

Vorlesung HU 6
Prof. Dr. Horst Völz

Medien Geschichte

Dieses Material beruht u. a. auf dem Buch

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 2 und 3, Shaker Verlag Aachen 2005 bzw. 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 betreffende Inhalt wurde verkürzt, auf den neuesten Stand gebracht und die Bilder farbig umgesetzt
Weitere Details enthalten meine Vorlesungen zur Speichertechnik an der TU, s. aes.cs.tu-berlin.de/voelz

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 in höherer Qualität sind verfügbar als: ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12

Dieses Material wurde heruntergeladen von: www.aes.cs.tu-berlin.de/voelz/PDF

Email: [hvoelz\(at\)fpk.tu-berlin.de](mailto:hvoelz(at)fpk.tu-berlin.de) bzw. [h.voelz\(at\)online.de](mailto:h.voelz(at)online.de)
Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

Wichtige Begriffe

Zunächst stark vereinfachte Erklärungen, genaueres folgt

Information ruft in einem System Wirkung hervor, die nicht ausreichend einfach durch Einwirkung von Stoff und Energie erklärt werden kann (Genaueres 1. Teil)

Kommunikation als wechselseitiger Austausch von Information bzw. Wissen

Latein **communicatio** Mitteilung, Unterredung

u. a. 1) menschliche, 2) tierische, 3) technische Kommunikation

Medien = Methoden, Techniken und Speicher, die Wissen betreffen

Latein **medium** Mitte, **medius** in der Mitte befindlich

Sonderfall = **Massenmedien**, die gleichzeitig (parallel) viele Menschen (anonym) erreichen

Neue Medien = Begriff ab 70er-Jahre, zunächst Telex, Teletex, Videotext, Videorekorder, Telefax, Bildplatte, Bildtelefon, Kabel- und Satellitenrundfunk und -fernsehen

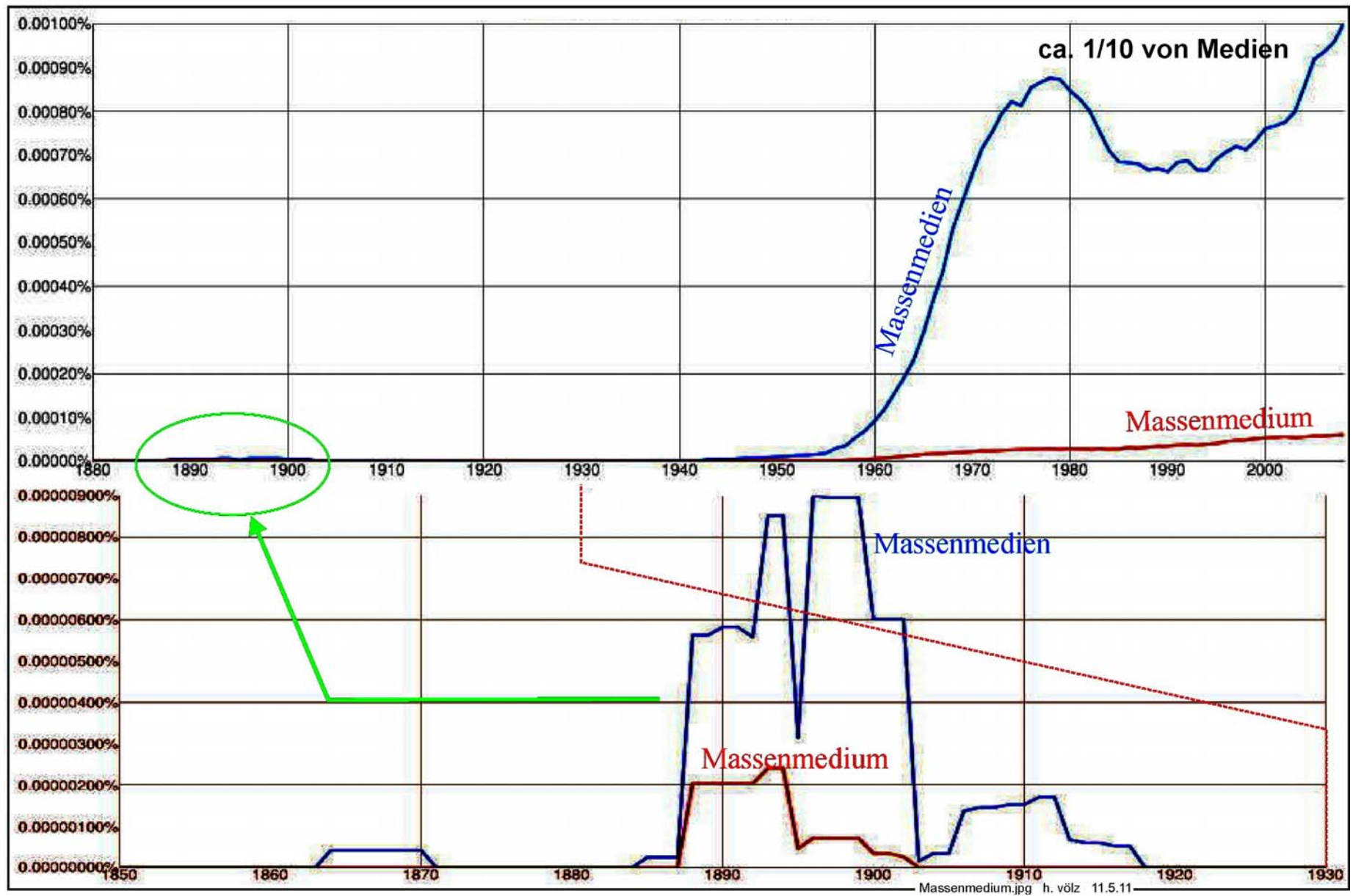
später nur auf Computer-Basis: CD, CD-ROM, DVD, interaktiv und multimedial

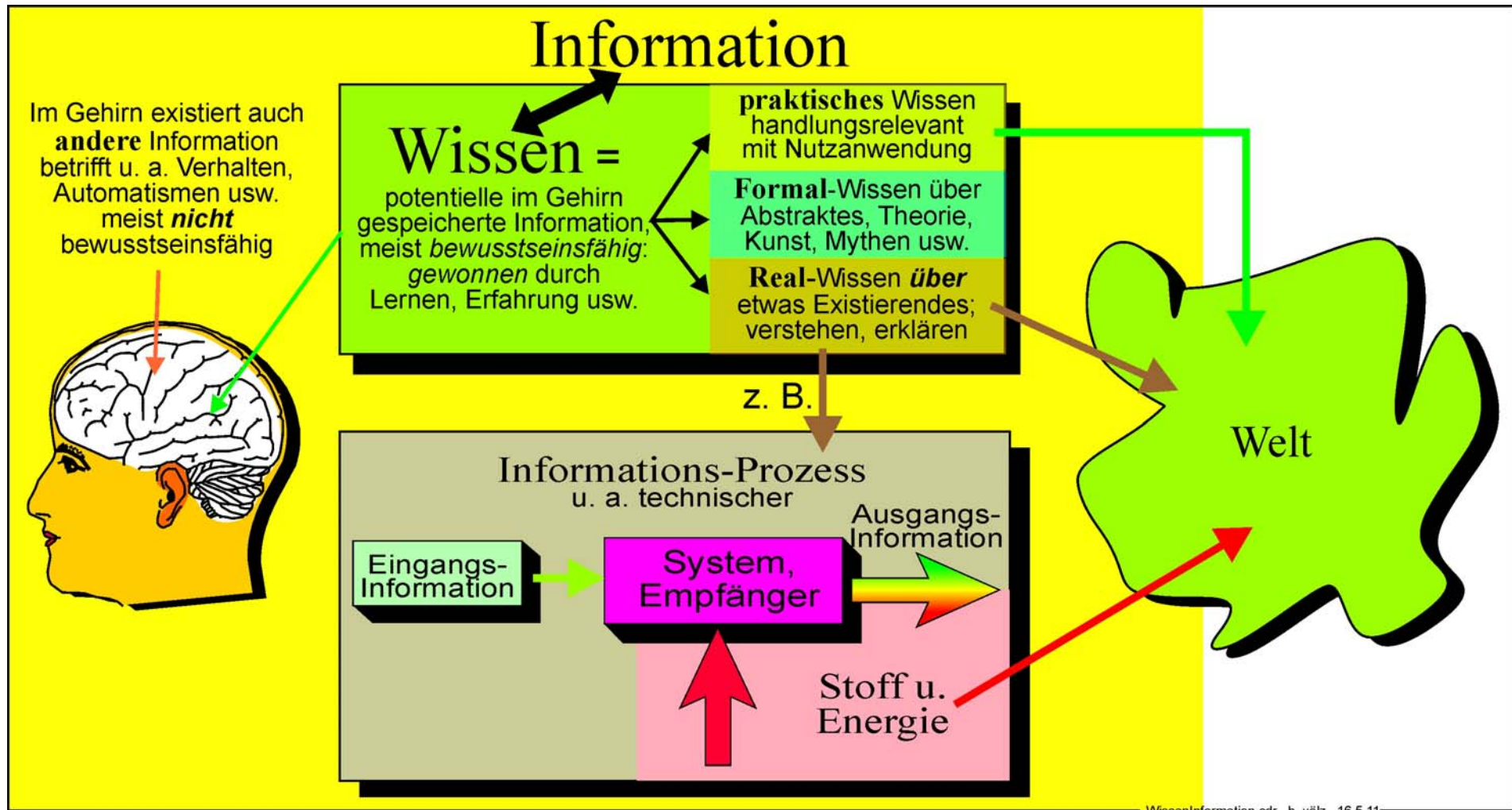
Mediengeschichte beginnt vor allem mit den Arbeiten von [McLuhan] in den 60er Jahren

Speicher übernimmt Information (genauer den Träger, s. Teil. 2) und hebt sie für die Zukunft auf

Wissen = spezielle menschliche Information







Wissen ist also eine Teilmenge aller Informationen
ebenso eine Teilmenge der Information im Gehirn
Es gibt drei Varianten von Wissen

Bei WIENER steht im Sinne einer Definition

„Information is information nor matter or energy”

Es entstand eine mangelhafte Übersetzung ins Deutsche für „**matter**“ s. u.

Richtig: Angelegenheit, Sache; Stoff, Material; **falsch** Materie in Sinne der Philosophie

Im Kontext des Buches müsste die Übersetzung lauten

Information ist **ein Modell der Welt neben Stoff und Energie**

Natürlich gibt es weitere Modelle z. B. biologische, medizinische, künstlerische und geschichtliche

Falsch ist die gedruckte Übersetzung

Information ist Information weder **Materie** noch Energie

Im *Kalten Krieg* wurde daraus sogar

Information ist Information **weder Materie noch Bewusstsein**

Mit der Schlussfolgerung:

Neben Materie und Bewusstsein gibt es doch ein ***Drittes***: die Information

Und damit ist der ***dialektische Materialismus widerlegt***

Doch bereits 1907 folgerte als erster Philosoph LENIN (1870 – 1924):

EINSTEIN: $E = m \cdot c^2$ zeigt „Materie ist Stoff **und** Energie“

Von wem stammt der Begriff Information?

Im Vorwort zu Kybernetik von 1947 sagt WIENER
dass R. A. FISCHER, CLAUDE SHANNON und er ungefähr gleichzeitig auf die Idee einer
statistischen Beschreibung gekommen seien (s. später SHANNON-Theorie)

Weiter erwähnt er, SHANNONS Untersuchungen betreffen
„Probleme der Verschlüsselung von Information“
SHANNON verwendet jedoch ausschließlich **Kommunikation**

WIENER-Buch enthält langes Kapitel: „Zufallsprozesse, Information und Kommunikation“.
hier gibt es keinen Hinweis auf SHANNON

Auf S. 111 verweist WIENER auch auf JOHN VON NEUMANN (János; 1903 – 1957)

Eventuell drückt sich WIENER wegen Geheimhaltung um konkrete Aussagen

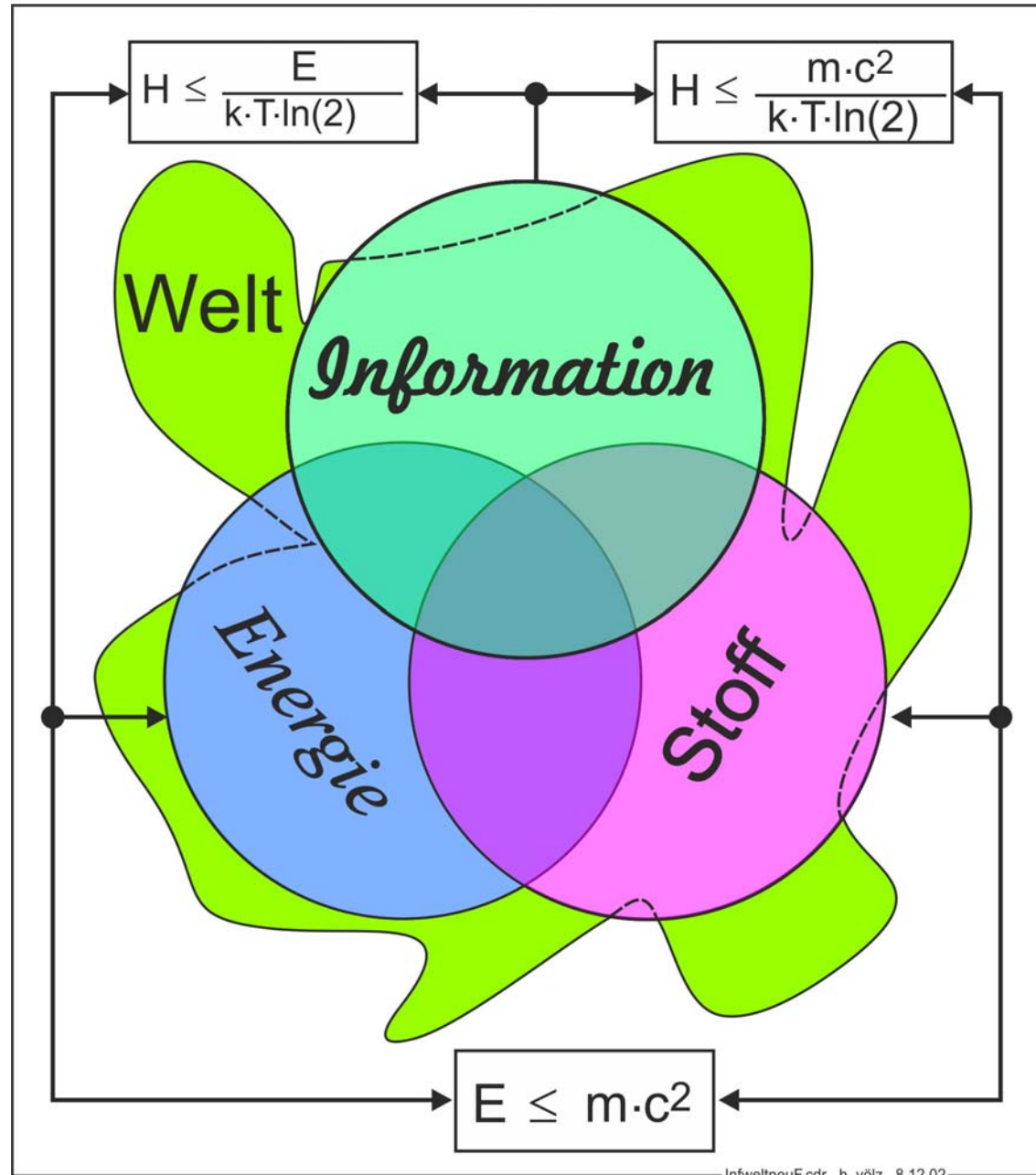
Letztlich bleibt also nur die obige Aussage

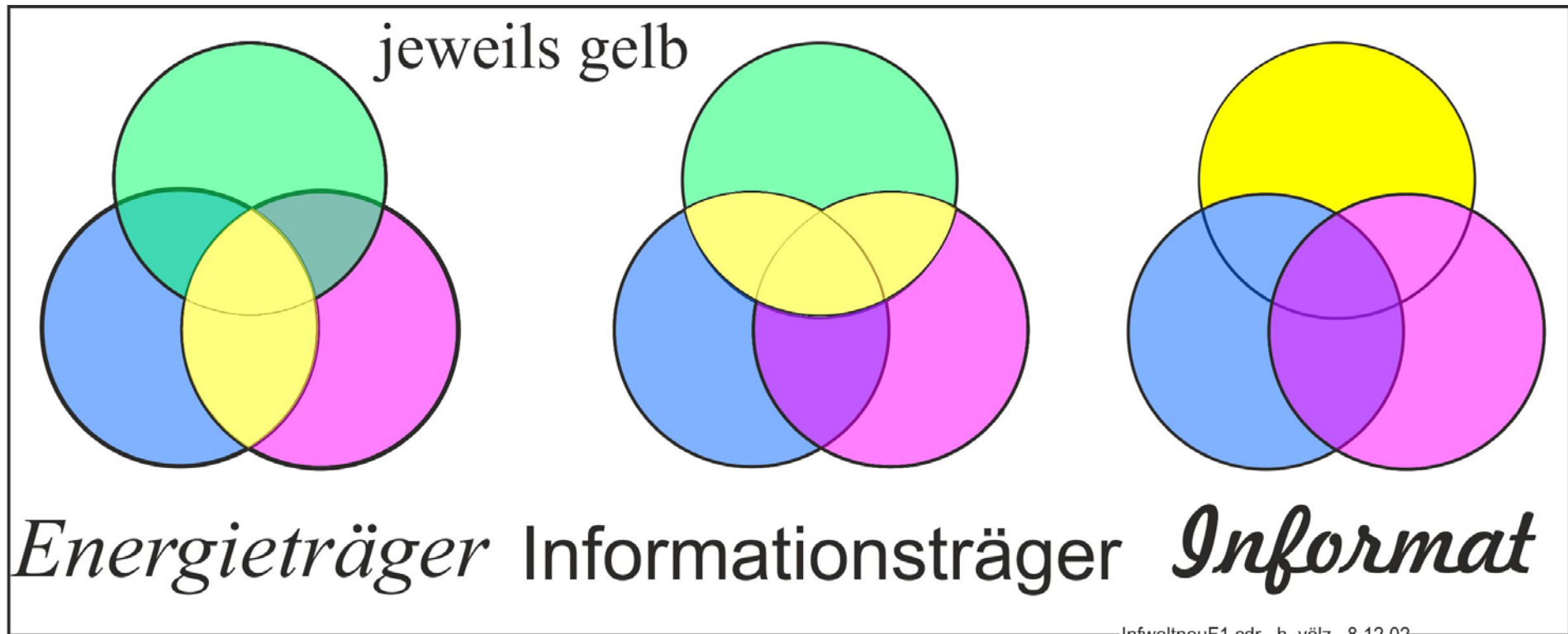
Information wird von WIENER im Sinne von Kybernetik funktionell (Modell) eingeführt

Information

Herkunft des Begriffs (Etymologie)

