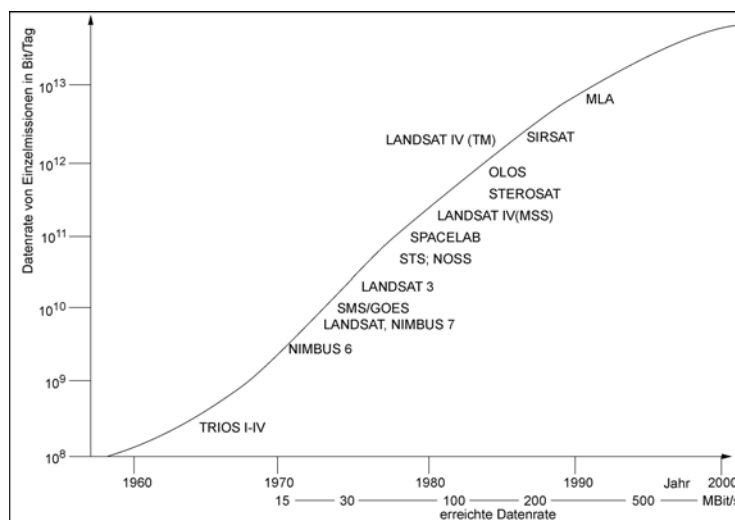




Zeit und Daten

Neben der Zugriffszeit sind im Laufe der Zeit dazugekommen

- **Datenrate** als anhaltender Stream (z.B. von Band oder CD, DVD) oder kurzzeitige als Burst (z.B. von einem Sektor)
- **Haltbarkeit, Lebensdauer** eines Speichermediums z.B. durch Alterung und Abnutzung
- **Verfügbarkeit** der notwendigen Technik, technischer und moralischer Verschleiß
- **Archivierungszeit** für die Aktualität, Gültigkeit der Daten bzw. wie lange sie gesetzlich erhalten werden müssen
- **Update-, Aktualisierungszeit**, wann Daten durch neue ersetzt werden (müssen)
- **Backup** als Sicherheitskopie, z.B. täglich, wöchentlich usw. als Vorsicht gegenüber Havarien, z.B. „Spiegel“, besitzen Latenzzeit für Vernichtung, weil neues Backup angelegt



Aktualisierung

Daten haben je nach Anwendung und Inhalt unterschiedliche Lebensdauer

Besonders kurzlebig sind dagegen z.B. **aktuelle Tagesnachrichten** oder **Verkehrsmeldungen**

Fast täglich werden heute **Virendefinitionen** aktualisiert

Bei **Apotheken** genügte früher 14-tägig eine neue CD mit den aktuellen Medikamenten (Nebenwirkungen), jetzt Internet

Bei **Entwicklung von technischen Produkten** existiert meist ein komplexer Zyklus

Anfangs müssen viele Daten bereitstehen, andere Daten werden dabei ständig geändert

Bei der **Produktion** stehen viele Daten fest

Es folgt aber ein ständiger, jedoch deutlich langsamer **Änderungsdienst**

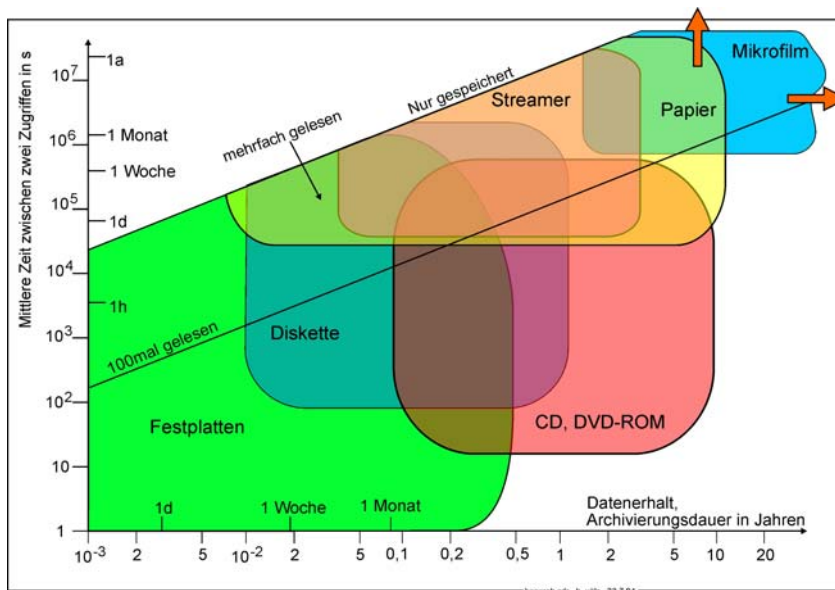
Wenn das Produkt **nicht mehr gefertigt** liegen nur noch Archivdaten vor, die sehr selten benötigt werden

Im Prinzip kann Update-Rate auch formal auf andere Bereiche ausgedehnt werden

Für eine **Tageszeitung** beträgt sie 1 Tag, für eine **Monatszeitschrift** 1 Monat

Bei Büchern kann der Abstand für Neuauflagen 1 bis 10 Jahre dauern

Ein **Kunstwerk** ist einmalig und wird daher gewöhnlich nicht mehr verändert



Backup

Es gibt viele **Backupstrategien** betreffen z.B. Anwendung, Umfang, Zeitabstand, total, differentiell

Sind keine Produkte sondern Strategien zur Datenklassifizierung und entsprechender, heißen u.a.

Hierarchisches Speicher-Management, High-end Storage Management (**HSM**), Information-Lifecycle-Management (**ILM**),

Direct Attached Storage (**DAS**), Hierarchical One Volume Manager (**OVM-H**), Storage Area Networks (**SAN**) usw.

Berücksichtigen in einem Modell **Parameter wie** Speicherkosten, Datenmenge, Notwendigkeit/Wichtigkeit für den

Betriebsablauf, Änderungsgeschwindigkeit, Gültigkeitsdauer, Vertraulichkeit, Geheimhaltung, Zugriffshäufigkeit,

Zugriffszeit, Datenrate, zulässige Wartezeit, Archivierungspflicht und Betriebsgeschichte

Solche Programme sollen mit verschiedenen Medien möglichst optimal Zugriffszeit, Datenrate und

Speicherkapazität in einer 2- bis 5-stufigen Hierarchien organisieren

Den Nutzern soll das System so transparent erscheinen, dass er das Gefühl erlangt, er habe zu allen benötigten Daten einen direkten Zugriff.

Typisch hierfür ist **Tape-Virtualisierung** vereint unterschiedliche physikalische Speicher unter einer gemeinsamen Oberfläche (Schicht) zusammengeführt werden. Sie erscheinen dem Anwender dann transparent als ein einziger Speicher

In der Praxis werden oft wichtige **Grundsätze des richtigen Backups nicht eingehalten**

Extrem **NASA**: Ihre 1,2 Millionen Magnetbänder der Mondlandung und des Shuttles sollen so schlecht archiviert, dokumentiert und gelagert gewesen sein, dass ihre Daten unwiederbringlich verloren sind

Deutsches **Bundesarchiv** in Koblenz gibt an, dass etwa 30 % der Datenbänder aus den DDR-Archiven unbrauchbar seien

Andererseits ist z. B. bekannt, dass selbst ausgegrabene Bänder der Nazizeit oft noch nutzbar waren

Fehler-Ursachen: 20 - 40 % Hardware, 35 - 50 % Bedienung, 10 - 15 % Software, ≈7 % Viren, 3 - 7 % Natureinflüsse, ≈8 % böswillige Attacken und 5 % Sonstiges

80 % der Datenverluste treten durch nur **scheinbar ordnungsgemäße Backups**

Besonders gefährdet sind **Streamer**aufzeichnungen mit rotierenden Magnetköpfen

Lebensdauer

Oft besitzen Daten eine längere Gültigkeit als die Lebensdauer des jeweiligen Speichers bzw. Mediums

Es sind zu unterscheiden: **Medium** $\leftrightarrow$ **Gerät**, **technischer** $\leftrightarrow$ **moralischer Verschleiß** sowie **Dateiformat** (Software)

Z.B. sind auf vielen **8-Zoll-Disketten** noch die Daten fehlerfrei vorhanden, Doch spätestens seit etwa 1990 sind Geräte zur Wiedergabe nicht mehr verfügbar, wenn, dann fehlt der Treiber