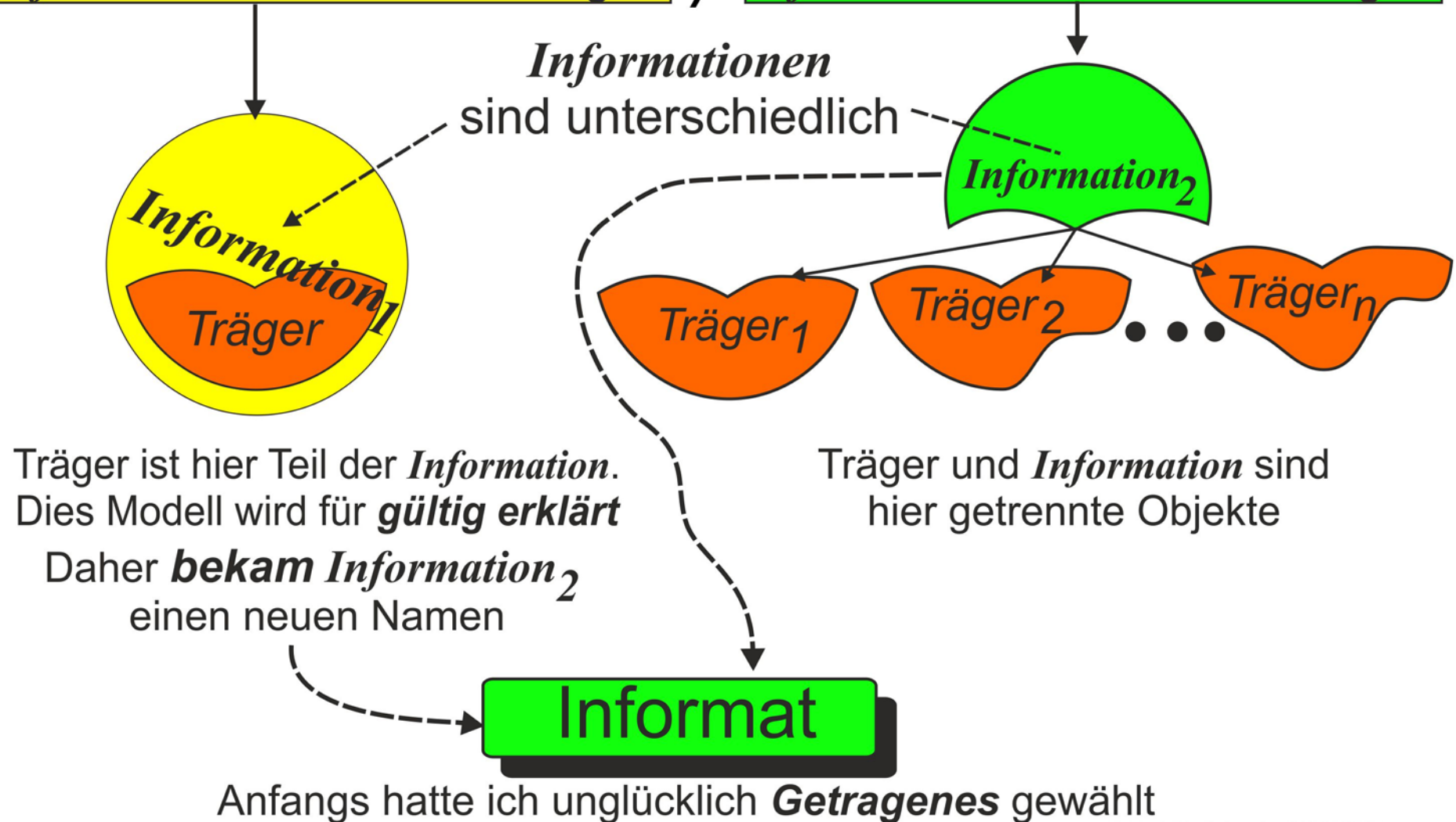
- *Latein: **informatio*** (Substantiv), ***informare*** (Verb) in und „forma“ etwa einformen etwas eine Gestalt oder Form geben, entspricht dem deutschen „Bildung“
- Bildung durch Unterricht, Belehrung usw. Bildung durch erläutern, erklären, usw. Kam im 15. bis 16. Jahrhundert in die deutsche Sprache
- Informator war lange Zeit der Hauslehrer
- Begriff fehlt in den Lexika des 19. Jh. völlig





Zwei Varianten zur *Information* sind gleichzeitig in der Literatur vorhanden

Information besitzt einen Träger $\neq$ **Information wechselt den Träger**



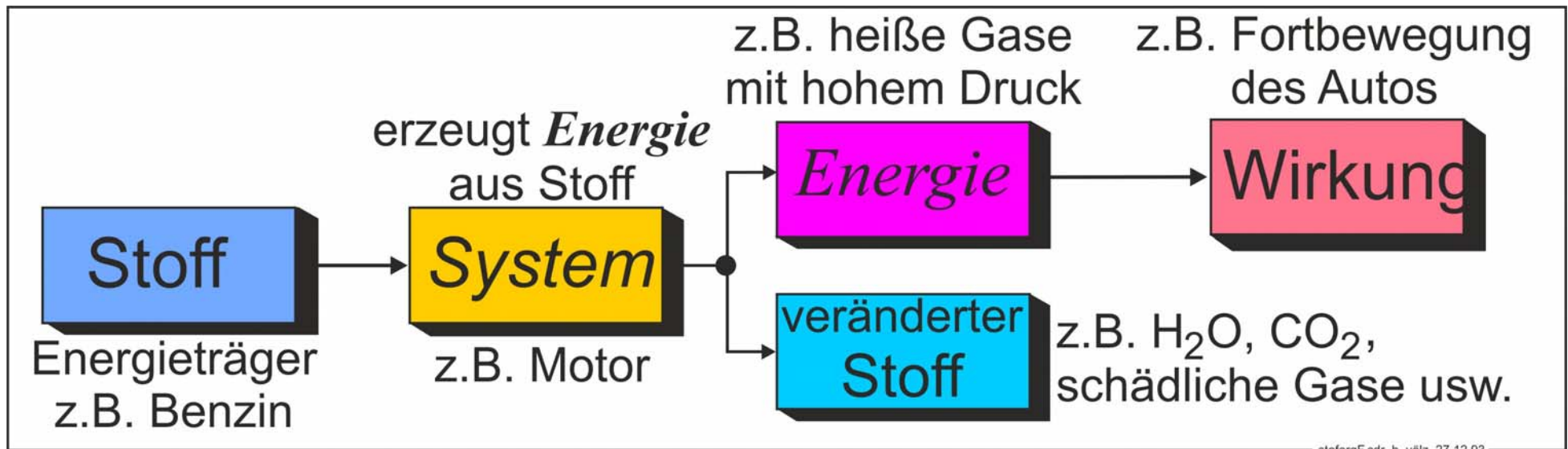
St_En_inffH.cdr h. vözl 25.3.98/02/03

Stoff

- ist **primär** und **statisch** gegeben, also in etwa unveränderlich
- ist meist unmittelbar **sinnlich wahrnehmbar**, erfahrbar
- besitzt vorwiegend **physikalisch-chemische Eigenschaften**, wie Gestalt, Masse, Härte, Ausdehnung, Farbe, Temperatur usw.
- existiert in den **Aggregatzuständen** fest, flüssig, gasförmig
- ist **teilbar**, zumindest bis zu den Molekülen und Atomen
- ist die wesentliche (Modell-) **Grundlage der Chemie**
- durch Zusammenwirken mehrerer Stoffe (**chemische Reaktion**) können neue Stoffe entstehen (Stoffwandlung)

Energie

- ist **primär dynamisch**, **wirkt** auf Stoffe **ein** und bewirkt dort etwas
- kann **Bewegung** der Stoffe **hervorrufen**
- kann die **Eigenschaften** der Stoffe **verändern**, z. B. ihre Form/Gestalt, Eis auftauen, Temperatur erhöhen
- ist die wesentliche (Modell-) **Grundlage der Physik**
- wird aus Energieträgern mittels spezieller Systeme erzeugt, dies erfolgt fast immer durch Stoffumwandlung
- kann gespeichert werden, z. B. in Akkumulatoren, über/in Feldern (potentielle Energie)



Was ist keine Information?

Heute besteht Gefahr alles Information zu nennen: Holz, Steine Ernährung, Benzin usw besser meist stoffliche und/oder energetische Beschreibungen oder andere Modelle (künstlerische usw.) mit einer effektive Beschreibung der Sachverhalte

Modell Information dann sinnvoll,

wenn andere, vor allem **stofflich-energetische Modelle umständlich** sind Stoff-Energie-Bilanz - z. B. Erhaltungssätze - im Modell nicht mehr gelten auch andere Modelle nicht greifen

Vielfach wichtig, von Wiener eingeführte **Auslöseprinzip** oder **Verstärkereffekt**

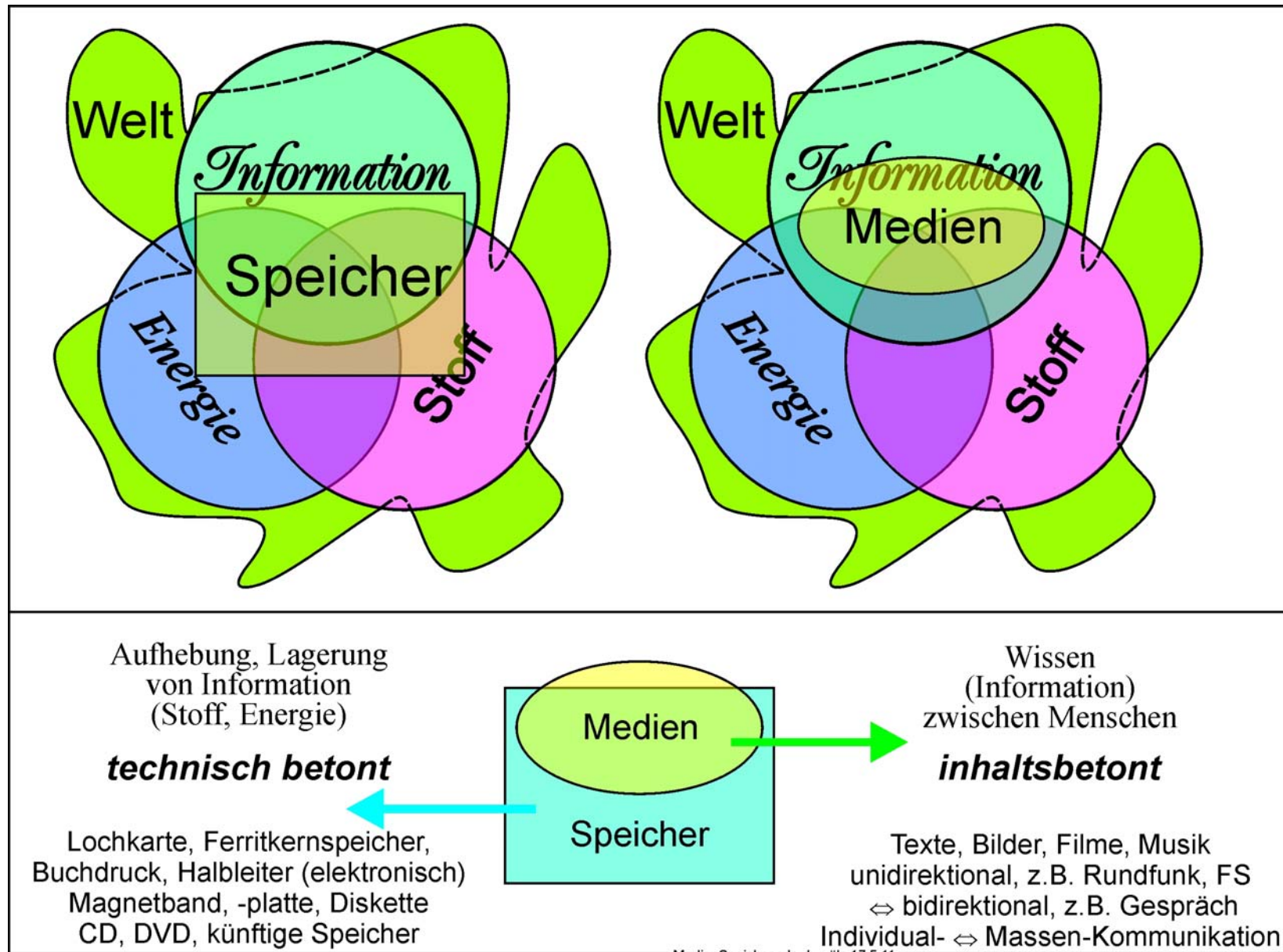
Daher ist Information im Prinzip **ressourcenfrei**

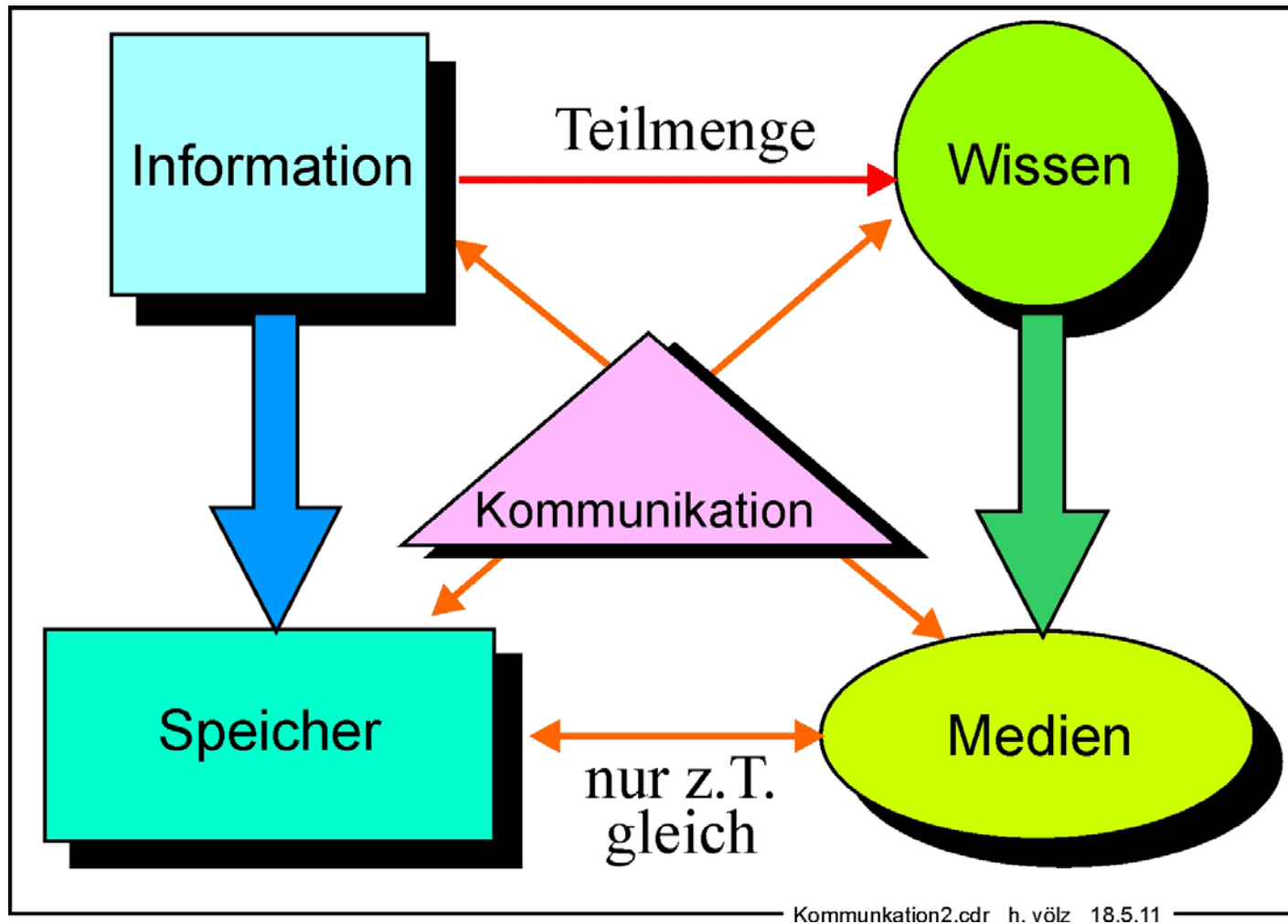
und kann beliebig wachsen, Beispiele: Druck auf einen Klingelknopf löst Atombombe aus

Minimale Mengen eines Katalysators oder Enzyms, die sich oft nicht einmal verbrauchen lösen gewaltige chemische Reaktionen aus

Information

- verändert Systeme bzw. löst deren **Verhalten** aus
- **Inhalt, Sinn** bzw. ihre **Wirkung** hängen daher wesentlich vom jeweiligen **System ab**
- Über das System erhält sie neben dem stofflich-energetischen Träger (carrier) den zusätzlichen Aspekt, des **Informats** (carried, alt Getragenes)
- **Komplexität (Messung)** kann nur aus Informat (+Träger) bzw. System ermittelt werden
- kann u. a. **gewonnen, erzeugt, gespeichert, verarbeitet und genutzt** werden
- existiert primär nur in der **Zeit**, d. h. **funktionell**.
- gespeichert ist Information **nur potentiell vorhanden**, um sie zu benutzen muß wieder ein Zeitablauf erzeugt werden
- Information - genauer Getragenes - ist **schwer zu erzeugen/gewinnen, aber leicht durch Speichern** (genauer des Trägers) zu vervielfachen
- einmal gespeichert kann sie im Prinzip **nicht mehr verloren gehen** (Vervielfältigung)
- ist im Prinzip **ressourcenfrei**, kann also beliebig wachsen
- **Messen** liefert spezielle Aspekte der Information (und des Systems).
- Das heute gebräuchliche **Bit genügt nicht** den vielfältig komplexen Zusammenhängen
- kann **wahr, glaubhaft, wahrscheinlich, irrelevant oder falsch** sein Gesetze der





Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den fünf Begriffen

Wissenschaft der Medien

Nicht dazugehörend: **Medien** im Altertum = gebirgige Hochland von Nordwest-Iran
Dort im 9. Jh. v. Chr. **eingewanderte Meder**; bildeten im 7. Jh. einen Großstaat
Hauptstädte: Ekbatana, heute Hamadan und Rhagai, heute Raj = eine Vorstadt von Teheran
Wurde 550 v. Chr. durch Kyros II. Persien einverleibt

Betreffen viele Teilgebiete: **Kultur, Kunst, Wissenschaft und Kommunikation (Journalismus)**

Bzgl. **Wahrnehmung, Wissen, Sinn, Wirkungen, Meinungsbildung und Geschichte**

Kritik, Kontrolle, Zensur, Werbung, Manipulation, Propaganda und Desinformation

Haben im weitesten Sinne **Einfluss auf Gedächtnis, Interaktion und Lebensformen**

Unterscheidung: **Einzelmedien**; z. B. Zahl, Schrift, Buch und Geld

⇔ **technischen Medien**, z. B. Fotografie, Schallplatte, Film, Rundfunk und Fernsehen

Im Folgenden fast nur **technische und strukturelle Eigenschaften** neuerer Medien

Grenzen der aktuellen Kommunikation

Informations-Austausch ist für Menschen – als *gesellschaftliche Wesen* – äußerst wichtig

Ursprünglich findet die „notwendige“ *Kommunikation unmittelbar* statt

Vorrangig erfolgt sie über Sprache (akustisch), z. T. über Mienen, Gesten und Gebärden (bildlich)

Typisch dafür sind *Gespräch* und *Diskussion* als *bi-direktionaler* „Gedanken“-Austausch

Spezielle Weiterentwicklung sind *uni-direktional*: *Vortrag, Rede* usw. ⇒ *einer an viele*

Noch einseitiger gerichtet sind die Varianten von *Theater* ⇒ *mehrere an viele*

Alle unmittelbaren Varianten haben *zwei wesentliche Grenzen*:

1. Sie finden *aktuell* statt, es liegt ein streng *zeitlicher Rahmen* (Begrenzung) vor
Nach dem Geschehen sind nur in den Gedächtnissen der Teilnehmer nur Fragmente vorhanden
eine *genaue Rekonstruktion* ist daher so gut wie *nicht möglich*
2. Sie sind *ortsgebunden = räumliche Grenze*
Durch Schallausbreitung und Sichtbereich ist die Reichweite des Geschehens eingeeengt
An andere Orte kann die Information nur über das Gedächtnis der Teilnehmer gelangen
Die *Geschwindigkeit* ist zusätzlich durch die Bewegungsfreiheit der Einzelnen begrenzt

Systematik der Grenzüberwindungen

Im Laufe der Menschheits- und Technikgeschichte sind *sehr viele Varianten entstanden*

Zur Erfassung sind mehrere Parameter zu berücksichtigen, besonders wichtig sind:

1. **Grenzüberwindung:**
Unmittelbar $\Leftrightarrow$ aktuell + Technik $\Leftrightarrow$ klassische und elektronische Speicher
2. **Gerichtetheit:** uni- $\Leftrightarrow$ bi-direktional $\Leftrightarrow$ Interaktivität bei technischen Medien
3. **Beteiligte Teilnehmer** auf Sender- bzw. Empfangs-Seite
4. **Beabsichtige Wirkung:** Wissen vermitteln und gewinnen, beeinflussen, geheim halten
5. Berücksichtigung zusätzlicher **Sinne**, vor allem **akustisch** oder **optisch**, z. T. Berührung
6. Arten der **Informationsträger**: kontinuierlich $\Leftrightarrow$ diskret $\Leftrightarrow$ digital
7. **Verwendeter Code**,
z. B. Alphabet, MORSE-Code, Trommel-, „Sprache“, Piktogramm, Kryptografie
8. **Geschichtlicher Ablauf**

Zwei Literatur-Beispiele

Infolge der 8 Parameter kann es keine einfache oder 2-dimensional bildliche Systematik geben
Für die Betrachtungen müssen immer einzelne Aspekte ausgewählt werden.
Das schlägt sich auch in der Literatur nieder

[Hiebel]

liefert eine **rein historische** Sammlung und
fügt am Ende eine 6-seitige historisch geordnete Tabelle mit 4 Aspekten an
1. analoge optische, 2. analoge akustische, 3. Übertragungs-Medien und 4. Computer

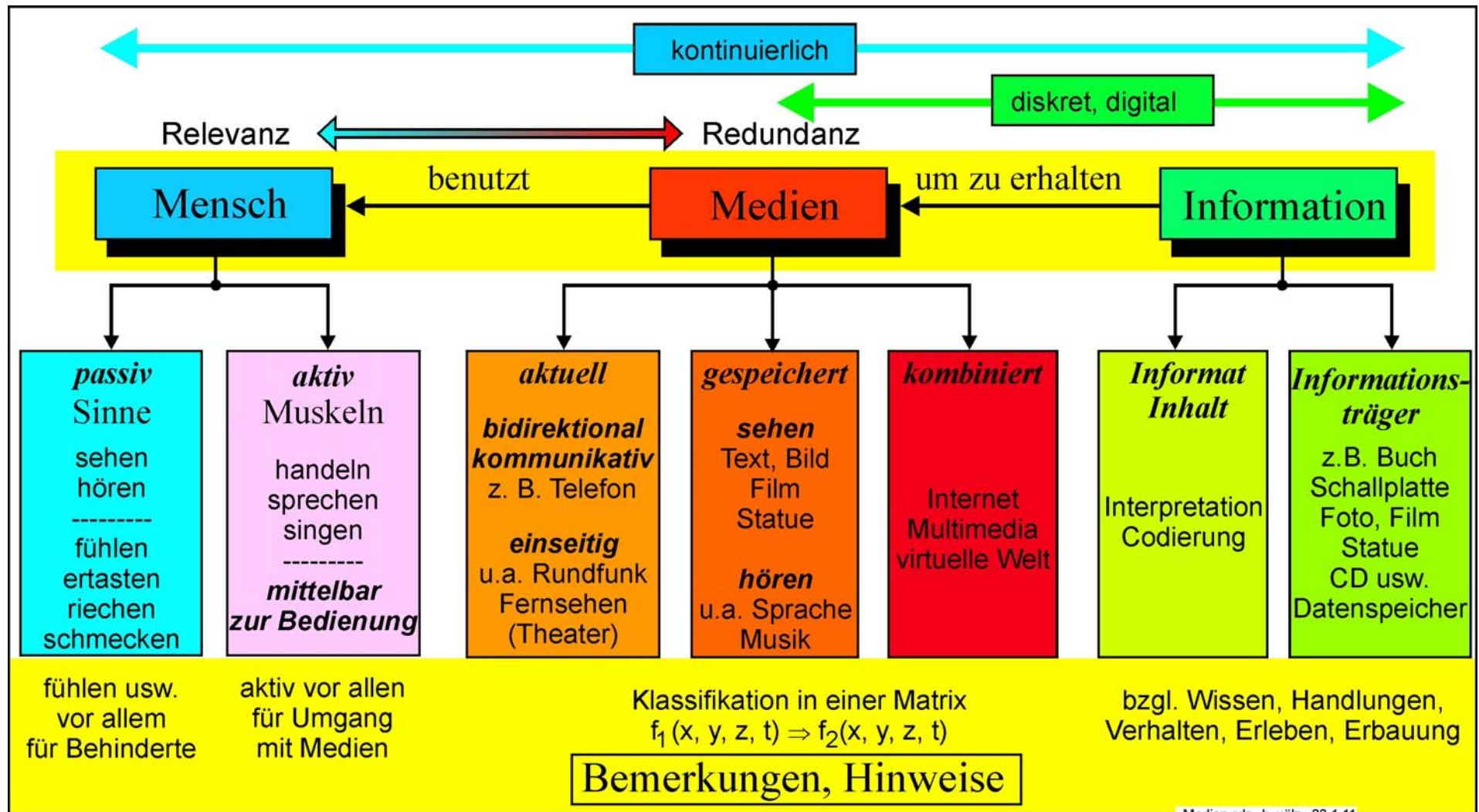
[Wersig]

bemüht sich um eine **beschreibende Darstellung, unterscheidet** zunächst:
Teilnehmerzahl, Datentypen, Träger-Übermittlung, Wege, physikalische Basis, analog - digital,
Funktionalität, Übergänge, raum-zeitliche Überwindung

Ausführlicher behandelt er dann mit Betonung der **historischen Etappen**:

- Klassische trägerorientierte Technologien: *Druck, Foto, Film, Schallplatte, Tonband*
- Klassischen Übertragungstechnologien: *Telegrafie, Telefon, Funk*
- Elektronische Datenverarbeitung: *Hardware und PC*
- Multimedia: u.a. *optische Platten und digitaler Rundfunk*
- Neue Netze (*Internet*)

Erfassung des Zusammenhangs der Einflussgrößen



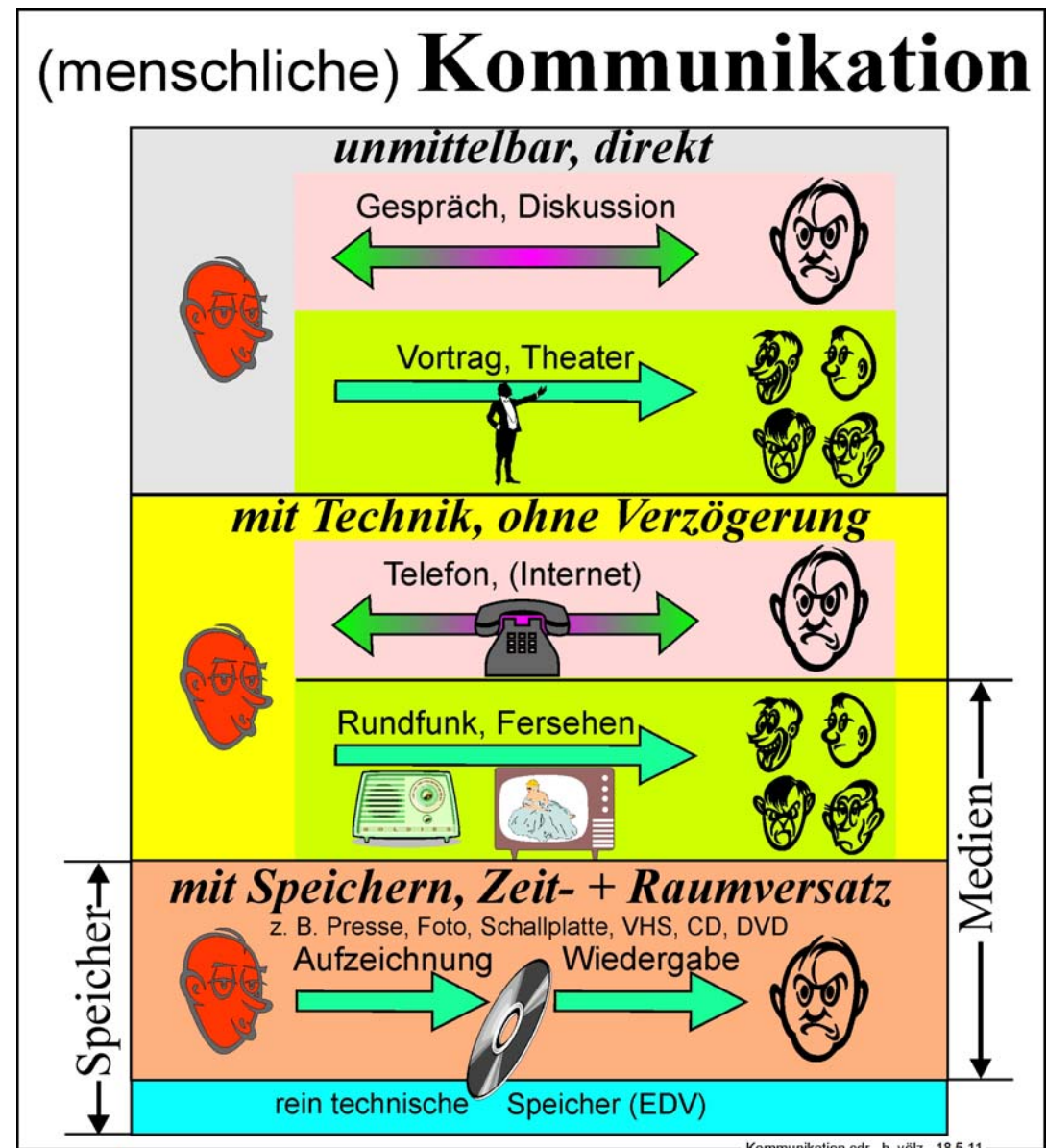
Medien.cdr h. völg 22.1.11

Stark vereinfachte Darstellung und Abgrenzung

Achtung!

Nicht berücksichtigt sind hier, u. a.

- **Tier-Kommunikation**
- Rein **technische** Kommunikation, z. B. zwischen Rechnern, auf Fließbändern, bei Robotern usw.



Hilfsmittel bidirektional aktueller Kommunikation

Ohne zwischengeschaltete Speicher

v. Chr.

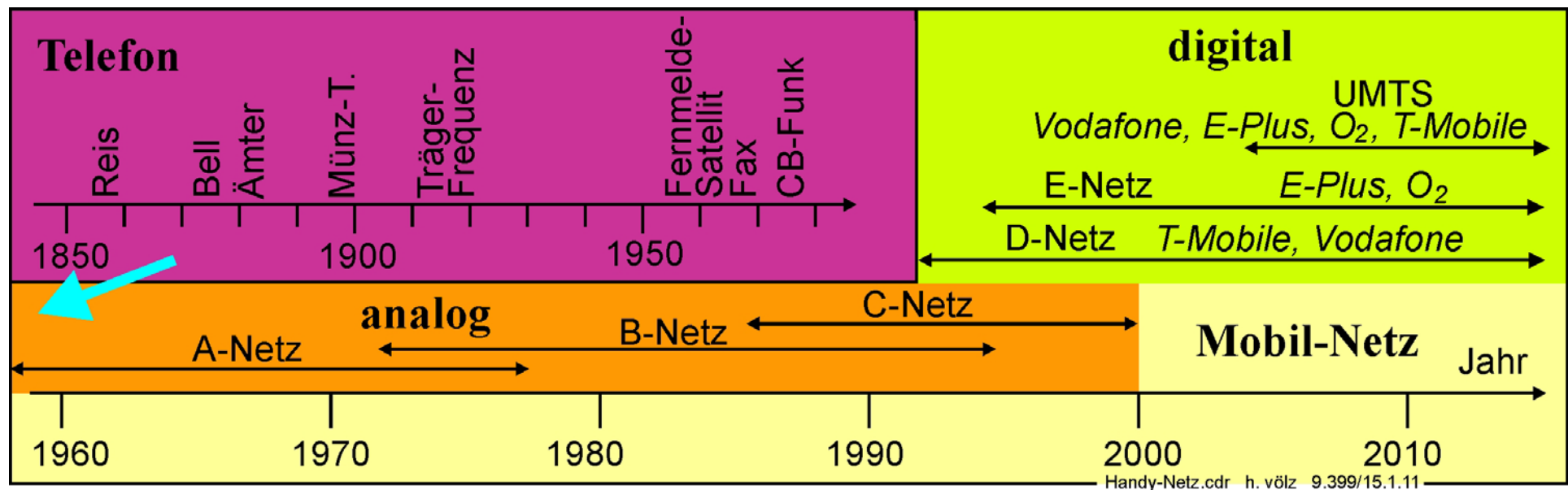
- 1500 Boten (Kryptografie)
- 800 Fackelzeichen, später auch Rauch- und Trommelzeichen
- 500 Lauschbögen, -röhren usw. $\Rightarrow$ Mythos: Ohr des Dionysos
- 100 Gallisches Rufpostensystem

n. Chr.

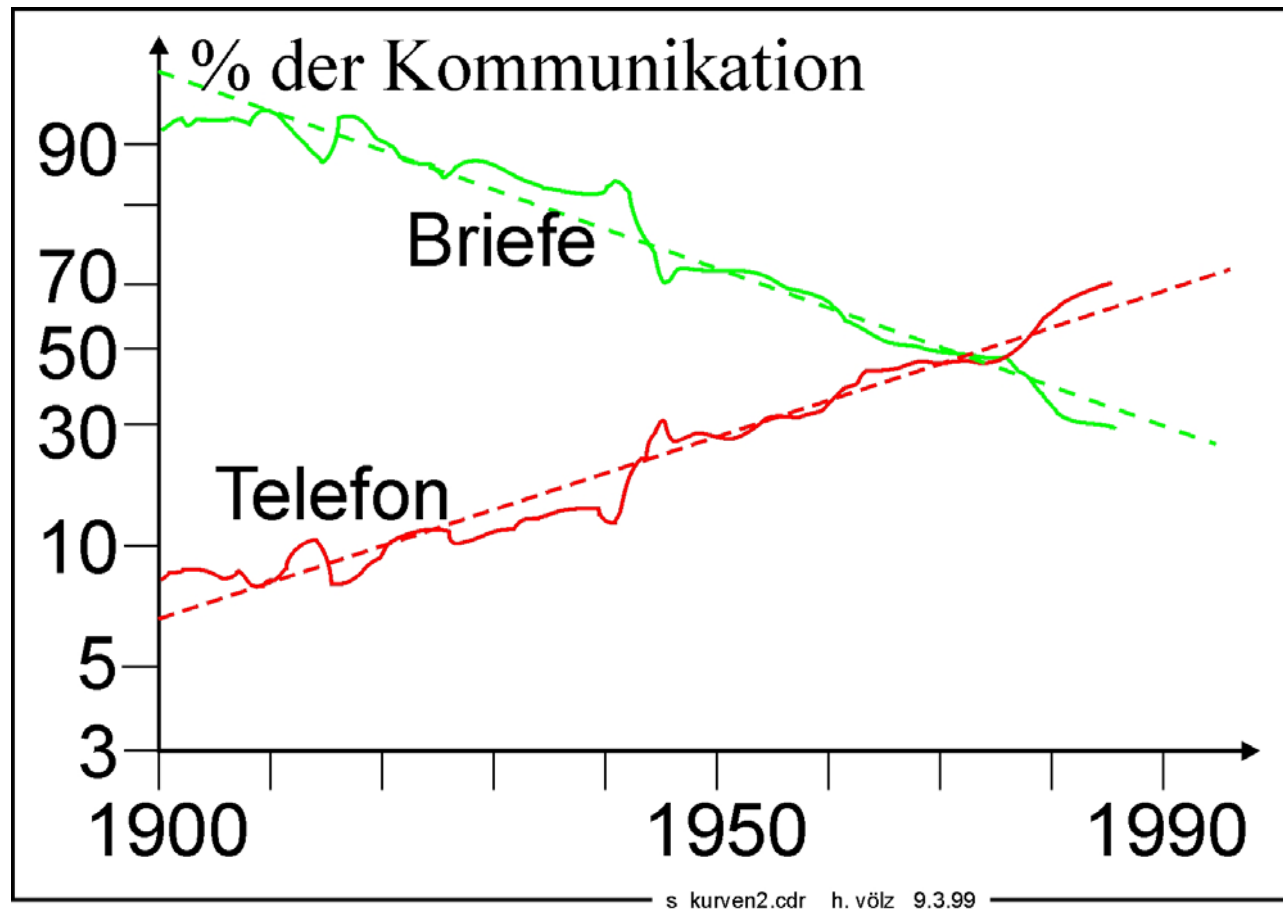
- 1620 Postkutsche
- 1790 Optischer Telegraf, z. B. CLAUDE CHAPPE
- 1870 Telefon, weiterentwickelt aus Telegrafie
- 1920 *Rundfunk, unidirektional, anonym* (Massenmedium)
- 1935 *Fernsehen, unidirektional, anonym* (Massenmedium)
- 1985 Handy
- 1990 Internet

Entwicklung der Telefon-Technik

Griechisch *tele* fern, weit; *phoné* Stimme



Wechselwirkung mit Briefverkehr



Leider fehlen noch ähnliche Daten für Auswirkungen des Mobilfunks

Rundfunk und Fernsehen

Im Gegensatz zum Telefon wird die Information ***von einem Sender ausgestrahlt***

Es werden so ***viele Teilnehmer*** erreicht, die jedoch ***doppelt anonym*** bleiben

Nämlich bzgl. des Senders als auch untereinander

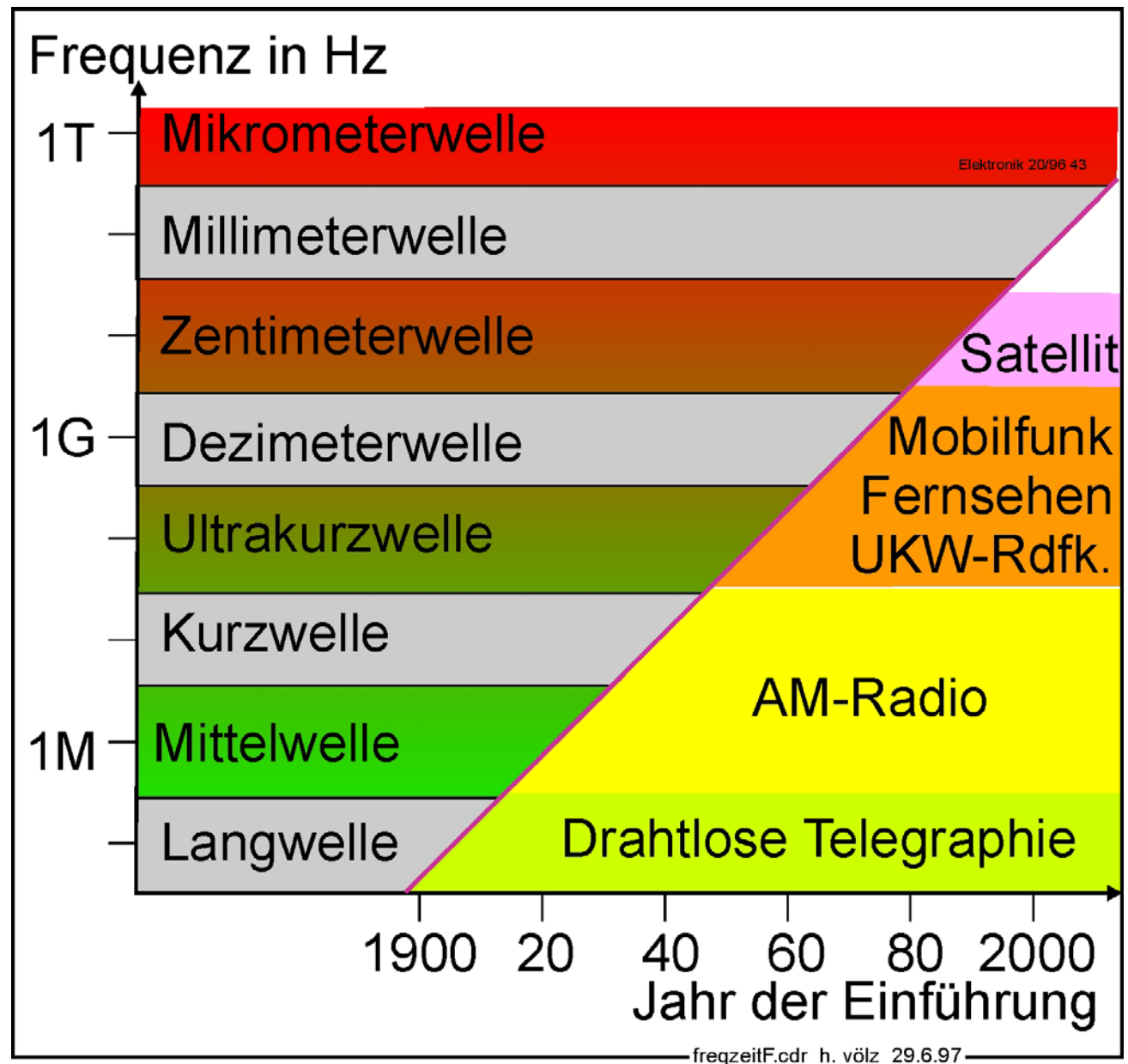
Auch wenn von ***Massenmedien*** gesprochen wird, ist es eigentlich ***gerichtete Kommunikation***