Heute sind kaum mehr Textdateien von Wordstar **lesbar**, ähnliches gilt für einige Grafikformate, Deshalb wird angestrebt, **Standardformate** zu schaffen, historisch PDF

Vor dem Ende der Lebensdauer müssen **Daten umkopiert** werden $\rightarrow$ Arbeitsaufwand und Organisation

Bei **Medien** kann ihr Versagen kaum vorher ermittelt werden, bestenfalls sind statistische Werte verfügbar

Gegenüber neuen Medien muss die extrem lange Haltbarkeit des Mikrofilms betont werden, können immer unmittelbar mit Lupe oder Mikroskop gelesen werden

Verfügbarkeit und Ausfallrate

Begriff Zuverlässigkeit betrifft u.a. die Authentizität von Aussagen, Nachrichten usw. sowie Pflichtbewusstsein

In der Technik wird sie bzgl. des Ausfalls von Einrichtungen und des Verlustes von Daten benutzt

Kenngrößen sind dann **Lebensdauer**, **Ausfallrate** und **Verfügbarkeit**

Die **Ausfallrate** ist ein gemittelter prozentualer Wert über ein großes Ensemble

Als **Lebensdauer** gilt dann die mittlere Betriebszeit bis zu einem Ausfall

Es besteht ein Unterschied zwischen analogen und digitalen Geräten, Techniken usw.

Analoge Einrichtungen zeigen sich langsam verschlechternde Werte, die zunächst noch Verwendung, Betrieb zulassen

Es kann dann leicht ein Zeitpunkt für Reparatur oder Austausch gefunden werden

Bei **Digitalen** Techniken und Daten erfolgt unvermittelt, meist unvorhersehbar ein totaler Ausfall

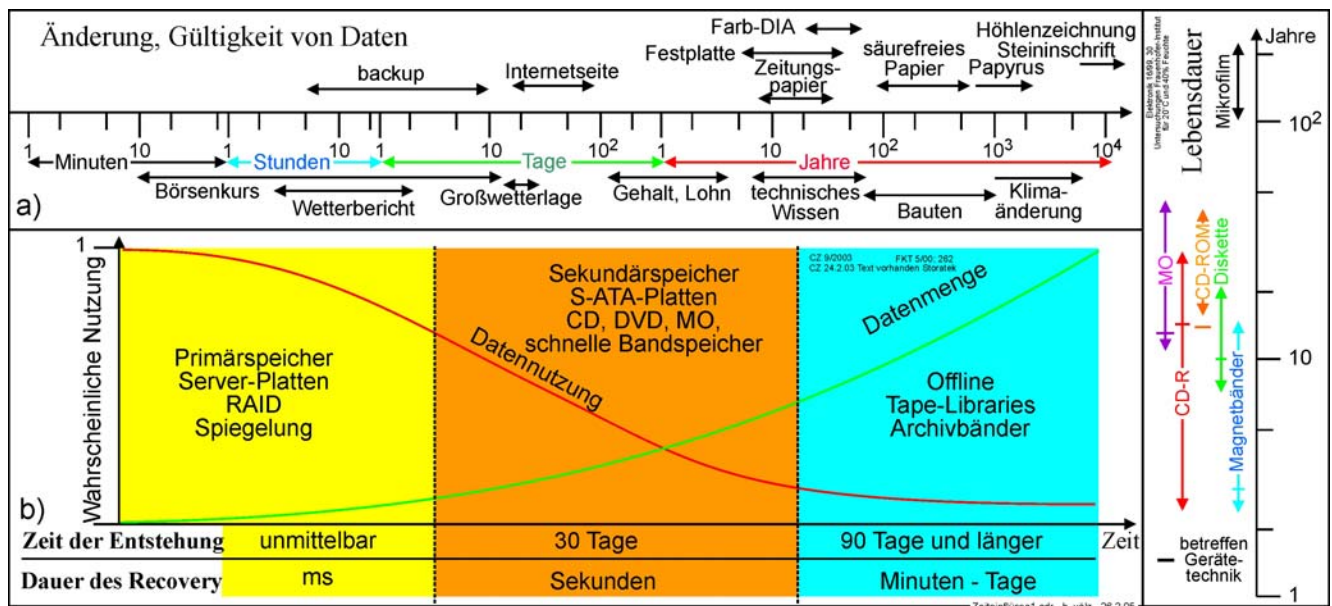
Zuweilen gibt es jedoch „**Warnungen**“, z.B. bei Festplatten durch erhöhte Temperatur und Geräusch

Eine gewisse Hilfe ist ferner die **Statistik** über ein großes Ensemble vergleichbarer Geräte oder Datensätze

Dabei kann ein einzelner Ausfall jedoch auch viel früher oder später eintreten

Doch über den Mittelwert lassen sich rechtzeitige Sicherheitskonzepte ableiten

Das Gerät wird einfach zu einem so festgelegten Zeitpunkt ausgetauscht oder zumindest genauer untersucht



Statistik der Ausfälle

Es sollen N_0 Elemente, z.B. Geräte, Bauelemente usw. einer Serienproduktion vorliegen

Statistisch gemittelt mögen nach der Zeit t noch $N(t)$ brauchbar sein

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-t \cdot \lambda}$$

λ ist die Ausfall- oder Fehlerrate (in 1/h, heute oft für 10 Jahre). Für sie beträgt Fehlerwahrscheinlichkeit $1 - 1/e \approx 63\%$, Allgemein gilt

$$\lambda(t) = \frac{1}{N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt}$$

In der Praxis treten zunächst **Frühausfälle** auf, die weitgehend auf mangelhafte Herstellung oder Materialfehler beuehen
 Nach etwa 100 bis 2000 Stunden folgt ein relativ flacher Verlauf mit konstanter Neigung, optimal für Anwendungen
 Wenn die Elemente an die statistische Grenze ihrer Zuverlässigkeit gelangen, wird der Abfall wieder steiler
 Dies ist die **Spät- bzw. Verschleißphase**.

Insgesamt ergibt sich die so genannte Badewannenkurve

Mechanische Bauelemente besitzen einen extrem kurze Zeit für die konstante Ausfallrate

Als häufige Fehlerquellen gelten mangelhafte Kontakte, Lötverbindungen usw.

Daher erbrachten die integrierten Schaltkreise den entscheidenden Fortschritt

8°-Regel und MTTF

Für gute Bauelemente dauert eine statische Untersuchung so lange, dass ihre Produktion ausgelaufen ist

Deshalb sind zeitraffende Untersuchungen unerlässlich

Erste Untersuchungen hierzu führte 1930 V. M. MONTSINGER an isolierenden Kabelpapieren durch

Danach gibt es einen exponentiellen Einfluss der Temperatur T auf die Lebensdauer t_L gemäß

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

t_0 und A sind experimentelle, materialabhängige Konstanten

Das Ergebnis war, dass sich die Lebensdauer etwa auf die Hälfte verkürzt, wenn die Temperatur um 8° erhöht wird

Weitere Begriffe der Zuverlässigkeit betreffen Zeiten, die mit der Ausfallwahrscheinlichkeit zusammenhängen

Der Abstand zwischen zwei Ausfällen heißt **TBF** (time between failure)

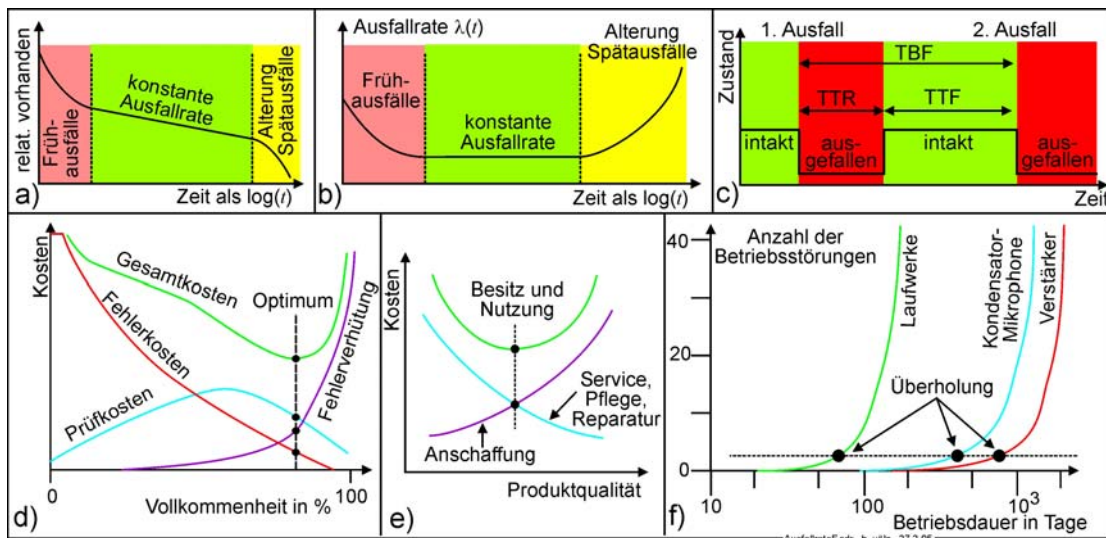
Die Zeitdauer einer Reparatur oder eines Austausches wird mit **TTR** (time to repair) bezeichnet

Aus beiden folgt die Betriebszeit bis zu einem Fehler als **TTF** = TBF – TTR (time to failure)

Die Kennzeichnung der Qualität erfolgt als Mittelwerte durch vorgesetztes M (meantime), als MTBF, MTTR und MTTF

Auf Stunden bezogen gilt im „konstanten“ Bereich **MTTF** = $1/\lambda$.

Ein Beispiel für günstige Zeitpunkte der Überholung wurde in den 50er in der Studientechnik des Rundfunks erfolgreich eingesetzt. Es ist auf 1 % Ausfall während der Sendung ausgelegt



Aufwand und Kosten

Bei der **Herstellung von Hard- und Software** wird die Qualität durch mehrere Einflüsse bestimmt

Der Umfang an Fehlerverrütung führt zu unterschiedlicher Vollkommenheit, Produktqualität

Die Kosten werden hauptsächlich durch drei Einflüsse bestimmt

Der Herstellungsaufwand steigt u.a. durch die Prüfmethode irgendwann steil an

Zusätzliche Kosten ergeben durch später zu leistende Garantieleistungen, sie nehmen steil mit der Vollkommenheit ab

Die **Summe aller Kosten** besitzt bei einer mittleren Vollkommenheit ein Minimum

Für den **Anwender** führt die Produktqualität zu einem anderen Minimum

Je höher sie und damit die Anschaffung ist, desto geringer werden die Kosten für Pflege, Service und Reparatur sein

Zur Speicherdichte

Volumen für Speicherung

Speichern ist Aufbewahrung von Etwas, egal ob es sich dabei um Stoff, Geräte, Energie oder Information handelt. Hierzu ist ein **Raum, Volumen** erforderlich, der die speicherbare Menge begrenzt, für Information gilt dann **Bit/m³**. Zahlenwerte sind typisch für den Stand der Technik verschiedener Verfahren und deren Grenzwerte. Es müssen drei Aspekte unterschieden werden:

1. **Nutzbare Volumen** in einem **Gebäude**, z.B. einer Bibliothek oder einem Gehäuse
2. **Volumenanteil** des zur **Speicherung benutzten Materials** in einem Speichermedium
3. **Bitdichte** in der Speichermaterial, sie kann auf
 - a) das **Volumen** b) eine **Fläche** oder c) einen **Länge** bezogen ist

Fern sind zu unterscheiden

Online-Medien

Sie werden **direkt**, ohne zusätzliche Geräte betrieben, z.B. Halbleiterspeicher und Festplatten besitzen meist **schnellen Zugriff**, verlangen aber **größeres Volumen/Bit**

Offline-Medien

benötigen Gerät zum Speichern, Wiedergeben, z.B. Disketten, CD, DVD, Smartkarten, USB-Sticks, Magnetbänder nutzen das Volumen besser aus, daher wichtig für **Archivierung**, Durch Trennung gut für **Datenschutz** (einschließen). Haben dafür aber **längere Zugriffszeiten**, zumindest bezüglich **auswechseln**. Gefahr für **moralischen Verschleiß** der Geräte.

Eine **Zwischenstellung** nehmen die vielfältigen Smartkarten, USB-Sticks, Mikrodrives usw. ein

Volumen- Redundanzen

Redundanz betrifft Verhältnis: **betriebsnotwendiges Volumen** $\Leftrightarrow$ Volumen des **eigentlichem Speichermaterials**. Zu seiner Bestimmung sind mehrere Zwischenstufen zu beachten

Bei **Elektronik**: Volumen pn-Struktur, unverkapselte Chip, Chipgehäuse, Leiterplatte, Gerät. Weiter sind u.a. zu unterscheiden. **Handgeräte** ($\approx 1 \text{ dm}^3$), **Standgeräte** ($\leq 1 \text{ m}^3$), **Räume** ($\approx 100 \text{ m}^3$), **Häuser** ($\approx 10^6 \text{ m}^3$). Parameter hierfür sind z.B. Handhabbarkeit und Bedienung, Transport, Reparatur, Nebenräume, Klimaanlage.

Ein typisches **Magnetband** besitzt eine Magnetschicht von $\approx 2 \mu\text{m}$ Dicke, doch meist ist weniger als $0,5 \mu\text{m}$ magnetisiert. Die Mechanik erfordert eine Unterlage $\geq 5 \mu\text{m}$. Das Band ist auf Spule mit redundantem Kern aufgewickelt. Spule befindet sich in Schutzhülle oder Kassette, bestenfalls kann $\frac{1}{5}$ des Volumens für das Band genutzt werden. Für die speichertechnische Anwendung bleibt folglich meist nur $\approx \frac{1}{20}$ des Volumens. Durch das notwendige Laufwerk wird die Redundanz deutlich größer.

In einer **Bibliothek** müssen Bücher wohlgeordnet in Regalen stehen, dass ein Mensch (evtl. Roboter) leicht Zugriff hat. Daher kann ihr Volumen bestenfalls zu etwa 5 % mit Büchern gefüllt werden. Im Gebäude kommen noch Gänge, Treppen, Aufzüge, Klimaanlage, Versorgungs-, Arbeits-, Leseräume usw. hinzu. Also sind bestenfalls etwa 20 % des Gebäudes für die eigentlichen „Buchräume“, für Bücher ca. 1 % nutzbar.

Elektronik-Volumen: Handgerät : pn-Strukturen $\approx 10^{-6}$ bis 10^{-8} , im Gebäude sind ca. 10 000 Standgeräte unterzubringen. So ergibt sich das mit Halbleitern, CD usw. eigentliche **maximale mögliche Speichervolumen** zu **1 m³**

	Halbleiter	Festplatte	CD, DVD usw.	Diskette	Bandtechnik	dig. Holographie
Gerät, Einrichtung	Leiterplatte, Minikarte	Gerät mit Elektronik	Laufwerk	Laufwerk	Laufwerk	optische Einrichtung
Verpackung, Schutz usw.	Gehäuse	nicht extra vorhanden	Teilweise Schutzhülle	Hülle + Verpackung	Kassette oder Spule	Schutzverpackung
notwendiger Träger	Chip	Alu- oder Glasträger	Polycarbonatschicht	Unterlage	Unterlage	notwendig?
eigentliches Speichermaterial	pn-Übergänge, Gates usw.	Magnetschicht	Pit-Land, Farbstoff, RW-Material usw.	Magnetschicht	Magnetschicht	Holographiematerial
Redundanz	1000	5000	2000	2000	200	≤ 2
Bemerkung	auf Leiterplatte selten austauschbar	nur Gerät austauschbar	Hülle nur teilweise erforderlich			3D-Aufzeichnung möglich