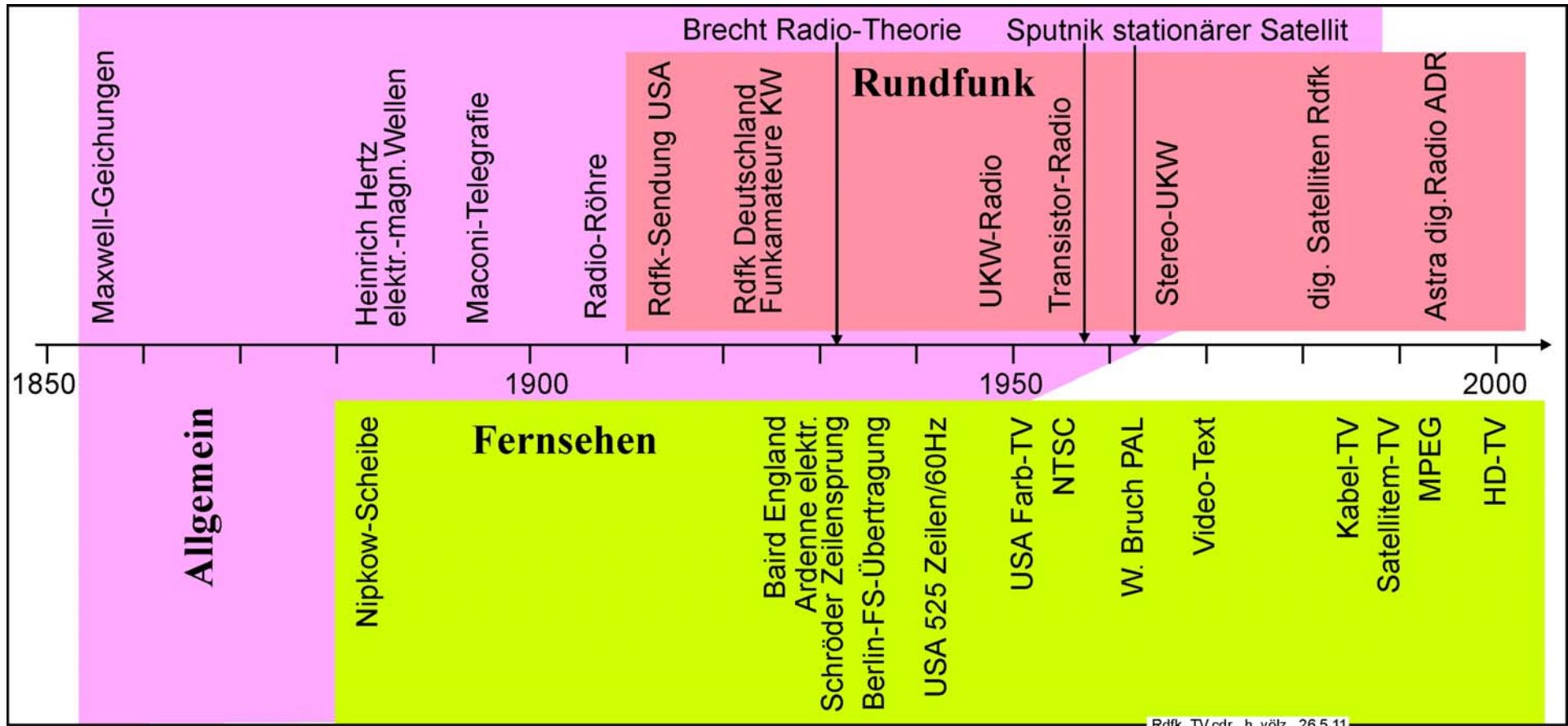
Ab 1990 kann das ***Internet*** als eine Erweiterung mit besserem ***Rückkanal*** gelten

Es setzt allerdings zusätzlich ***Speicherung voraus***

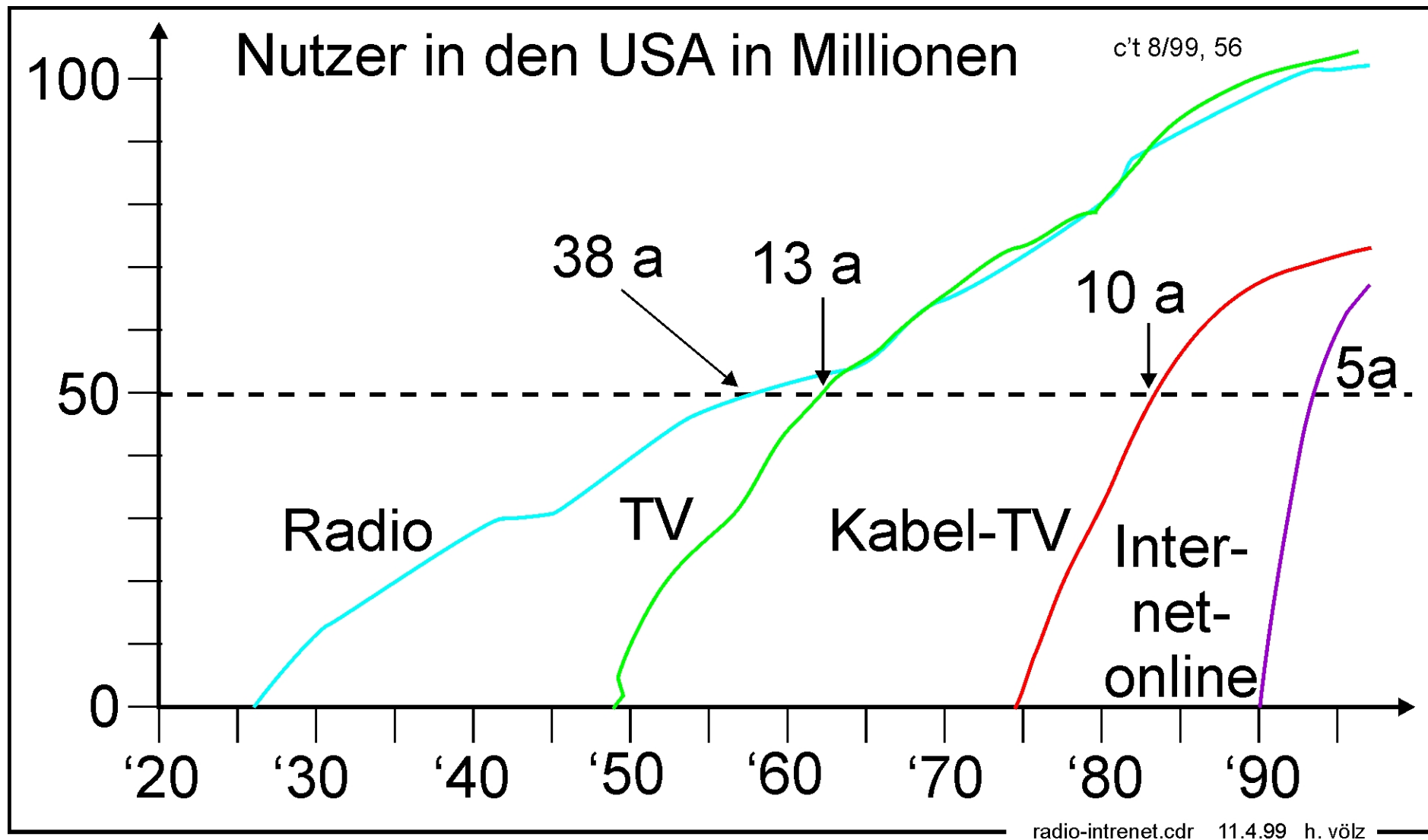
Die Nutzung höherer Frequenz schritt nahezu kontinuierlich voran

Dabei entstanden auch fortlaufend neue Rundfunk- und Fernseh-Anwendungen bzw. -Kanäle





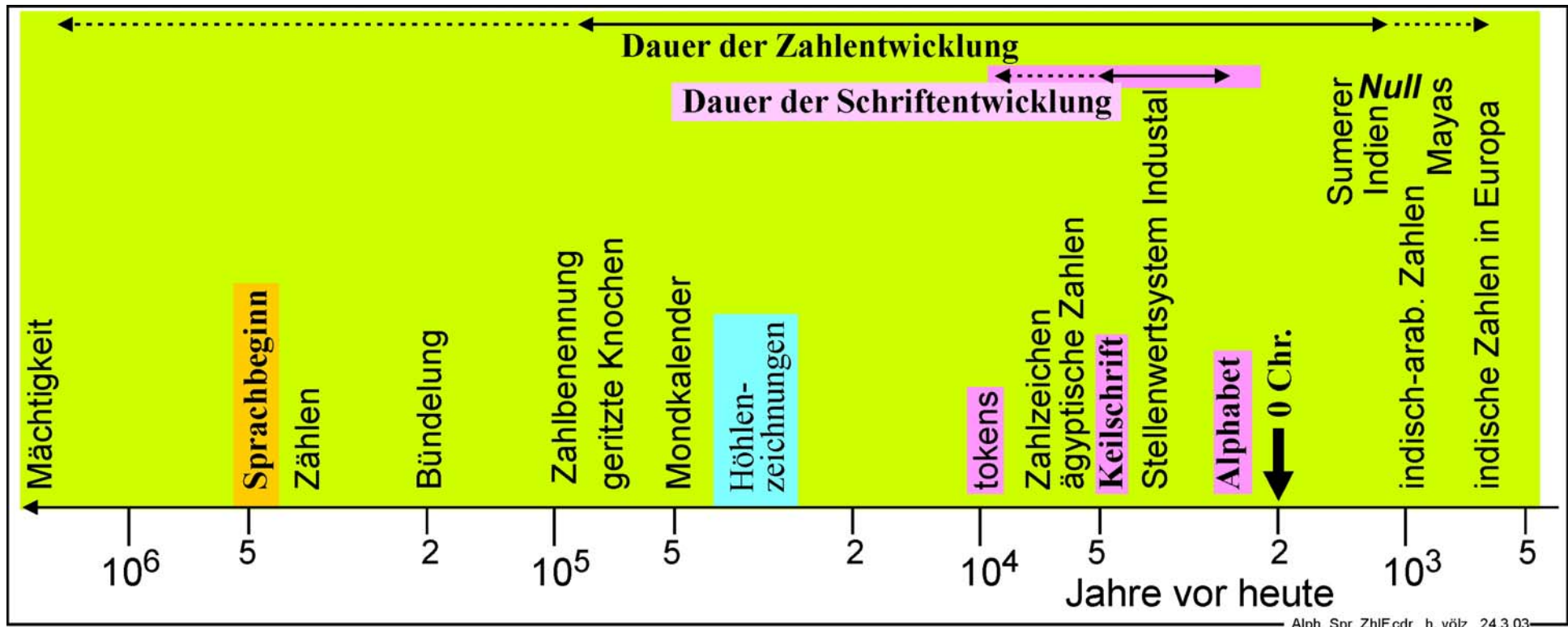
Entwicklung von Rundfunk und Fernsehen



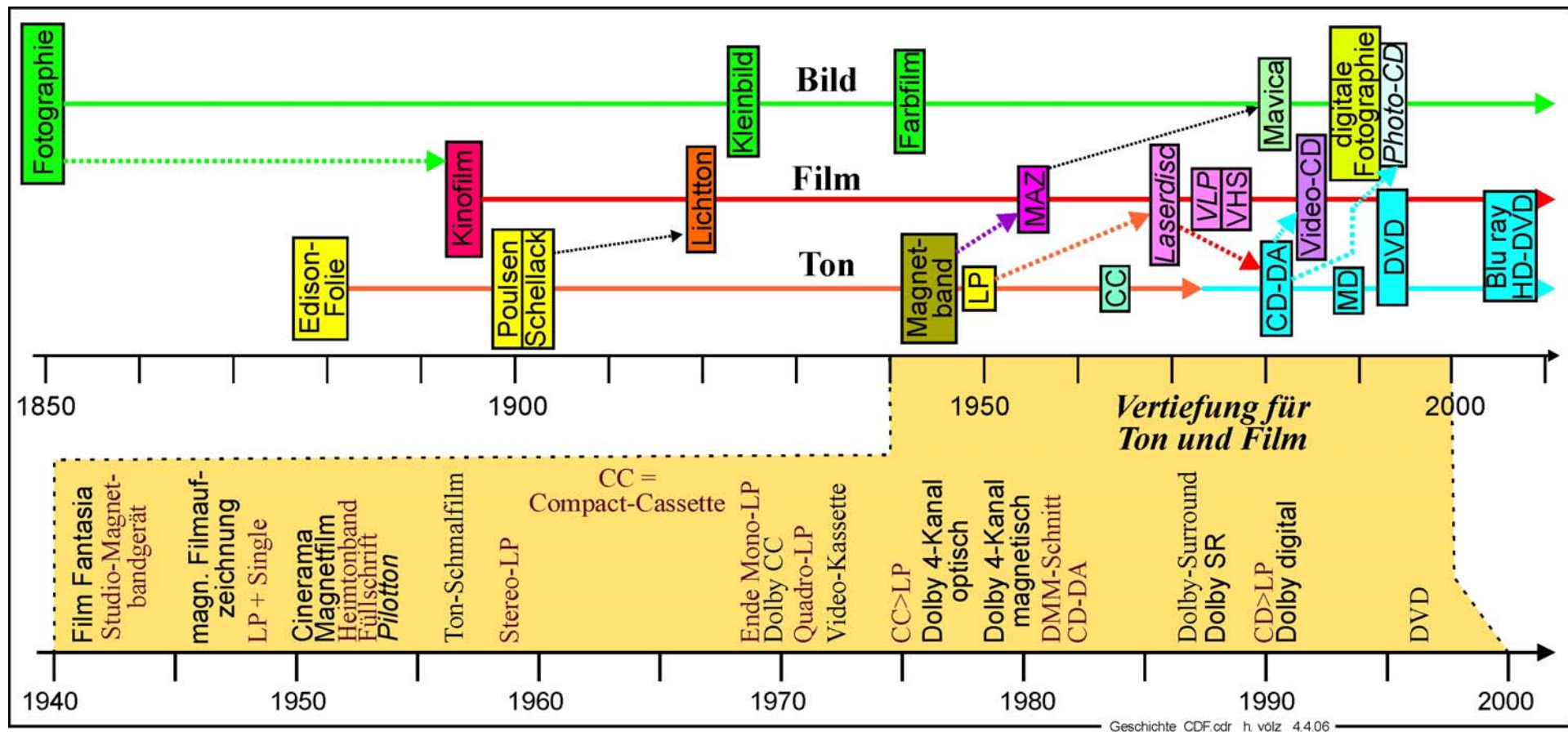
Die Zeitdauer bis zur breiten Nutzung verkürzt sich

Speicher als Erweiterung der Kommunikation

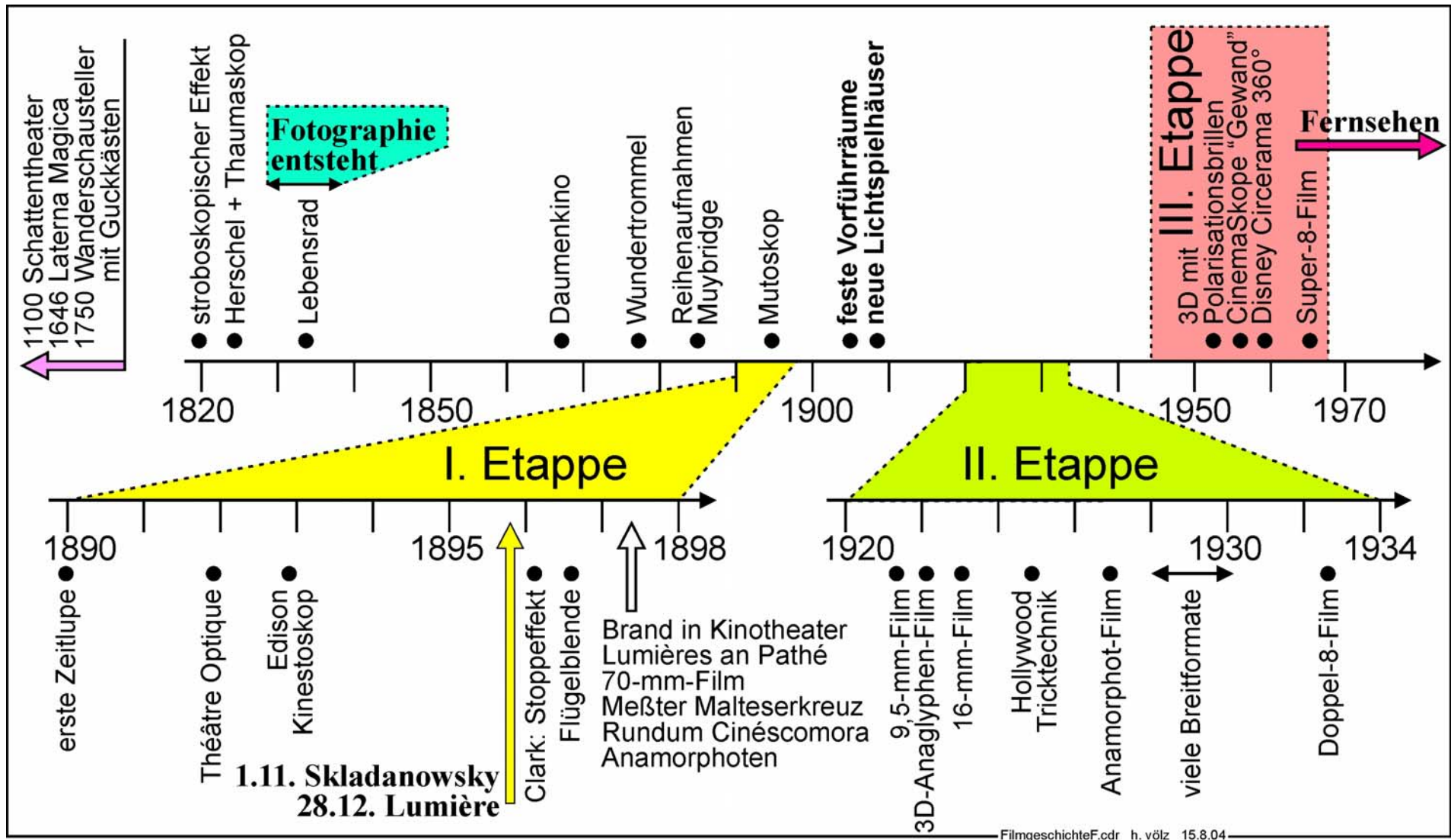
Die **aktuelle Information** ist bei der unmittelbaren Kommunikation nachher **nicht mehr vorhanden**
Der Mensch ist dann auf sein nicht besonders zuverlässiges **Gedächtnis** angewiesen
Deshalb schuf er sich zuerst die **Schrift** zur speichernden Aufzeichnung
Das ermöglichte auch ein besseres **Voraus-Denken**, bessere **Antizipation**
Außerdem ermöglichte sie, die Information zu **anderen Zeiten** und an **anderen Orten** zu nutzen
Sehr früh entstanden auch die ersten **Bilder**, die kein direktes Äquivalent zur Sprache besitzen
Erst **nach 1800** entstanden neue Speicher, insbesondere für Bilder, Film und Schall
Die eigentliche Entwicklung „technischer“ Speicher begann mit der **Elektronik um 1930**
Danach kamen ständig **weitere und bessere Speicher** hinzu, Magnetband, CD und Halbleiter
Sie entsprechen den **eigentlichen Medien** und führten auch zu **nur technisch genutzten Speichern**