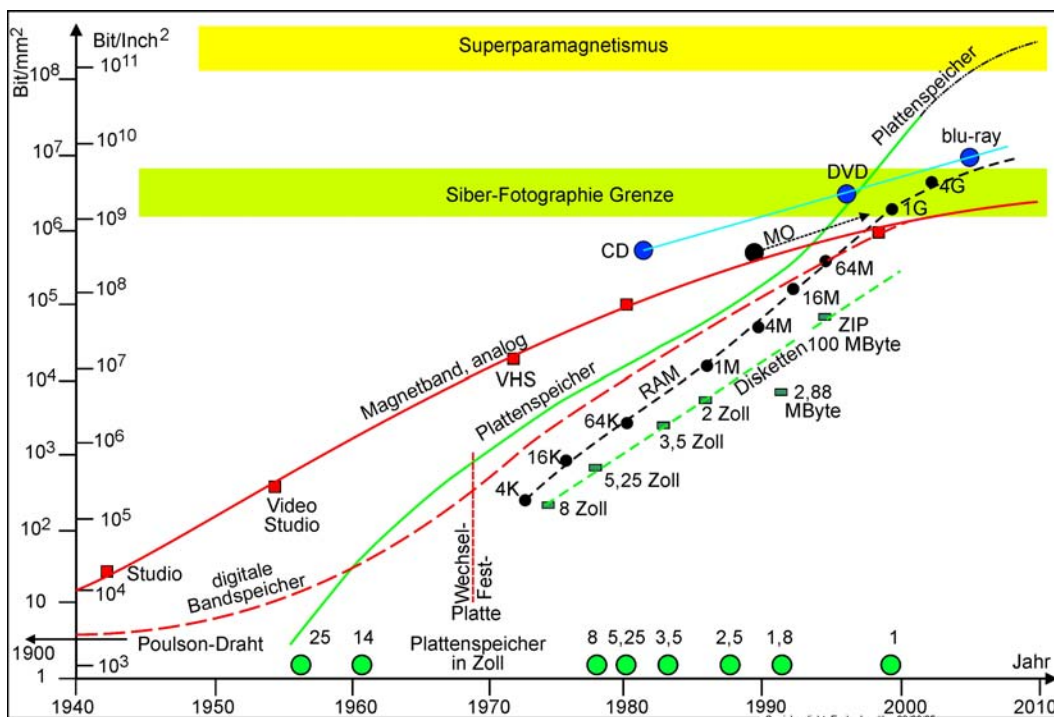
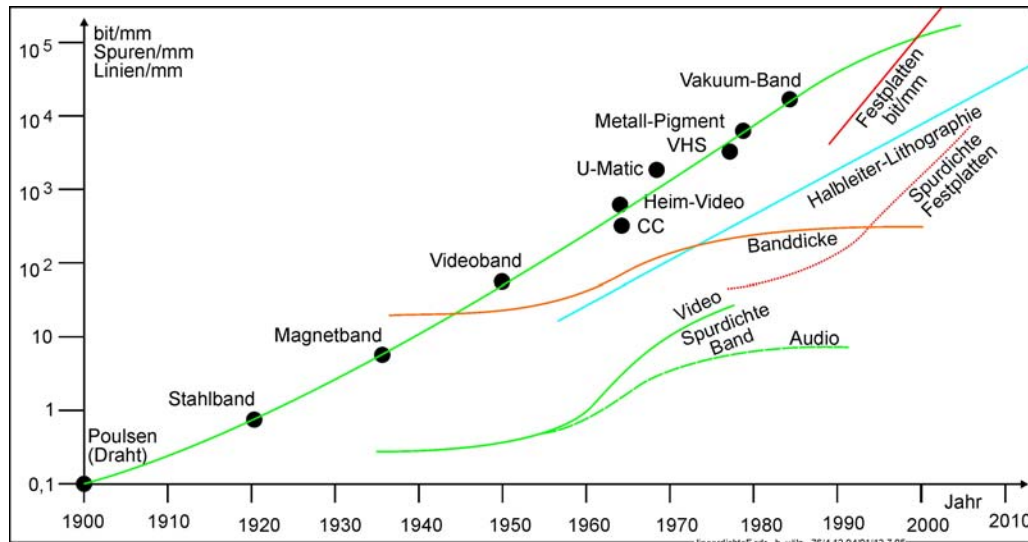
Varianten der Speicherdichte

Eigentlich ist die **Volumen-Speicherdichte** wesentlich, für Technologien und Entwicklung sind jedoch andere wichtiger. Dies gilt insbesondere für Verfahren, die mit „Spuren“ arbeiten.

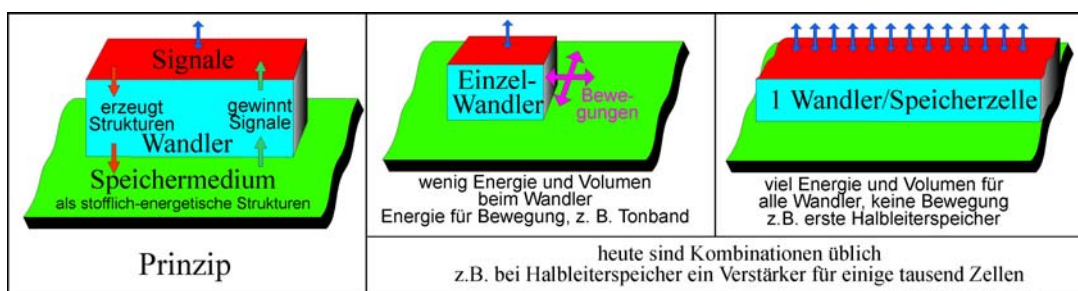
1. Die **Längsspeicherdichte** d_l gibt die Anzahl der speicherbaren Bits längs einer Spur (Spurdichte) an. Sie wird vorwiegend in Bit/mm oder Bit/Inch (bpi) gemessen.

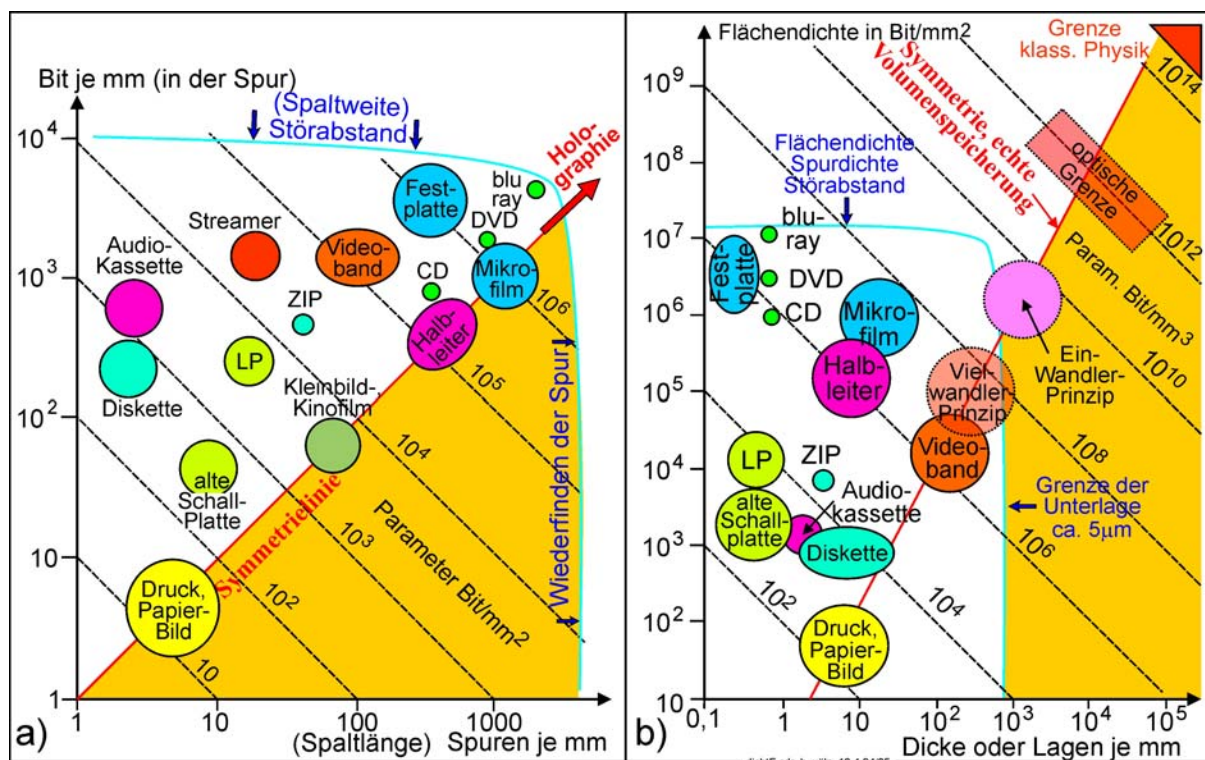
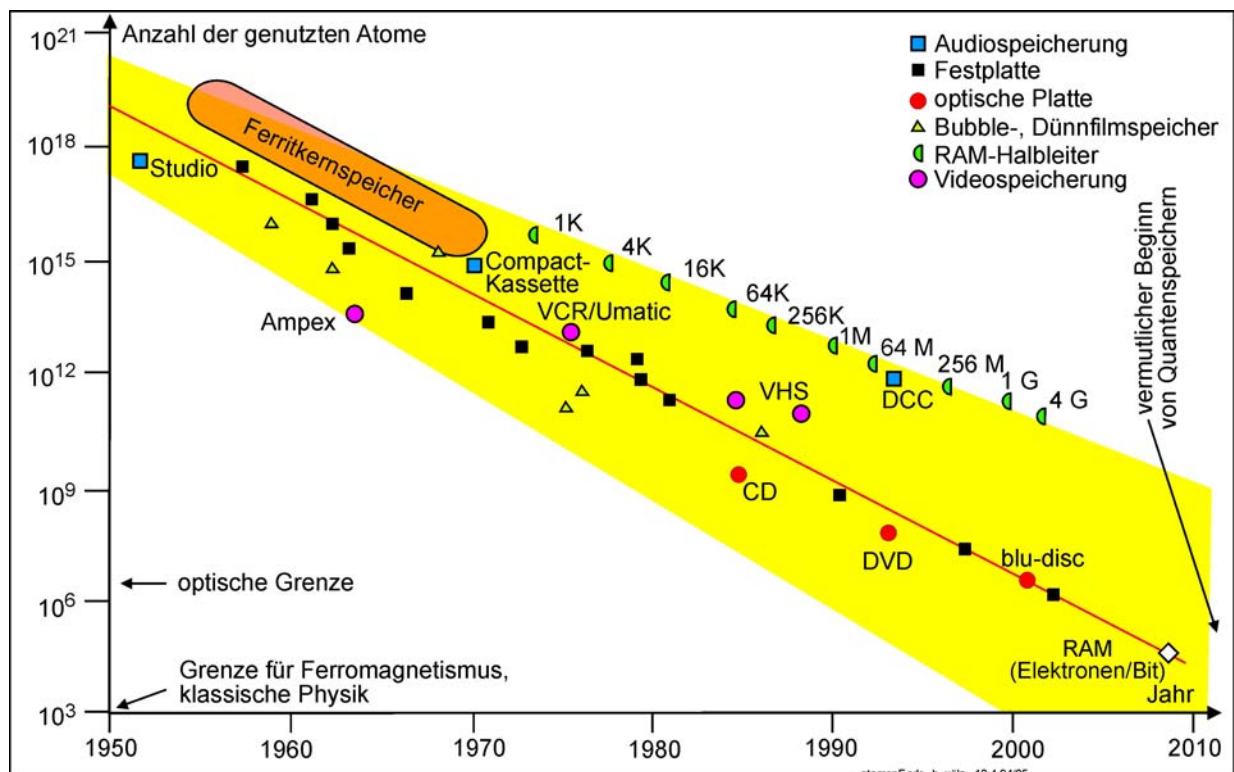
Bei betont **flächenhaften Methoden** (Foto usw.) wird der Begriff „Auflösung“ mit Linien/mm, lines per inch (lpi) bzw. Punkte/mm oder dot per inch (dpi) benutzt. Dies Maß ist unabhängig dann von der Richtung Ähnliches gilt auch bei **optisch geführten** Systemen, z.B. CD, DVD usw.

2. Die **Spurdichte** gibt an, wie viele Spuren/ mm oder track per inch (tpi) verwendet werden Abgesehen von der Beta-Technik ist zwischen den Spuren einen unbenutzten Abstand (**Rasen**) notwendig Daher sind Spurbreite d_s , genutzte Spurbreite d_b und unbenutzte Rasenbreite $d_r = d_s - d_b$ zu unterscheiden Die Spurdichte ist meist deutlich kleiner als die dazugehörige Längsspeicherdichte bei Magnetbandspeichern wird dies zusätzlich durch die **Spaltkonfiguration** verstärkt Auch fordert bei der Wiedergabe das **Wiederfinden der Spur** eine beachtliche Einschränkung
3. Die **Flächendichte** ist das Produkt $d_f = d_l \cdot d_s$. Bei flächenhaften Medien gilt meist $d_f = d_l^2$



In die Speicherdichte geht schließlich noch der Unterschied von **Einwandler-** und **Vielwandlerprinzip** ein





Kosten der Speicher

Die Kosten für Speicher werden meist **nicht je Medium oder Gerät** sondern je Bit oder Byte angegeben

Auf die Zeit bezogen erfolgt dann der **größte Preisverfall**, den die Technik kennt

Über 60 Jahre erfolgte er jährlich auf etwa 65 %, bzw. in 10 Jahren auf $1/100$

Deshalb gibt es seit etwa 1995 auch kaum noch Probleme wegen zu geringer verfügbarer Speicherkapazität

Ausnahmen sind nur noch Großrechner, Archive und Videotechnik

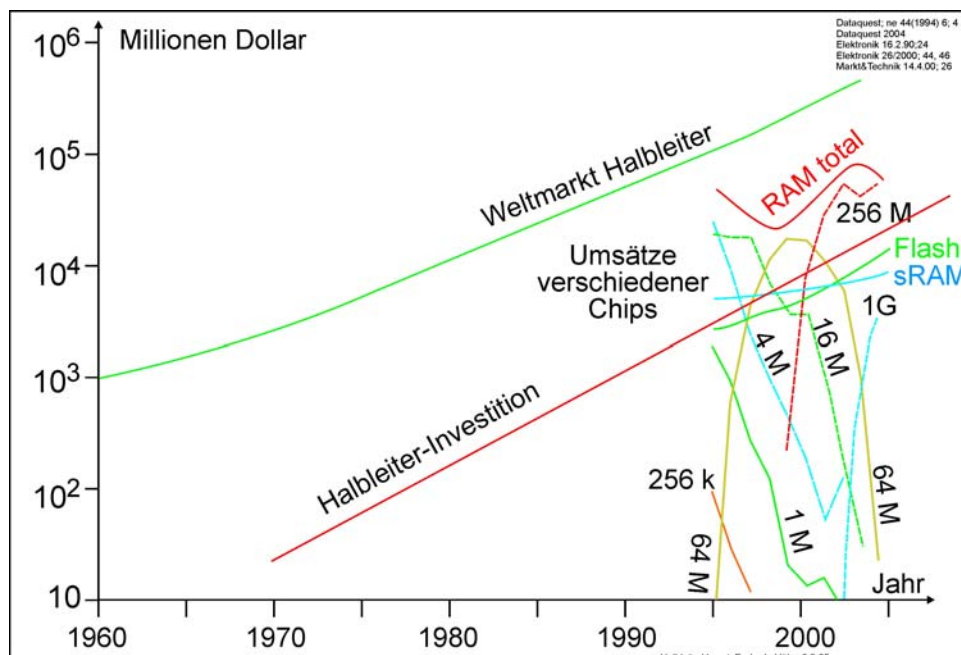
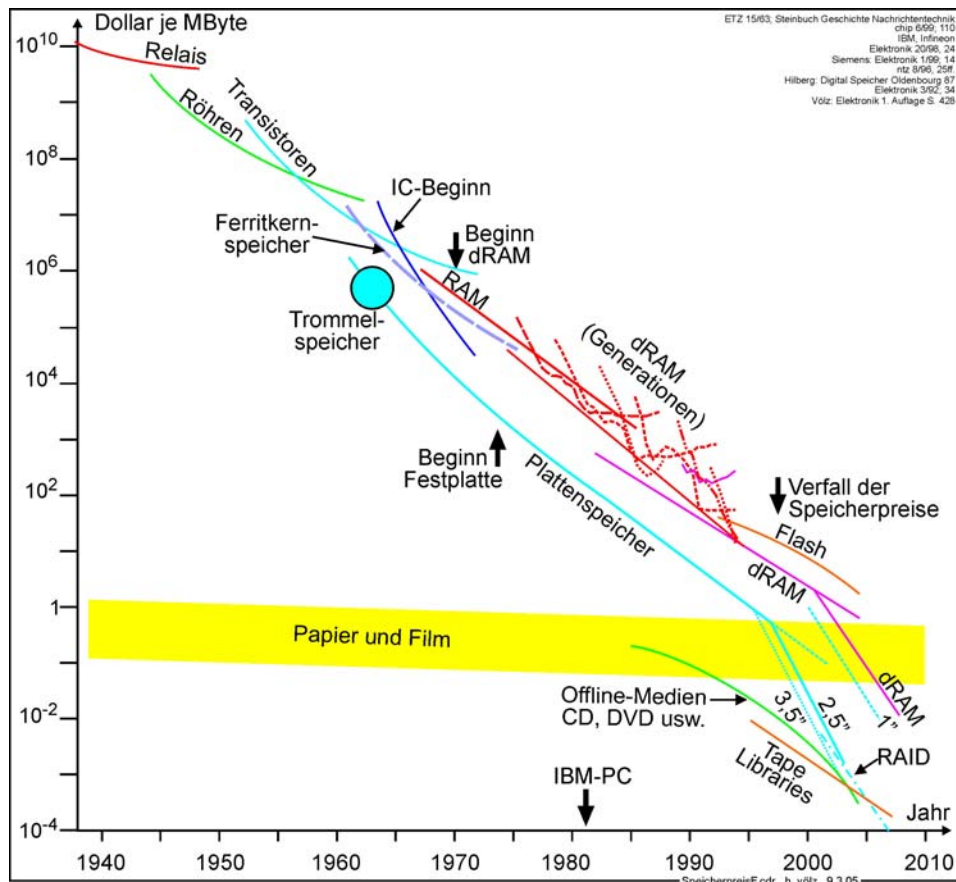
Seitdem erfolgt der Preisverfall sogar noch etwa doppelt so steil