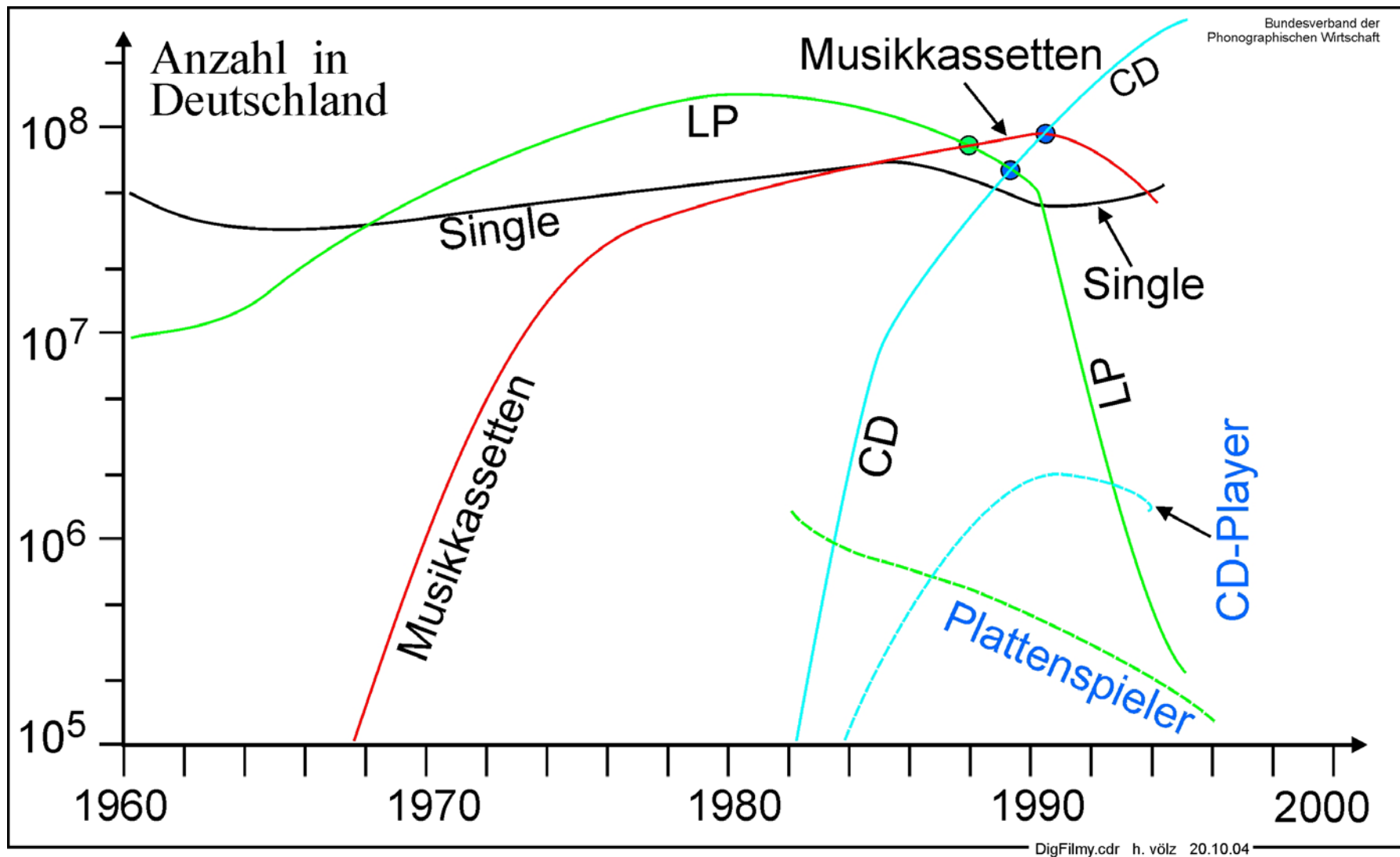
Vom **Spracherwerb** bis zur ersten **Aufzeichnung** vergingen fast 1 Million Jahre
 Die Entwicklung der **Zahl**-Begriffe hat deutlich länger als die **Schrift**-Entwicklung gedauert



Die direkte Schallaufzeichnung war offensichtlich besonders schwierig
Erst danach wurde der Film zum Tonfilm



Die Filmentwicklung zeigt drei ausgeprägte Etappen, die dritte führt indirekt zum Fernsehen



Der Übergänge **Schallplatte** $\Rightarrow$ **Tonband** $\Rightarrow$ **CD** ergibt sich aus den deutschen Absatzzahlen
 Der Übergang $\Rightarrow$ MP3 ist noch nicht ausreichend dokumentiert

Zur Systematik von Speichern und Medien

Neben der *historischen* Betrachtung gelingt eine *systematische* Beschreibung kaum
Es sind zumindest 5 *Aspekte* möglich: nämlich aus der Sicht der

- **Herstellung:** 1. manuell, 2. mit technischen, 3. elektronischen Mitteln bzw. 4. virtuell
- **Anwendung:** 1. Schrift, 2. Bild, 3. Raumgestalten, 4. Film, 5. Schall, 6. rein technisch
- **Eigenschaft des Speichermediums:** 1. direkt sichtbar, 2. mechanisch, 3. chemisch, 4. magnetisch, 5. elektrisch, 6. elektronisch, 7. optisch, 8. Tieftemperatur, 9. Sonstige
- **Art:** kontinuierlich $\Leftrightarrow$ diskret $\Leftrightarrow$ digital
- **Dimension:** $f(t)$, $f(x)$, $f(x, y)$, $f(x, y, z)$, $f(x, y, t)$ $f(x, y, z, t)$

Enteilung nach Anwendungen

Aus den 5 Aspekten ergeben sich **5fach-Kombinationen**

Sie sind für eine eindeutige Systematik zu vielfältig, das sei für die **Anwendungen** etwas vertieft

1. **Schrift:** manuell, Notiz, Brief, Schreibmaschine, Morse-Code, FAX, Telegramm, Buchdruck, eBooks usw.
2. **Bild:** Zeichnung, künstlerisches Bild, klassische +elektronische Fotografie, (Bar-Codes), elektronisch gespeicherte Bilder (JPG usw.)
3. **Raumgestalten:** Plastiken, Modelle, 3D-Bilder, Holografie, Magic Ey und virtuelle Räume
4. **Film:** Vorläufer (z. B. Traumaskop), fotografischer Film, Tonfilm, 3D, Videoband (u. a. VHS) DVD (MPEG), auf Festplatte oder elektronisch usw. sowie interaktive Medien
5. **Schall:** Spieluhren und ähnliches, automatische Instrumente (Welte-Mignon, Glockespiele) Edison-Walze, Schallplatte (Schellack, Vinyl usw.), auf Magnetband (u. a. Compact-Cassette), Mini-Disk, CD, DVD, elektronisch gespeicherte MP3, MIDI und ähnlich
6. **Rein technisch:** *elektronische* Speicher (u. a. Halbleiter), *magnetische* (Ferritkerne, Diskette, Festplatten, Magnetbänder), *opto-chemische* (klassische Fotografie + Film, Holografie), *opto-elektronische* (CD, DVD, blu disc), *magneto-otische* (Datendisk, Minidisk, opto-Tape), *zukünftige* evtl. ferroelektrisch, organisch, quantenphysikalisch

Ausgewählte Gebiete

Die weitere Behandlung erfolgt bevorzugt für elektronische Speichertechniken
Auf *historische* und *kontinuierliche* Speicher wird fast vollständig verzichtet
Bevorzugt werden *gegenwärtige digital-elektronische Speicher* behandelt
Ausführlicher behandelt sind die ausgewählten Gebiete in:

- Handbuch der Speichertechnik Band 3 (s. Lit.)
 - Als PDF-Dateien auf: aes.cs.tu-berlin.de/voelz/PDF/ (Dateinamen s. u.)
1. Allgemeines und Speicherdaten (Speichern.pdf + DatenSpeichern.pdf)
 2. Elektronische Speicher (Elektr_Arbeit.pdf)
 3. Mögliche zukünftige Speicher (Neue.pdf + Elektr_Arbeit.pdf)
 4. Holografie (Holografie.pdf)
 5. Magnetische Speicher (entfallen wegen Umfang und fehlender Zeit, sind überwiegend noch in Rechenzentren als Tape-Streamer sehr wichtig, ausführliche Dateien auf meiner Homepage, s. o.)
 6. Opto-elektronische Speicher (betreffen vor allem CD, DVD und Blu Disc, entfallen wegen Umfang und fehlender Zeit, sind aber auch bereits im Absterben begriffen. Ersatz elektronische Speicher, z. B SD und MP3, Festplatten und Tape, ausführliche Dateien auf meiner Homepage, s. o.)

1. Allgemeines und Speicherdaten

Typische Kenndaten von Speichern

Primär interessiert nur die *Speicherkapazität*, in zweiter Linie die *Zugriffszeit*

Doch allgemein gibt es *viele Kenndaten*

Für sie existieren unterschiedliche Werte, Sie betreffen vor allem:

- Wünsche für einen „*idealen*“ Speicher
- Theoretisch (physikalisch) *erreichbare Grenzen*
- Technisch *realisierbare* Werte
- Z. Z. *technisch erreichte* Werte
- Je nach Anwendung *notwendige, erforderliche* Werte

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

Werte eines „idealen“ Speichers

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)	€	$\rightarrow 0$

Bedeutung der Energie

Energie-Beziehungen sind wesentlich für die **theoretischen Grenzen** der Speicher

Speichern von **1 Bit** verlangt im möglichst **kleinen Volumen** 2 unterscheidbare **Zustände**

Sie müssen sich durch eine **Energieschwelle** unterscheiden

Sie muss groß gegenüber allen möglichen **Störungen** sein

Für die Beständigkeit des Speicherzustandes ist **zusätzliche Stabilisierungs-Energie** erforderlich

Zuweilen ist auch eine ständige **Refresh**-Energie notwendig

Für die **Aufzeichnung** ist die Energie zum Übergang zwischen den Zuständen erforderlich

Sie muss auf ein kleinstmögliches **Volumen konzentriert** werden

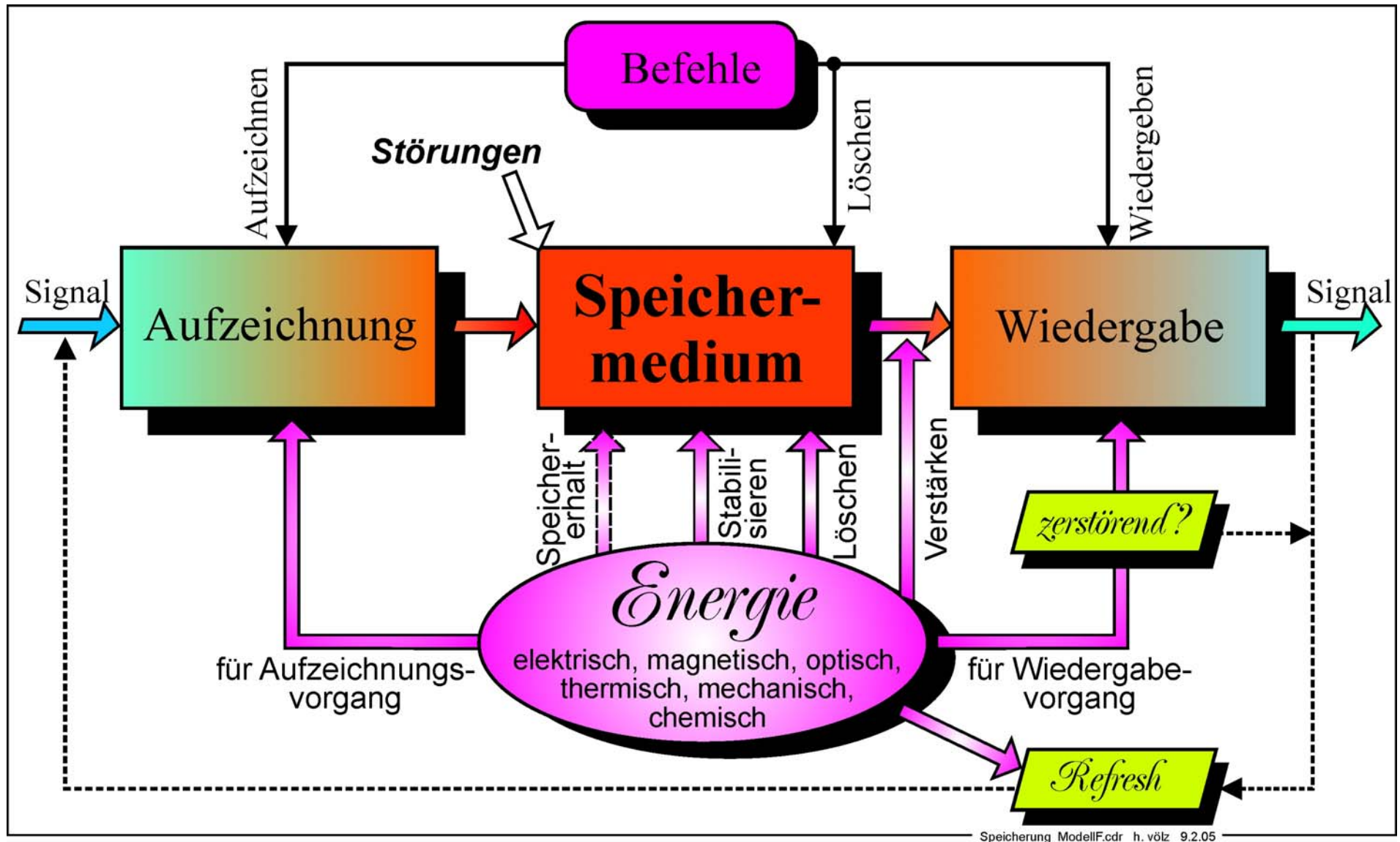
bevorzugt kann das mit **optischer Abbildung** oder **Magnetköpfen** erfolgen

Bei der **Wiedergabe** kann zur Erkennung höchstens die **Energie-Schwelle** genutzt werden

Dabei kann aber der Speicherzustand **zerstört** werden $\Leftrightarrow$ notwendig **Refresh**-Energie

Grundsätzlich ist eine beachtliche **Verstärkung** des Wiedergabesignals notwendig

Auch zum **Löschen** einer Information muss eine Energie-Schwelle überwunden werden



Minimal notwendige Energie für 1 Bit

In der SHANNON-**Theorie** gilt für die Kanalkapazität

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

B = Bandbreite des Kanals, Nutzleistung = $P_N = z \cdot P_S$; P_S = Störleistung = $k \cdot B \cdot T$
 k = BOLTZMANN-Konstanten; T = absolute Temperatur. Dann gilt

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

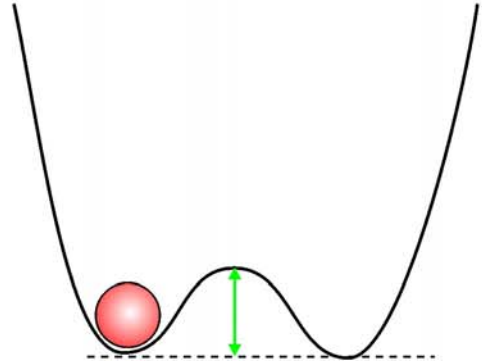
$$\frac{P_N}{C} = k \cdot T \cdot \frac{z}{\lg(1+z)} \quad \text{in} \quad \frac{\text{J}}{\text{Bit}} \quad \left(\text{bzw. in} \quad \frac{\text{W}}{\text{Bit/s}} \right).$$

Wegen Reihenentwicklung $\frac{z}{\ln(1+z)} = \frac{1}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{3} - \frac{z^3}{4} \pm \dots}$ folgt $1 \leq \frac{z}{\ln(1+z)} \rightarrow 1$ für $z \rightarrow 0$

Für den Grenzfall $z \rightarrow 0$ folgt somit für die je Bit notwendige Energie

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

Bit-Energie aus thermodynamischer Sicht

Boltzmann-Formel	$S = k \cdot \ln(W)$	2fach entartetes System  Energie-Schwelle
Vor der Messung <i>je Zustand $W = 1/2$</i>	$S = k \cdot \ln(0,5)$ $= -k \cdot \ln(2)$	
Nach der Messung <i>Zustand ist bekannt $W = 1$</i>	$S = k \cdot \ln(1) = 0$	
Energie = Wärme-Menge, die bei der Messung gewonnen werden kann	$\Delta Q = \Delta S \cdot T$ $= k \cdot T \cdot \ln(2)$	Es bedeuten: S = thermodynamische Entropie W = Zustands-Wahrscheinlichkeit k = Boltzmann-Konstante T = absolute Temperatur