Leider sind die Daten über eine lange Zeit schwer zu bestimmen, weil sich hier auch der **Wert des Geldes** erheblich ändert

Zur Vereinfachung wird bezüglich der verfügbaren Daten über eine Zeit von 50 Jahren $\$ \approx \text{DM} \approx \text{€}$ angesetzt

Verglichen zum steilen Preisverfall ist der Fehler fast vernachlässigbar, der Preisverfall ist daher sogar noch steiler

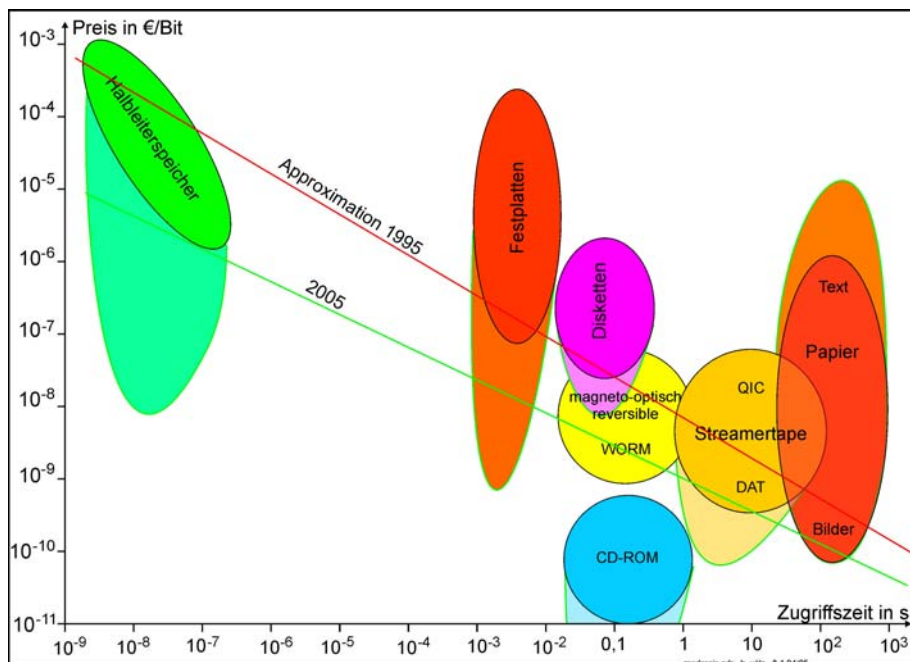
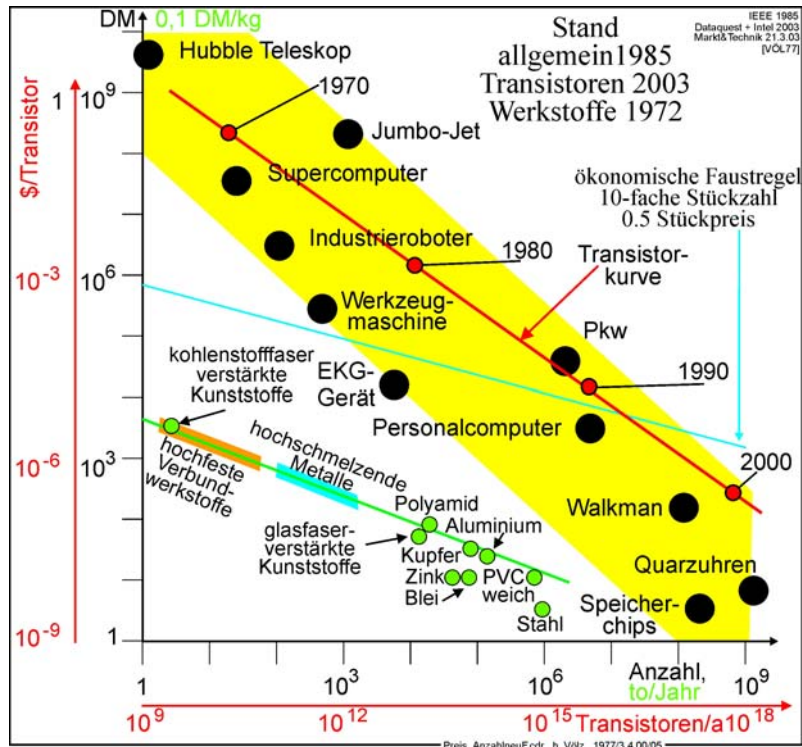
Interessant ist weiter das weltweit eingesetzte Kapital für die Entwicklung und Produktion von Speichern



Preis-Korrelationen

Um die Entwicklung besser zu verstehen, ist eine erweiterte ökonomische Betrachtung nützlich

1. Allgemein gibt es eine beachtliche **Korrelation** zwischen dem **Preis** eines Produktes und der **produzierten Anzahl**. Sie gilt selbst für unvergleichbare Produkte vom Hubble und Jumbo-Jet bis hin zu Massenprodukten wie Walkman, Quarzuhr und Speicherchip
2. Für **Transistoren** sind von etwa 1965 bis 2002 die weltweiten Produktionszahlen und Preise recht gut bekannt. Der Zusammenhang zwischen Produktionszahl z und Preis p gemäß $z \cdot p \approx 1$ gilt über den Bereich von $1 : 10^{18}$
3. Auch die **Kosten je kg** eines Produktes stehen im linearen Zusammenhang mit der Jahresproduktion. Er zeigt aber eine deutlich geringere Steigung von etwa $p \cdot z^{0,42} \approx \text{konstant}$.
4. Nach einer **ökonomische Faustregel** sinkt der Preis p eines Produktes auf die Hälfte, wenn die Stückzahl auf das Zehnfache ansteigt ($p \cdot z^{0,32} \approx \text{konstant}$)



Prognostische Aussagen

1845 entwickelte PIERRE FRANCOIS VERHULST (1804 - 1849) ein Modell des gehemmten Wachstums bezeichnet als **Verhulst-Gleichung**, logistische Gleichung oder umgeformt als S-Kurve des Wachstums wird Anzahl $N(t)$ kann maximal (Ressourcen) auf M zunehmen, Geschwindigkeitskonstante a und Änderung $dN(t)/dt$

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

Die Zunahme beginnt sehr langsam, wird steiler, durchläuft ein Maximum, wenn das Maximum M erreicht $\rightarrow 0$
Durch Integration entsteht ein glockenähnlicher Verlauf für das Wachstum, b = Integrationskonstante

$$N(t) = \frac{M}{1 + e^{-(a \cdot t + b)}} \rightarrow \log \left(\frac{N(t)}{M - N(t)} \right) = a \cdot t + b$$