entromesF.cdr h. vözl 2.1.94

Die quantenphysikalische bzw. thermische Ableitung ergibt den gleichen Wert

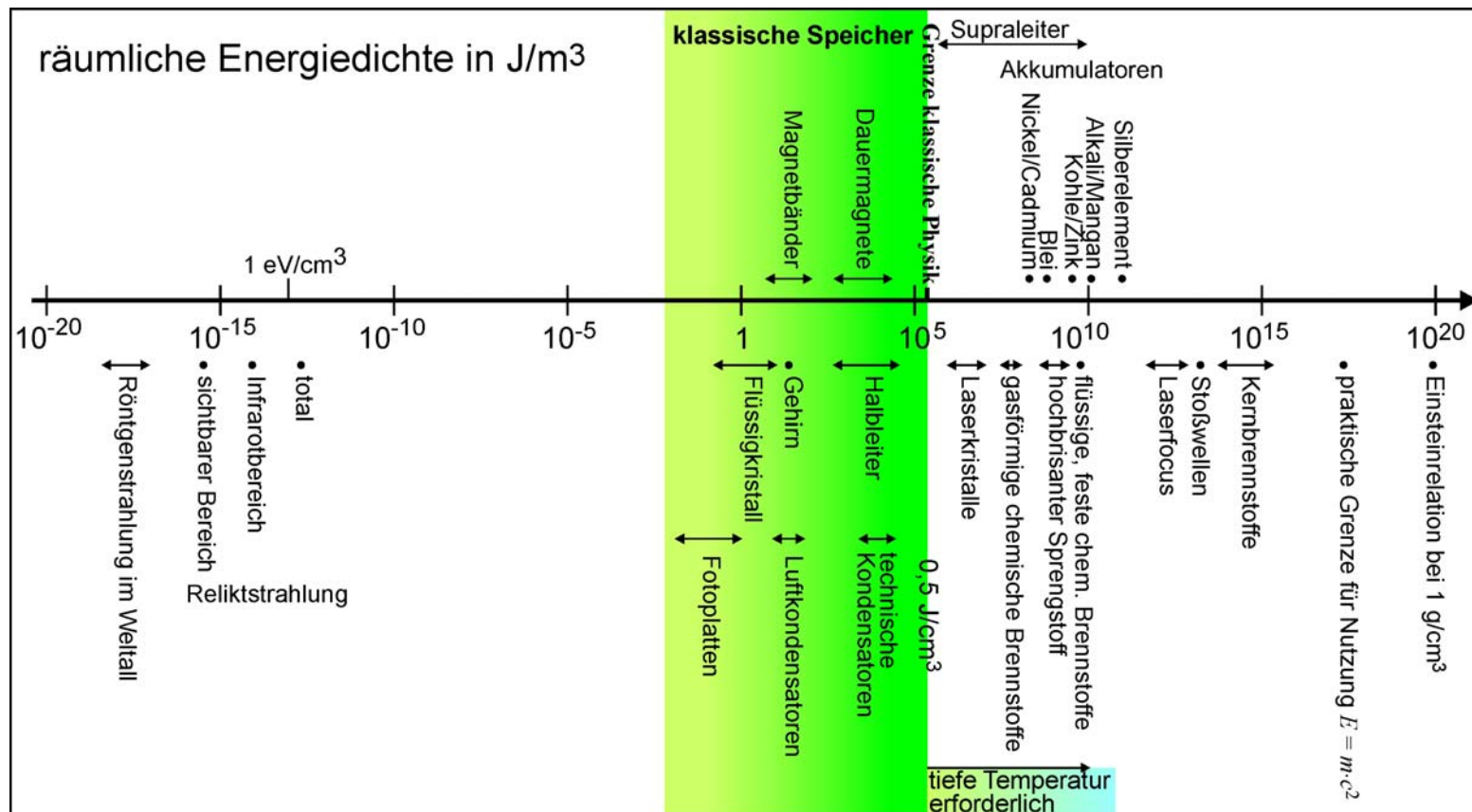
Energie-Dichte

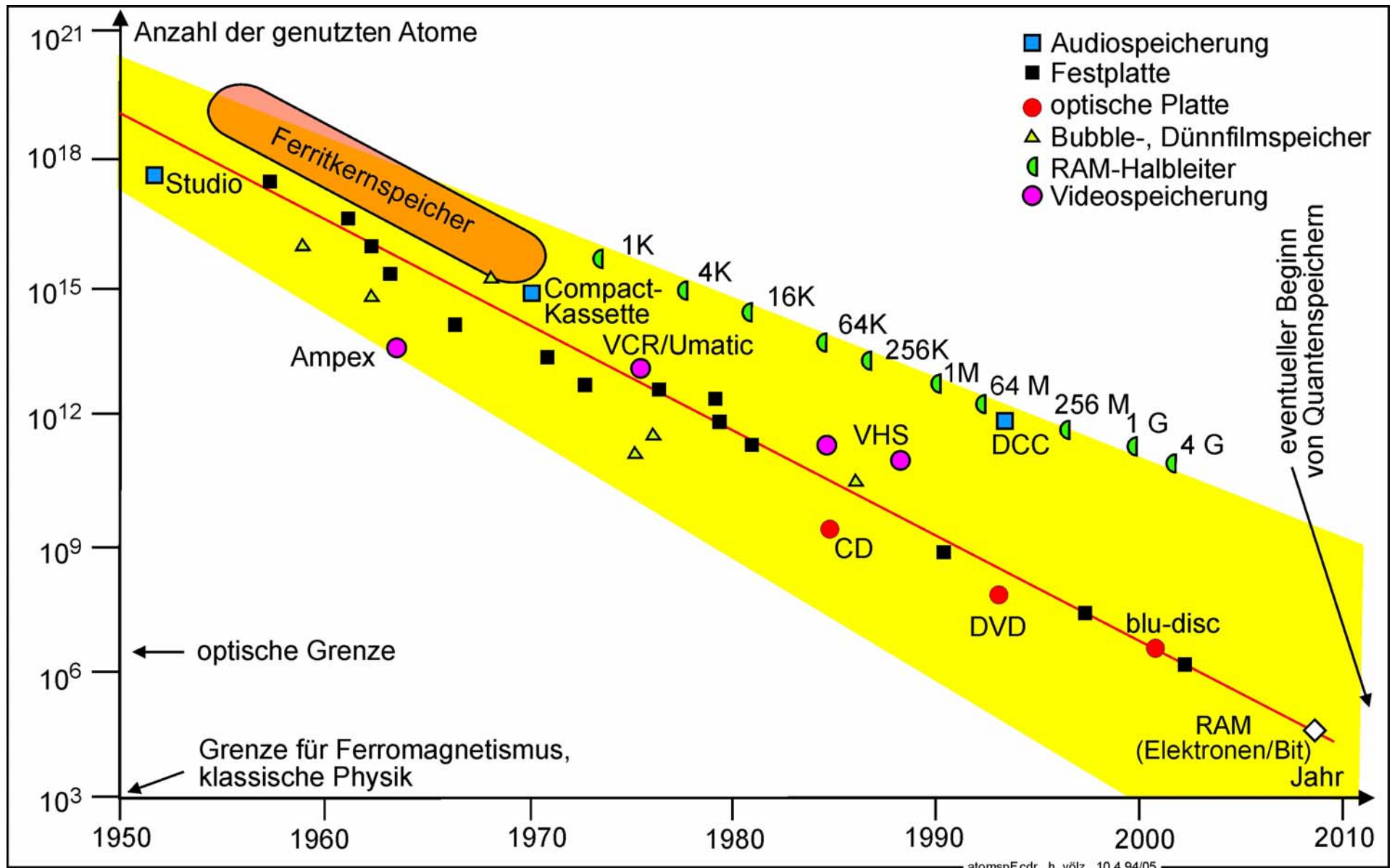
Für jedes Material gibt es eine obere Energiedichte, bis zu der es stabil bleibt

Für die wichtigsten Speichermedien liegt sie bei $0,5 \text{ J/cm}^3 \Rightarrow$ kleinstmögliches Bit-Volumen

Sie gilt z. B: bei Magnetmaterial oder Dielektrika von Kondensatoren

Entspricht der Grenze der klassischen Physik von $\approx 1\,000$ Atomen $\Rightarrow \approx 10^{-20} \text{ cm}^3$





Beständigkeit des Speicherzustandes

Durch Überschreiten der *Energieschwelle* ΔE kann der *Speicherzustand* zerstört werden:

- *Thermodynamische Energie* mit MAXWELL-Verteilung
- *Tunneleffekt*, z. B. Radioaktivität
- *Verzögerter Rückfall* infolge nicht senkrechten Übergangs (s. Laser), z. B. Lumineszenz

Abschätzung durch ARRHENIUS-Gleichung von 1896; SVANTE AUGUST ARRHENIUS (1859 - 1927)

Für Speicher ist die Halbwertszeit (50 % Wahrscheinlichkeit) wichtig:

$$t_H = t_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{k \cdot T}}$$

T = absolute Temperatur, $k \approx 1,36 \cdot 10^{-23}$ J/K = BOLTZMANN-Konstante; t_0 = Zeitkonstante

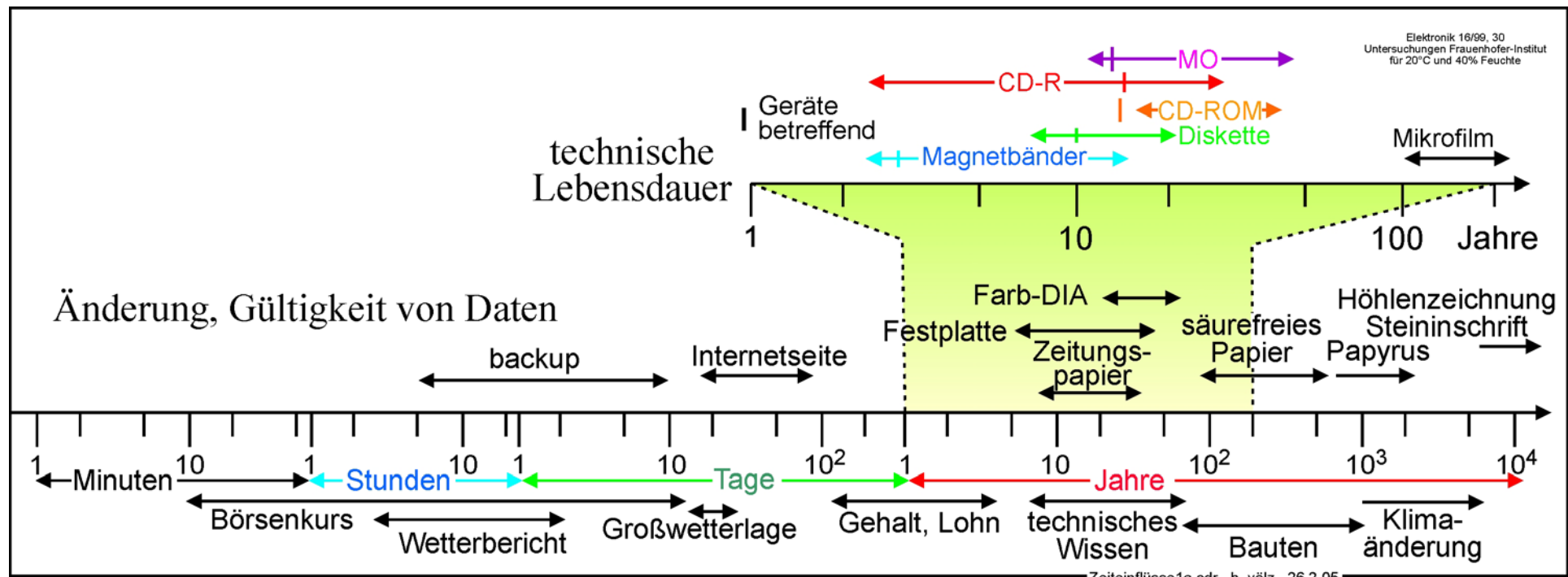
Für Elektronenbahnen beträgt sie $\approx 3 \cdot 10^{-15}$ s, für Gitterschwingungen $\approx 10^{-4}$ s

Es gibt *keinen absolut sicheren Speicherzustand*, *jedoch* kann die *Fehlerrate sehr klein* werden

Gültigkeit von Daten

Nur wenige Daten stehen unabänderlich fest, die meisten ändern sich im Laufe der Zeit
 Hieraus folgen **Update-Raten**, in Apotheken z. B. fast täglich
 Andere Daten gelten für „immer“, z. B. Konstanten der Physik

Beständigkeit der Speicherung $\Leftrightarrow$ Lebensdauer der Daten



Konzentration bei der Aufzeichnung

Die Energie zur Änderung des Speicherzustandes muss auf das **Bit-Volumen konzentriert** werden
Die höchste **Bündelung** ist mit elektromagnetischer Strahlung (Licht) zu erreichen
Infolge der **Beugung** gilt mit der Apertur A_n und Wellenlänge λ für das Brenn-Volumen

Durchmesser $\varnothing_B \approx 0,6 \cdot \lambda / A_n$ und Länge $L_B \approx \lambda \cdot A_n$

Das Brennvolumen ist daher praktisch unabhängig von der Apertur $V_B \approx \varnothing_B \cdot L_B \approx \lambda^3$
Ein **einzelnes Photon** besitzt die Energie

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

ν Frequenz des Photons, $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s Lichtgeschwindigkeit, $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s = PLANCK-Konstante
Im Beugungsvolumen V_B herrscht daher die **mittlere Energiedichte**

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

Für eine Aufzeichnung muss sie mindestens die Energiedichte im Speichermedium erreichen
Für die klassischen Grenze ($w \geq 0,5$ J/cm³) folgt die kürzeste Wellenlänge: **25 nm** (fernes UV)
Daraus folgt das kleinstmögliche Volumen zu ≈ 500 nm³ und eine Speicherdichte $\approx 10^{22}$ **Bit/m³**
Die 25 nm erreicht die Halbleiterlithographie auch in der Strichbreite (Magnetkopf-Spalt)

Minimale Wiedergabezeit $\Leftrightarrow$ Bit-Zelle

Spätestens bei der Wiedergabe = Messung hat auch die Zeit einen wesentlichen Einfluss mit h = PLANCK-Konstante, Δt = Messzeit und ΔE = Energie gilt die HEISENBERG-Unschärfe

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

Bei elektronischen Schaltungen tritt ähnlich das Produkt **Schaltleistung** $\times$ **Schaltzeit** auf
Für ausreichende Sicherheit von **1 Bit** ist ein Störabstand z erforderlich

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

Bei Zimmertemperatur ($T \approx 300$ K) und Störabstand 60 dB ($z \approx 1000$) folgen $\approx 10^{-13}$ s

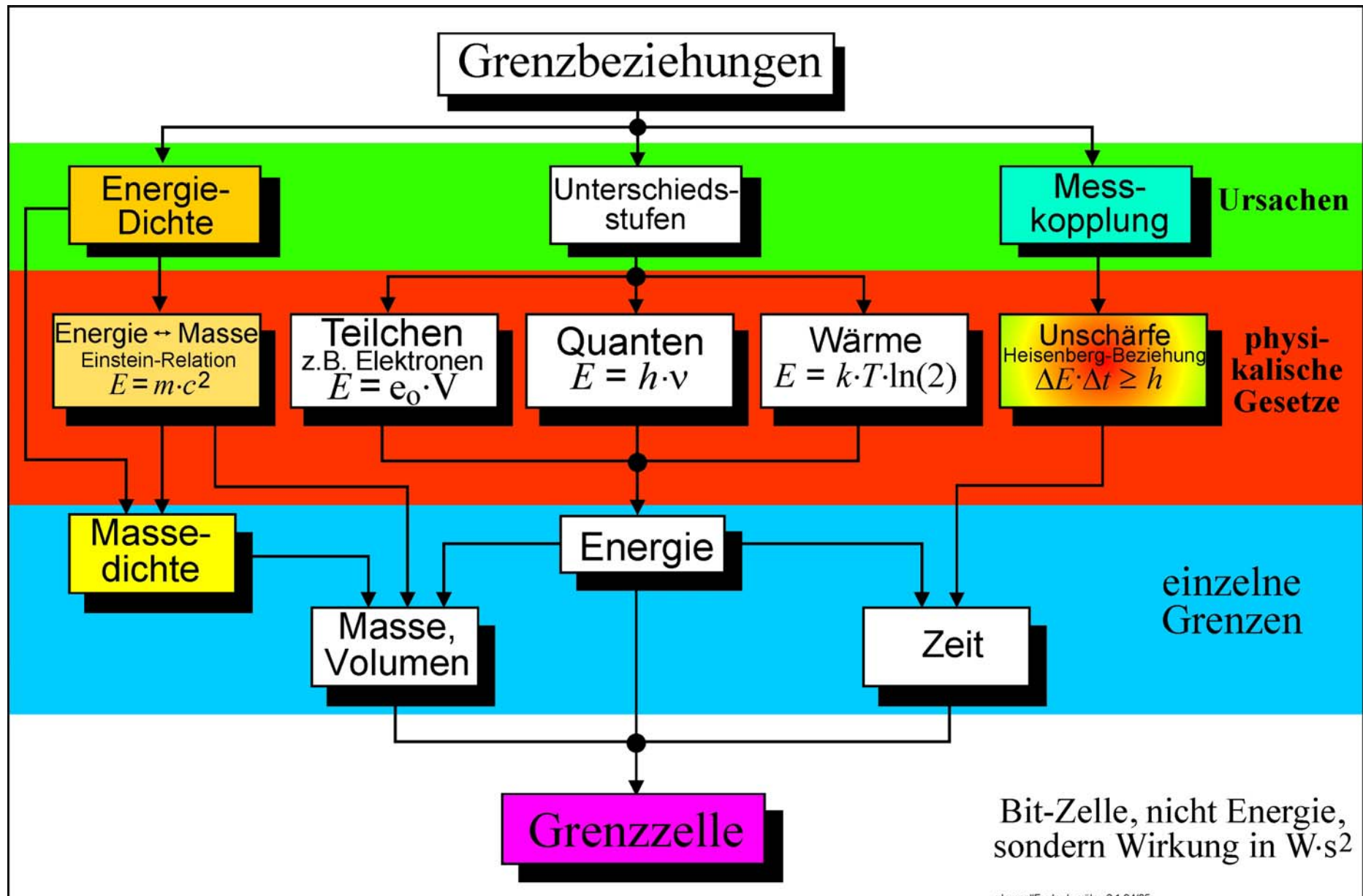
Bei **tiefen Temperaturen** genügt kleinere Bit-Energie, dafür tritt aber längere Messzeit auf

Bei mehreren **Energiestufen** des Speicherzustandes ist Δt entsprechend **größer**

Dennoch sind **realisierte Wiedergabezeiten** durch andere technische Fakten deutlich länger

Wegen dieses Einflusses gibt es eine minimale **Grenz-Zelle** für 1 Bit

Zu ihr gehört statt der Energie in Joule eine **Wirkung** in J·s bzw. W·s²



Vergleich der Grenzen

Theoretisch ergeben sich folgende Grenzen für

Speicherzustand gemäß den 1000 Atomen.....	$\approx 10^{26}$ Bit/m ³
Aufzeichnung für $\lambda \rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$
infolge Energiedichte und Bündelung von Licht gemäß 25 nm.....	$\approx 10^{22}$ Bit/m ³
Messzeit für Wiedergabe infolge $\Delta t \cdot \Delta E \geq h$	$> 10^{-13}$ s
Wiederfinden des Ortes vom Speicherzustand.....	$\approx 10^{20}$ Bit/m ³

Diese Werte liegen um **viele Größenordnungen** über dem heute technisch **Erreichten**
Fast immer gilt bzgl. der **Speicherdichten**

$$\text{Aufzeichnung} \geq \text{Speicherzustand} \geq \text{Wiedergabe}$$

Langfristig bestehen **erhebliche Reserven**, die jedoch schwer auszunutzen sind
Teilweise ergeben sich auch Möglichkeiten, die theoretischen Grenzen zu verschieben

Zukünftige Varianten könnten sein:

Speicherzustand: **Tieftemperatur**-Physik, **Quanten**-Verfahren

Energiekonzentration: Kombination von **Magnetspalt und Magnetooptik**, sowie Nichtlineare Optik,
nichtklassische Beugungsverfahren, Elektronenstrahlen, Materiewellen, Tunnelkraftmikroskop

Speicherkapazität und Zugriffszeit

Zu Beginn der technischen Entwicklung waren nur Speicherkapazität und Zugriffszeit bedeutsam

Die Zugriffszeit ist durch den mittleren Abstand zwischen Aufruf und Erhalt der Daten bestimmt

Erste Erkenntnisse über ihren Zusammenhang entstanden 1967 [Völz67]

Für jeden bekannten Speicher existiert ein enger **Kapazitäts-Zugriffs-Bereich**

Nur in ihm ist eine ökonomische Fertigung möglich

Entsprechende „Flächen“ gibt es bis heute für alle Speicher, sie verlagern sich mit der Entwicklung