Es besteht Ähnlichkeit zur Gauß-Verteilung

Es lassen sich hieraus 5 Etappen (Lebenszyklen) gewinnen: Geburt, Wachstum, Reife, Rückgang und Tod

Ein Zusammenhang besteht weiter mit den Zyklen 1925 von NIKOLAJ DMITRIJEWITSCH KONDRATIEFF (1892 - 1938)
 Sie laufen in Wellen von 40 bis 50 Jahren ab: Basisinnovationen, Wohlstandszuwachs, Konsolidierung, Stagnation
 Damals nur 3 Zyklen festgestellt, heute werden mindestens 4 bis maximal 6 angenommen

Einteilung und typische Eigenschaften der Lebenszyklen von Produkten

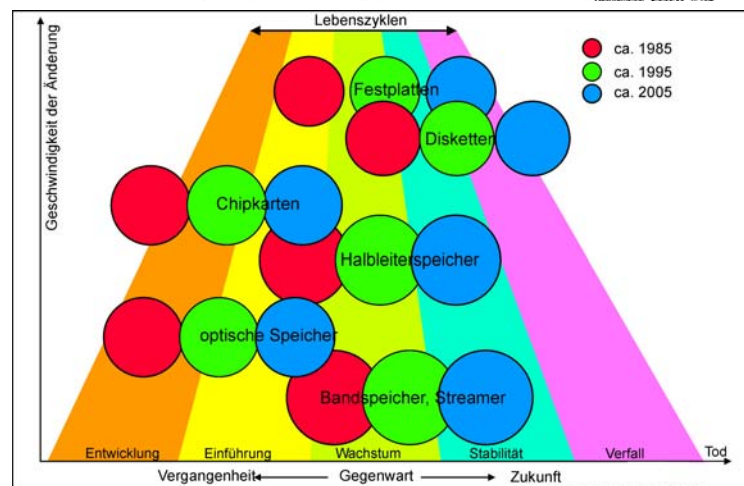
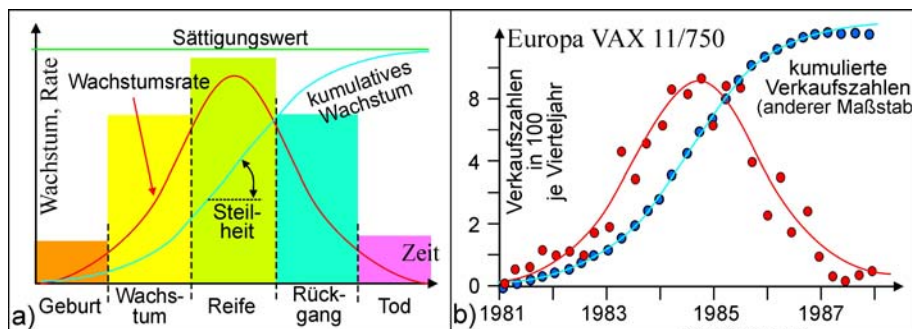
Markt	Einführung	Wachstum	Reife	Sättigung	Abschwung	Endphase
Verkaufszahlen	geringer Anstieg	erheblicher Anstieg	stabil	konstant	schwindend	Einzelexemplare
Stückpreise	sehr hoch	sinkend		stabil	ansteigend	hoch
Verwendbarkeit	gering	steigend			sinkend	sinkend
Modifizierungen	häufig	sehr häufig	periodisch wechselnd	wenig	selten	keine
Wettbewerbsprodukte	wenige	viele	konstant	tendenziell weniger	sinkend	stark sinkend
Gewinnspanne für Hersteller	gering	steigend	stabil		ausreichend für restliche Anbieter	

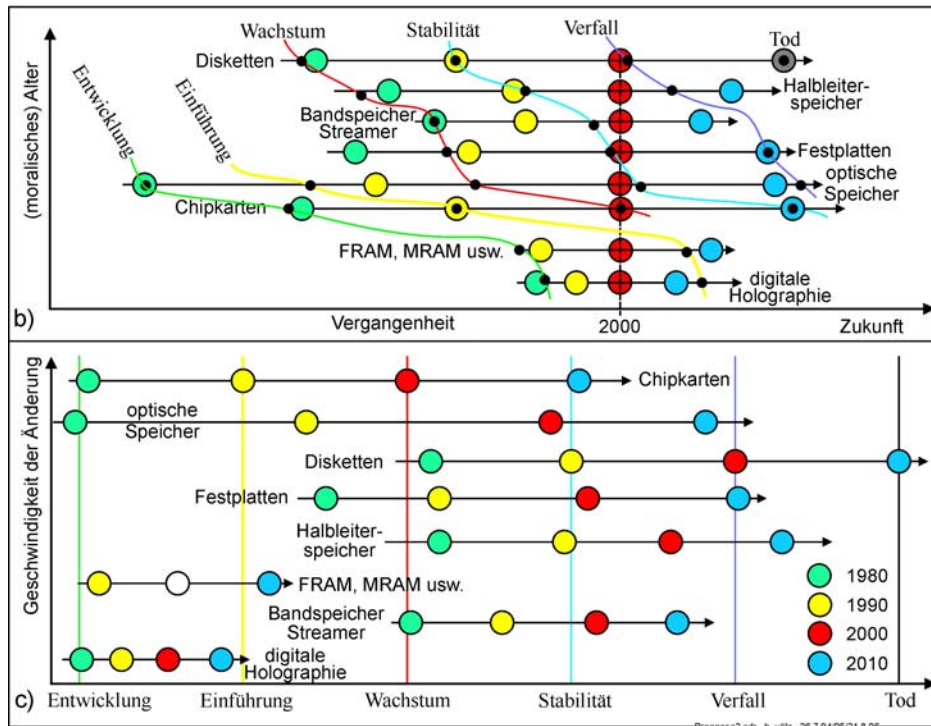
Typische Lebensdauern einiger elektronischer Bauelemente (ca. 1990)

Produkte	Lebensdauer
Speicher-Baureihen	9 Monate
Programmierbare Logikschaltungen (PLD)	1 Jahr
Mikroprozessoren	2 Jahre
Gate-Arrays	2 Jahre
Digitale Signalprozessoren (DSP)	3 Jahre
Standard-Logik-Baureihen	6 Jahre
Lineare Interfaces	8 Jahre

Wirtschaftszyklen = KONDRATIEFF-Zyklen

Zyklus	Zeitraum	Basis-Innovationen	Bedürfnisse
1.	1780 - 1849	Dampfmaschine, Textilindustrie	Bekleidung
2.	1849 - 1890	Eisenbahn, Stahl	Transport
3.	1890 - 1940	Elektrotechnik, Maschinenbau, Chemie	Massenkonsum
4.	1940 - 1980	Automobil, IC, Kernenergie	Individuelle Mobilität
5. strittig	1980 bis ?	Informations- und Kommunikationstechnik	Globalisierung, Kommunikation
6. vermutet	20?? bis ?	Biotechnologie, Ökologie	Ganzheitliche Gesundheit