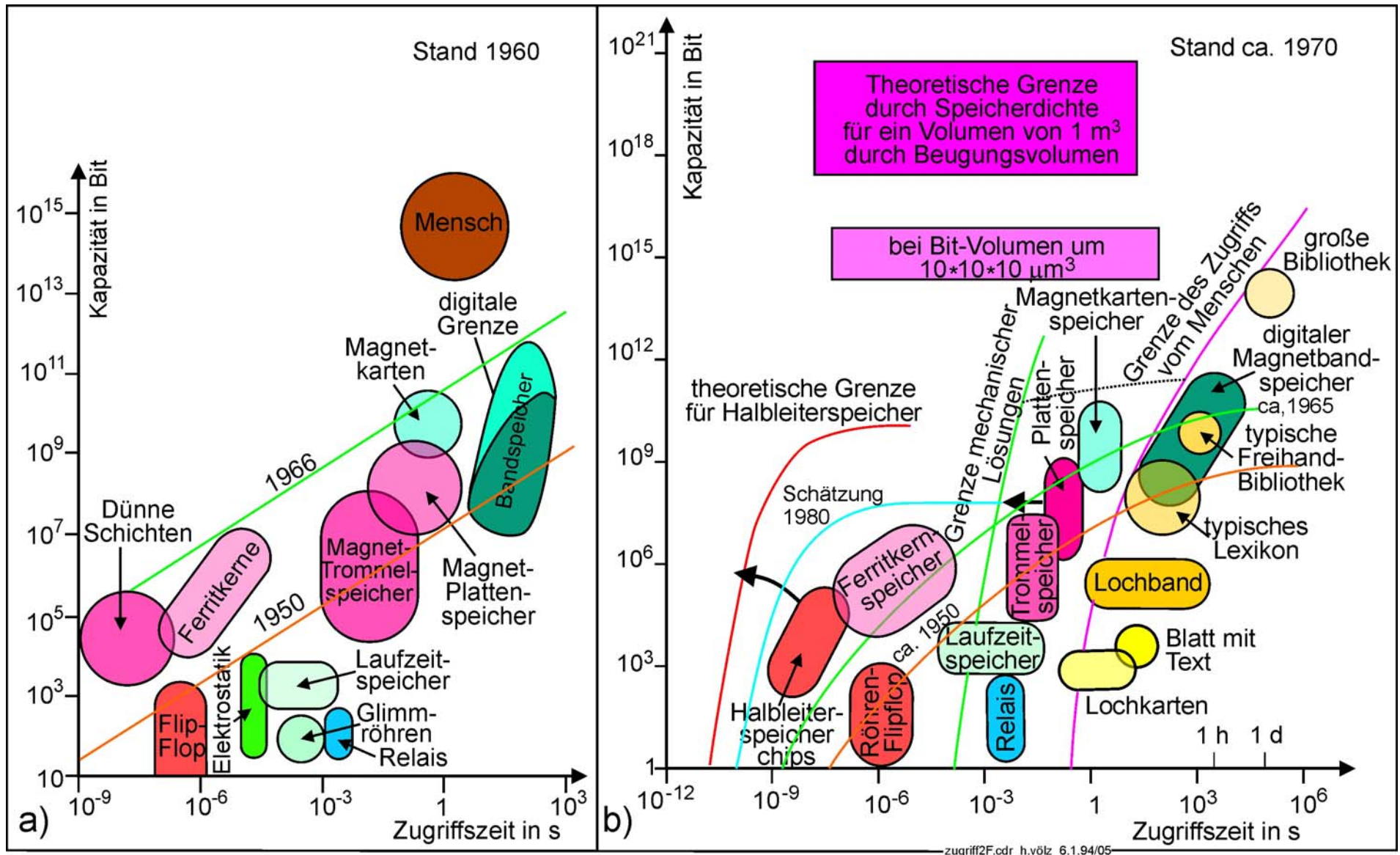
Um 1970 wurde dann deutlich, dass mindestens **drei Zugriffsgrenzen** zu unterscheiden sind

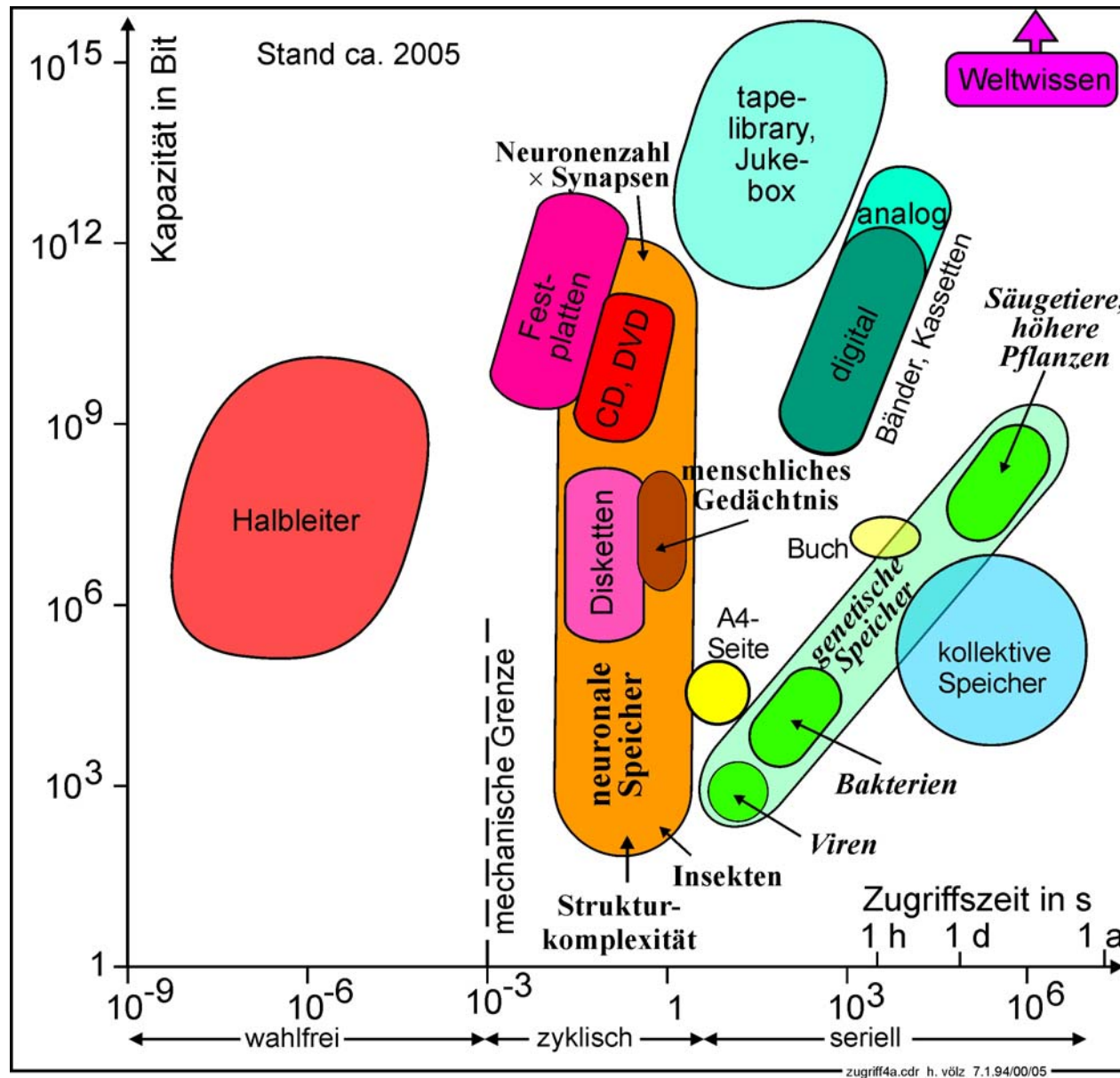
- **Elektronische** Speicher $\ll 1 \mu\text{s}$
- **Mechanisch** bewegte Speicher $\geq 1 \text{ ms}$
- **Menschlicher** Zugriff $\geq 1 \text{ s}$

Später konnten hinzugefügt werden

- **Optische, Tieftemperatur- und Quanten-Speicher** . $\leq 1 \text{ ps}$
- **Neuronale Speicherung (Gedächtnis)** $\approx 0,1 \text{ s}$
- **Genetik** = konstanter Quotient C/T_Z $\approx 2000 \text{ Nukleotide/s}$

Später zeichneten sich Grenzen für die erreichbare **Speicherkapazität** bei $\approx 10^{15}$ bzw. 10^{20} Bit ab

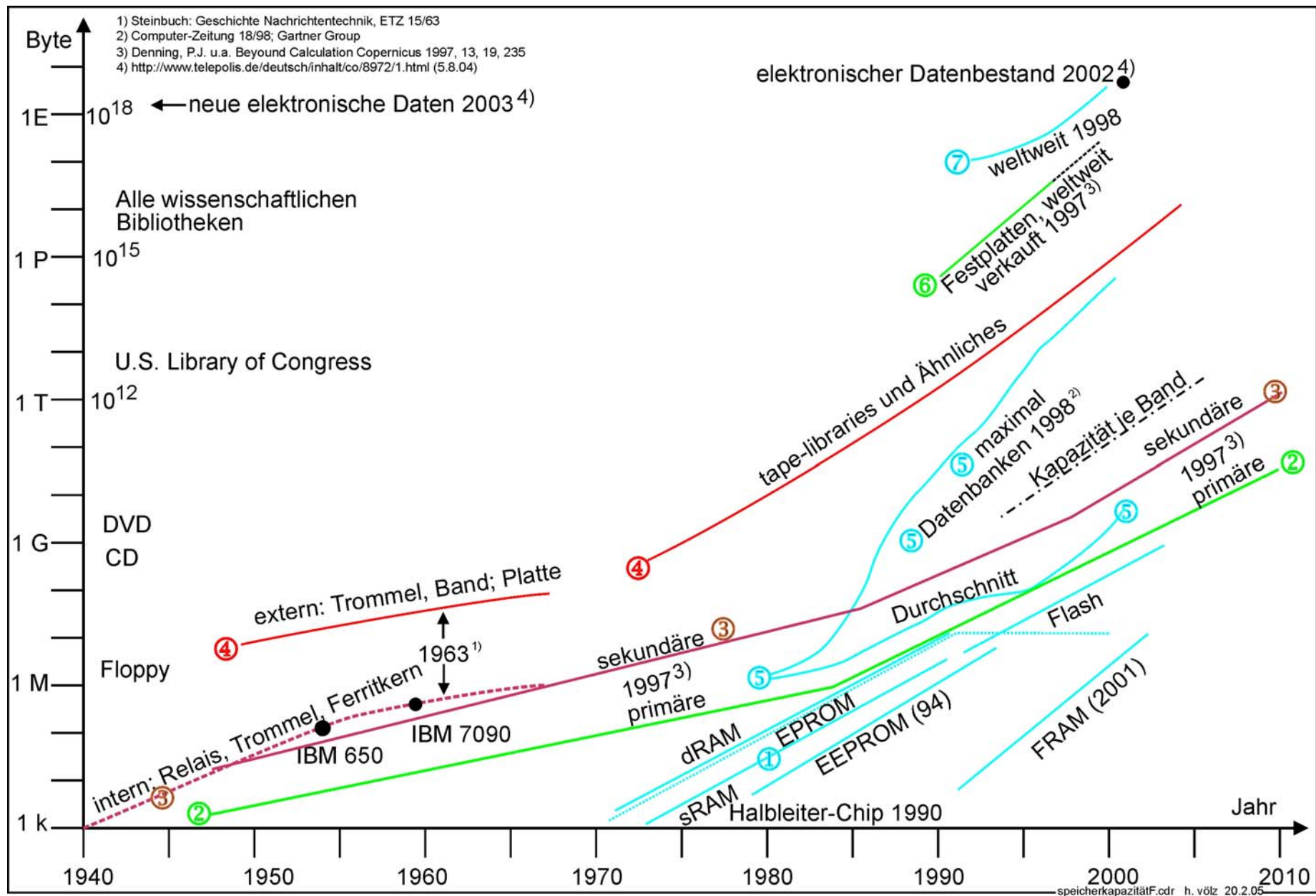




Erreichte Speicherkapazitäten

Zur Darstellung des geschichtlichen Ablaufs ist eine *grobe Einteilung* erforderlich

- 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 Große **Speichereinrichtungen** für Backups usw. 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
- ⑤ **Datenbanken** fassen viele Fakten und Dokumente für Recherchen zusammen
- ⑥ Weltweit **verkaufte Festplatten**
- ⑦ **Elektronischer Datenbestand**, aber immer noch weitaus mehr Daten auf Papier, Mikrofilm vorhanden



Quotient: Speicherkapazität/Zugriffzeit

In erster Näherung lässt sich eine lineare Grenze für den Quotienten angeben

Sie wird Kapazitätzugriff genannt und ist trotz ihrer Dimension in Bit/s keine Datenrate!

Mit der Entwicklung verlagert sie sich zu größeren Werten

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

Schon immer gab es und gibt es bis heute

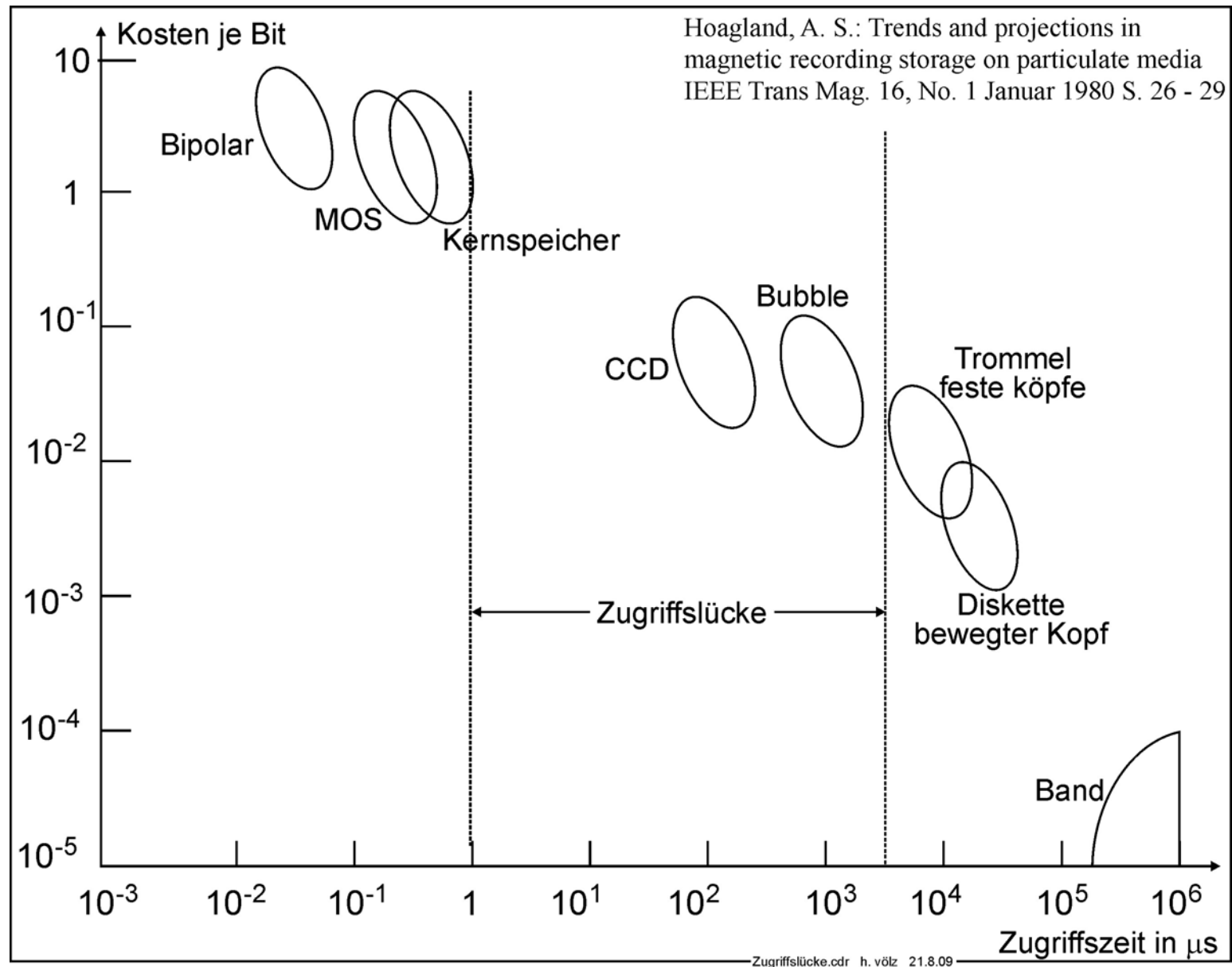
- *schnelle* Speicher mit *kleiner* Kapazität
- *langsame* Speicher mit *großer* Kapazität

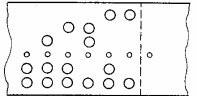
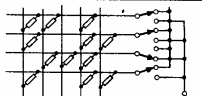
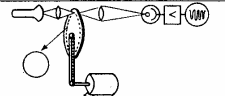
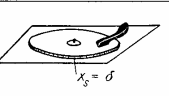
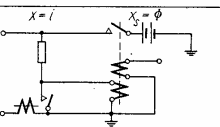
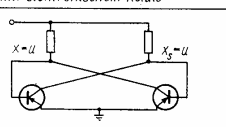
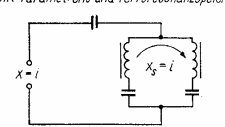
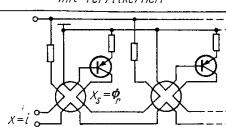
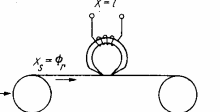
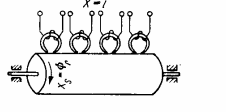
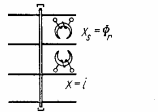
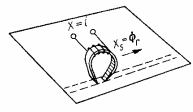
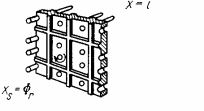
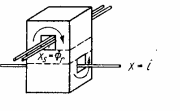
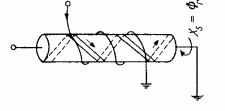
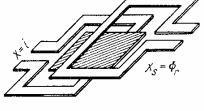
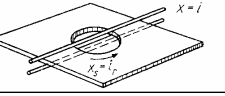
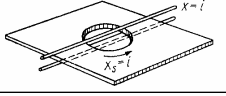
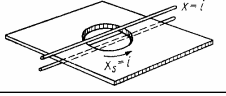
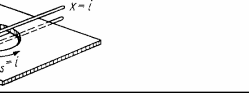
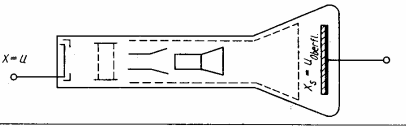
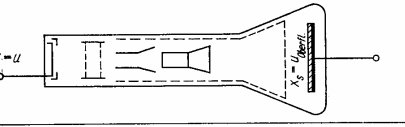
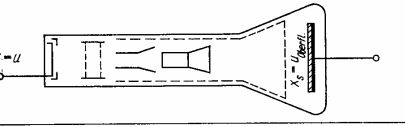
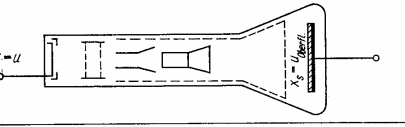
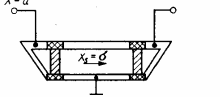
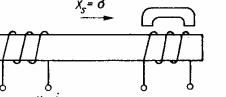
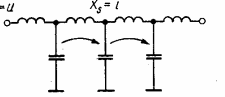
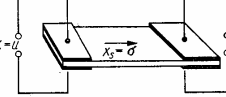
Das macht eine **Speicherhierarchie** notwendig