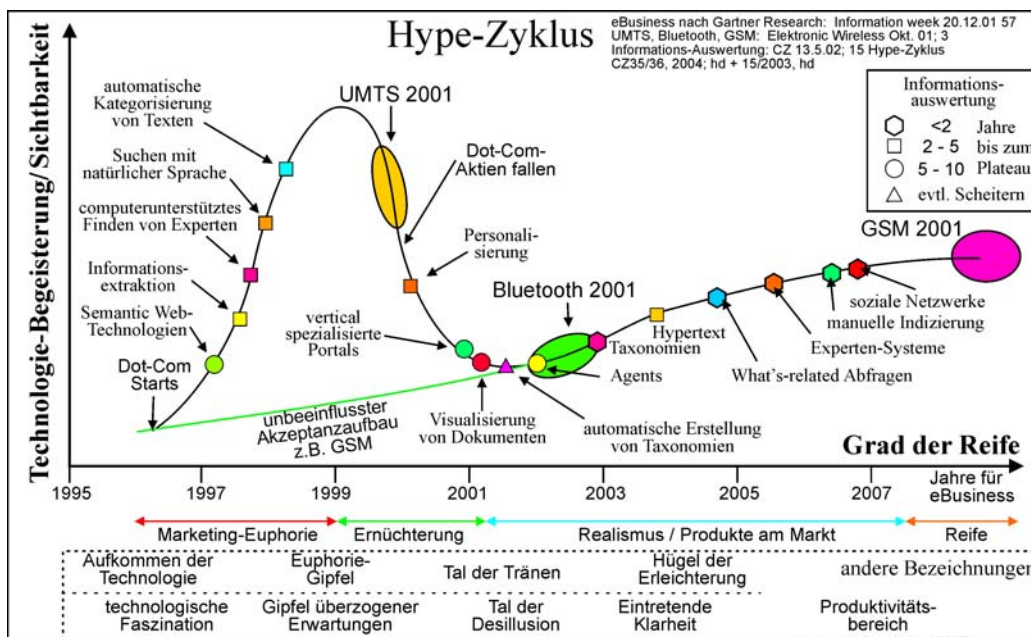




Prognose für neue Speicher

Bei Speichern sind wegen der Komplexität Zukunftsaussagen sehr schwierig
Sind leichter nach Gebieten, wie Halbleiter, Optische Medien, Bänder usw. durchführbar, erfolgen daher dort
Es gibt aber auch ungewöhnliche, kaum einzuordnende neue Prinzipien, wie Quantenspeicher
Doch zwei Erfahrungen der Technikgeschichte sind immer zu beachten:

- **Breit eingeführte Techniken** verschwinden so gut wie nie mehr
Sie verlagern sich im „unglücklichsten“ Fall auf technische Lücken
Typisch sind Bandspeicher, könnte auch für dRAM wirksam werden
In der gesamten Technik sind eigentlich nur Zeppelin, Gaslicht und Dampfmaschine nahezu verschwunden
Für die Speicher: Ferritkern- und Relaispeicher sowie Lochkarten und Lochbänder
- **Neue Prinzipien** mit vielen „scheinbaren“ Vorteilen, die trotz umfangreicher positiver Prognosen sich auch **nach Jahrzehnten nicht breit eingeführt** sind, haben so gut wie keine Chance mehr
Für Speicher, z.B. Bubbles und Blochlinienspeicher.
Vielleicht auch für Assoziativ-, Tieftemperatur- und digitale Holographie-Speicher
Zuweilen dürfte hier auch das Management (Konzerne mit Macht) großen Einfluss ausüben



Was muss künftig und wie lange gespeichert werden?

Im Prinzip ist heute alles was auf der Welt elektronisch geschieht vollständig speicherbar
Doch dabei wird die Menge so groß, dass kein sinnvoller Zugriff mehr möglich ist
Hierzu zählt eine erhebliche Reduzierung des Ballastes „überflüssiger“ Daten (Markt, Geheimdienste usw.)
Künftig wird daher zu fragen sein, was gespeichert werden muss und wo Doppelungen erforderlich sind
Hierzu sind entsprechende **Redundanz** und **Relevanz** neu zu definieren
Zunächst sind Inhalte, Sachbezüge zu unterscheiden, für die inhaltliche zeitbegrenzende Kriterien zu entwickeln sind

- Was **wofür**: Utility. Anwendbarkeit
- Was für **wen**: individuell oder allgemein
- Was für **Kultur und Geschichte**: Originale der Kunst, Menschenbild, Religion usw.
- Was für die **Menschheit**: Notwendigkeit, Nutzen
- Was in einem (oder mehreren) **Welt-Archiv**, „*Weltwissen on demand*“

Wie mit Daten umzugehen ist

- Wie Daten vor **Zerstörung, Verlust** usw. **geschützt** werden
- Wie der **Zugriff** auf einzelnen Stellen und Daten zu regeln ist, neben Geschwindigkeit auch Möglichkeiten, Rechte usw.; für Ausbildung und Kulturgüter kostenlos erforderlich
- Wie mit **Urheberrechten** umzugehen ist: Zitate, Plagiate, Vergütungen
- Wie sind **Sammler** und **Nostalgiker** einzuordnen
- Wie ist mit **Geheimhaltung** umzugehen: strenge zeitbegrenzte Zulässigkeit
- Wie ist mit **Schädlichem, Destruktivem** umzugehen: moralisch wichtiger als gesetzlich
- Problem „**Wissen ist auch Macht**“ abschwächen, für alle verfügbar machen! Wie?

Mögliche Eingrenzungen, Beschränkungen

Für **Lehrbücher, Lexika, Publikationen** usw. genügt ein eingeschränkter, stets aktuell zu haltender Anteil (**Didaktik**)
Museen, Archive, Bibliotheken usw. müssen vor allem typische Originale in geringer Anzahl aufheben
Rundfunk und **Fernsehen** usw. müssen wichtige Zeitdokumente und (Eigen-) Produktionen speichern
Historiker interessieren vor allen Original-Dokumente, die ständig neu interpretiert werden müssen
Archäologie muss kulturhistorische Inhalte sichern

Entwicklung von **Universalformaten** und **spezieller Hardware**, gegen „digitalen Verlust“
Speichern der **Originale** oder/und **Rekonstruktion** mittels Formeln und Algorithmen

Vergleich von **inhaltlichen** und **ökonomischen Grenzen**

Frage nach der **Vollständigkeit** der hier genannten Argumente und Inhalte, **ordnen nach Wichtigkeit**

Vereinfachte Zusammenfassung der vier wichtigsten Bereiche

Bereich	Fakt, Zweck	Maximaler, notwendiger Bestand des Gespeicherten
Natur	Ständigkeit, Irreversibilität, Geologie	$\rightarrow \infty$
Genetik	Erhaltung der Art	$\approx 10^9$ Jahre
Neuronal	Überleben des Individuums	bis zum Tod ≈ 100 Jahre
Gesellschaft	Wissen, Kultur, Werte	, $0 \rightarrow \infty$, Bestehen der Menschheit, $\approx 10^6$ Jahre?

Versuch einer Einteilung und Abgrenzung

Inhalt der Information	Art der Information	Umgang für die Speicherung
Historisch	Originale	Dauerhaft aufheben
Kulturell, künstlerisch	Menschliche Werte betreffend	Große Auswahl von Originalen aufheben, allgemein verfügbar machen
Utilitär, technisch, wissenschaftlich	Wissen, Fakten, Gesetze, Methoden	Ständig aktualisieren
Didaktisch	Darstellungsform, gut lehrbar	Besseres ersetzt Älteres
Geheimhaltung	Fakten, Geschehen	falls überhaupt notwendig, dann unbedingt zeitliche Begrenzung
Destruktiv, zerstörerisch	Wissen, Methoden	moralische Verurteilung (Strafen?)

Literaturauswahl

Desowitz, R. S.: Das Immunsystem. rororo-Sachbuch, Reinbeck bei Hamburg 1991

- Hoagland, A. S.: Trends and projections in magnetic recording storage on particulate media IEEE Trans Mag. 16, No. 1 Januar 1980 S. 26 - 29
- Kaplan, R. W.: Der Ursprung des Lebens, Georg Thieme, Stuttgart 1972
- Lerner, A.: Grundzüge der Kybernetik. Verlag Technik, Berlin 1970
- N.N.: State of Storage. Speichernetze. ZaZamedia, München 2003
- Schrödinger, E.: Was ist Leben. Franke, Bern 1951
- Sheldrake, R.: Das Gedächtnis der Natur. Scherz - Verlag Bern - München - Wien, 4. Aufl. 1993. engl. Original: "The Presense of the Past" 1988.
- Siefert, G. u. Siefert, G. C.: Einführung in die Immunbiologie. Quelle und Meyer, Heidelberg 1978
- Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information. **Bd. 1** Grundlagen und Anwendung in Natur, Leben und Gesellschaft. Shaker Verlag, Aachen 2003
- * dito **Bd. 2** Technik und Geschichte vorelektronischer Medien. Shaker Verlag, Aachen 2005
- * dito **Bd. 3** Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag, Aachen 2007
- Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Allgemeine Grundlagen für Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Shaker Verlag, Aachen 2001
- Alle 4 auf CD: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007
- Völz, H.: Eine anschauliche Darstellung des Quanten-Bit. GrKG 48(2007) 4, 147 – 154
- Völz, H.: Kontinuierliche Digitaltechnik. Shaker-Verlag, Aachen 2008