Hierbei glaubte ≈ 1980 u. a. HOAGLAND eine **Zugriffslücke** gefunden zu haben

Nach mehrjähriger Forschung hat sie sich als falsch erwiesen

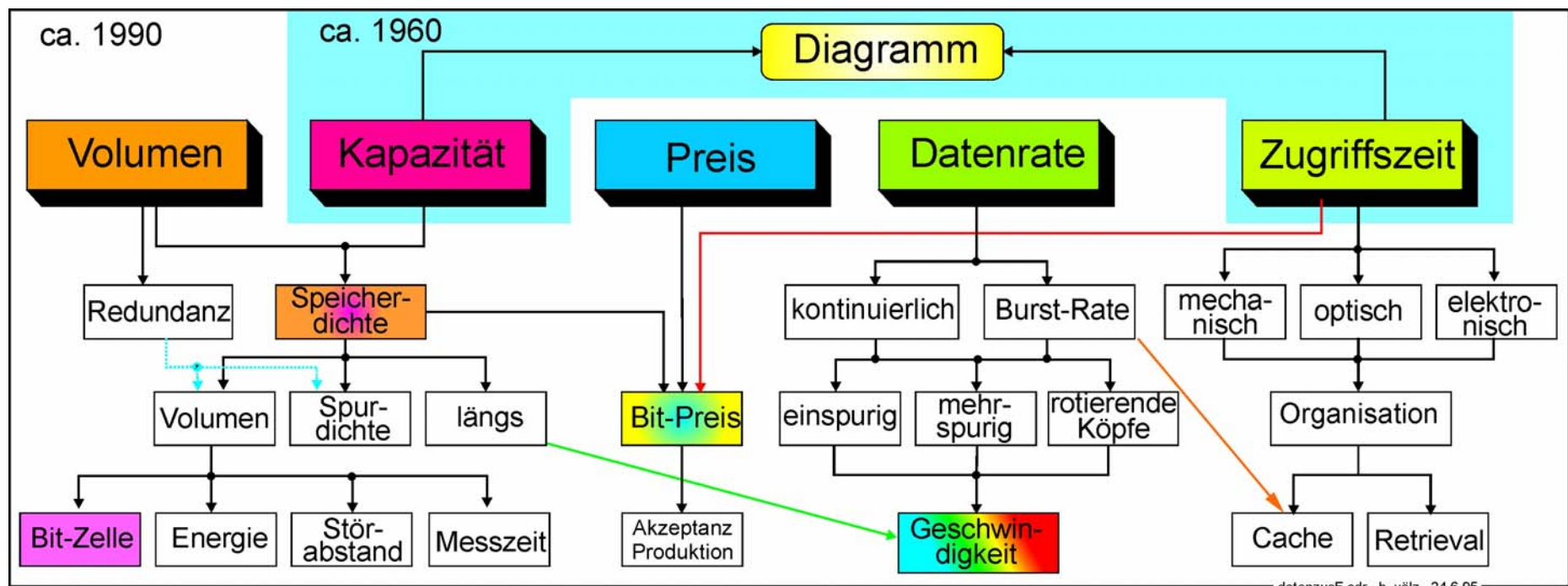
Dennoch entstanden, z. T. auch bereits vorher sehr viele Speichervarianten ohne Zukunft [LERNER]



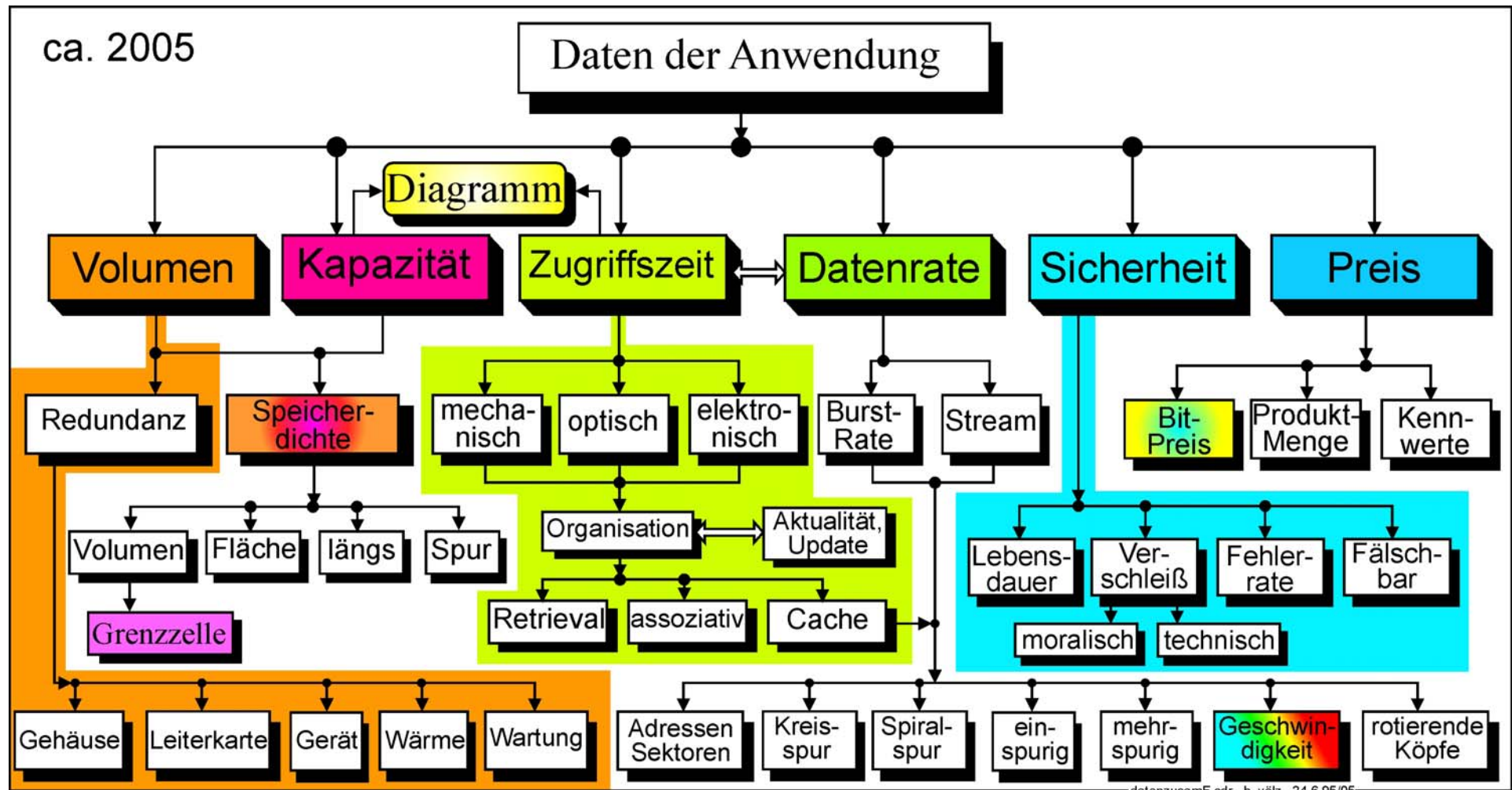
Lochband 	Matrixspeicher 	photoelektrischer Speicher 	Plattenspeicher 
Relaispeicher			
mit elektromechanischem Relais 	mit elektronischem Relais 	mit Parametrons und Ferroresonanzspeicher 	mit Ferritkernen 
Elektromotorische Magnetspeicher			
mit Magnetband 	mit Magnettrommel 	mit Magnetplatten 	mit Magnetkarten 
Feste Magnetspeicher			
mit Ein- und Mehrlochkernen 	mit biaxialen Elementen 	mit Twistoren 	mit dünnen Magnetfilmen 
Kryospeicher			
mit Kryostron 	mit Persistoren 	mit Kryosoren 	mit Elementen mit Kreisströmen 
Speicher mit Elektronenstrahlröhren			
mit Barrierengitter 	mit auf der Oberfläche verteilten Ladungen 	als „Selektron“ 	mit Regenerierung 
Laufzeitspeicher			
als Quecksilberspeicher 	als magnetostruktive Speicher 	als induktive Speicher 	als piezoelektrische Speicher 

Zur Vielfalt der Speicherdaten

Immer wieder entstanden und entstehen neue **Speichertechnologien** und **Anwendungen**
 Hierdurch wurde die Anzahl der **typischen Kennwerte** immer **größer**
 Wahrscheinlich kann kein realisierter Speicher alle Wünsche gleichzeitig erfüllen



Die Entwicklung ist ständig weiter gegangen



Tendenz der Preise

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

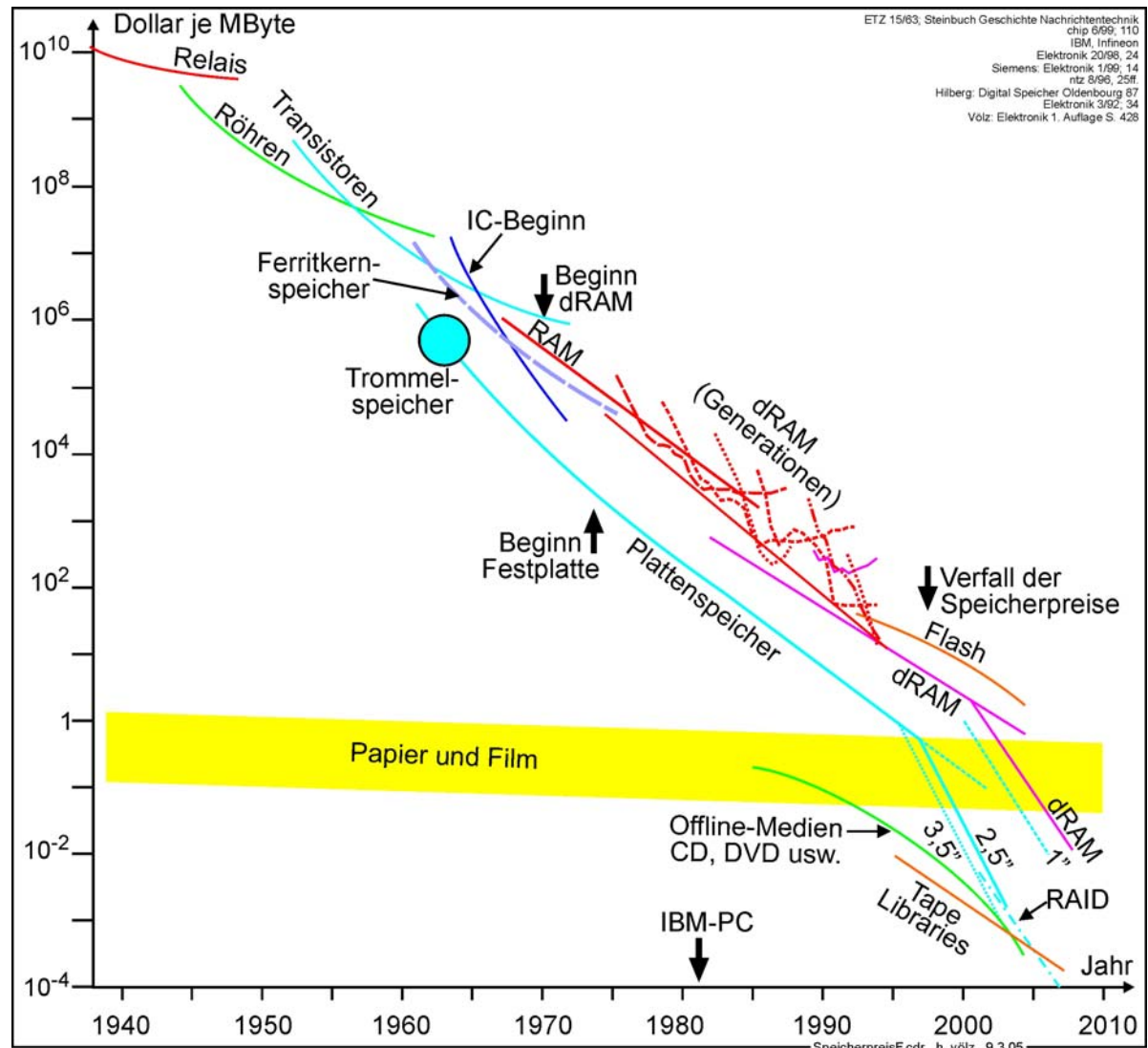
Ein generelle Einschätzung ist wegen des ständig fallenden Werts des Geldes sehr schwierig

Da der Preisverfall für Speicher extrem steil verläuft, kann ganz grob gelten $1\$ \approx 1\text{DM} \approx 1\text{€}$

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

Auffällig ist der deutlich steilere Abfall ab 1995

Im Gegensatz dazu steigt die gespeicherte Datenmenge dennoch gleich bleibend an (s. o.)



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

Dann trat eine unerwartete, bis heute nicht erklärte und zuweilen noch gar nicht erfasste Wende ein
Es konnte preiswert mehr Speicherkapazität zur Verfügung gestellt werden, als genutzt wurde
Das geschah sogar etwa gleichzeitig für Halbleiterspeicher, Festplatten und optische Medien (CD)
Eine Ausnahme bildet nur die Video-Technik (s. u.)
Preisverfall und -schwankungen waren die Folge, die bis heute anhalten

Dies ist offensichtlich die ***Ursache*** für den steilen ***Klick bei den Speicherpreisen***

Ökonomische Faustregel

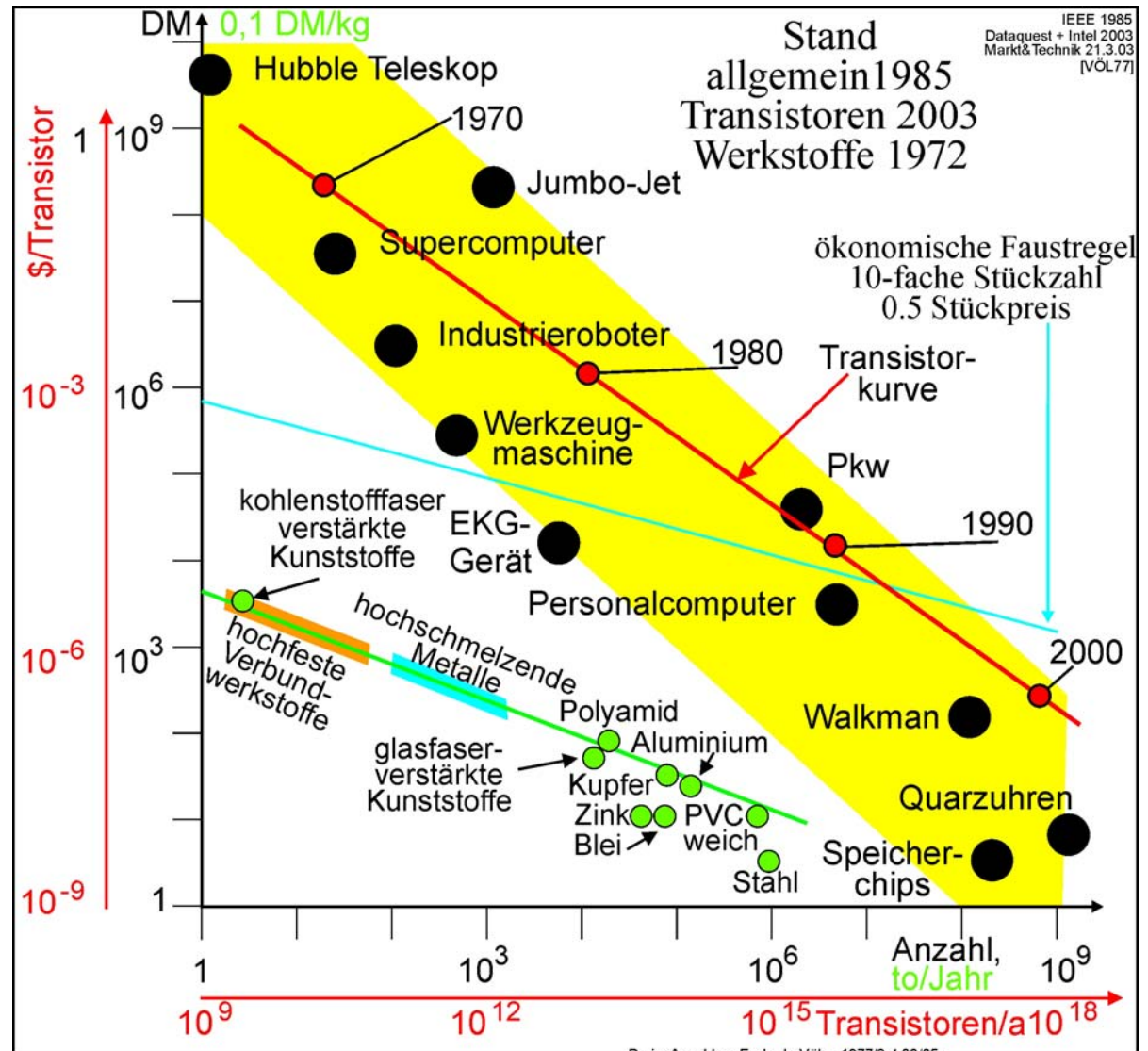
Sie betrifft die produzierte Stückzahl und den Stückpreis

Eine Verdopplung der Stückzahl senkt den Preis auf die Hälfte

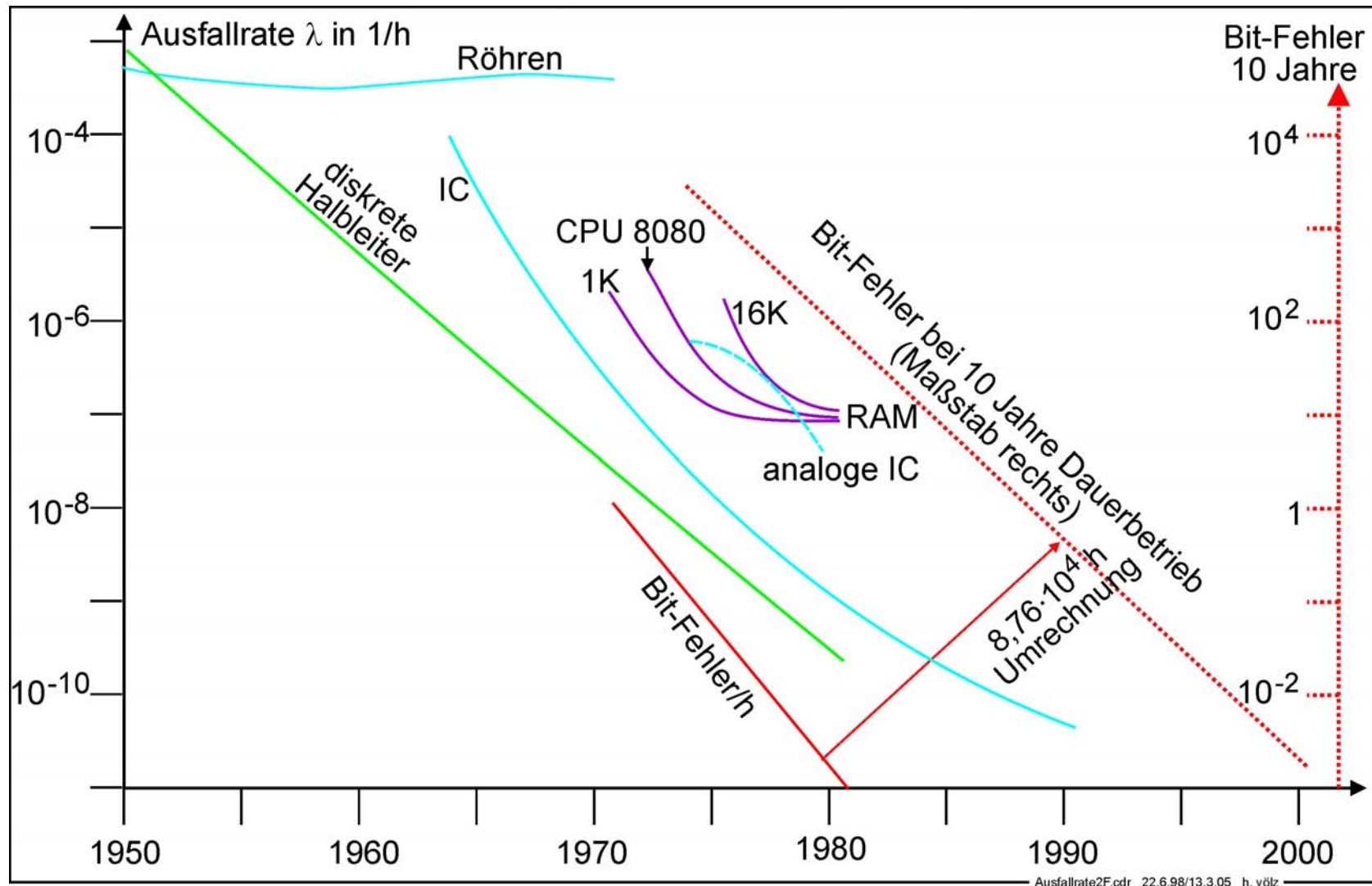
Das stimmt zumindest für Material

Meist ist der Abfall deutlich steiler

Dies gilt besonders für Transistoren und Speicher/Bit



Wesentlich gesenkt wurde auch die Ausfallrate



Volumen für die Speicherung

Speichern ist Aufbewahrung von Etwas, sowohl Stoff, Geräte, Energie oder Information

Hierzu ist ein Raum, Volumen erforderlich, der die speicherbare Menge begrenzt $\Rightarrow \text{Bit/m}^3$

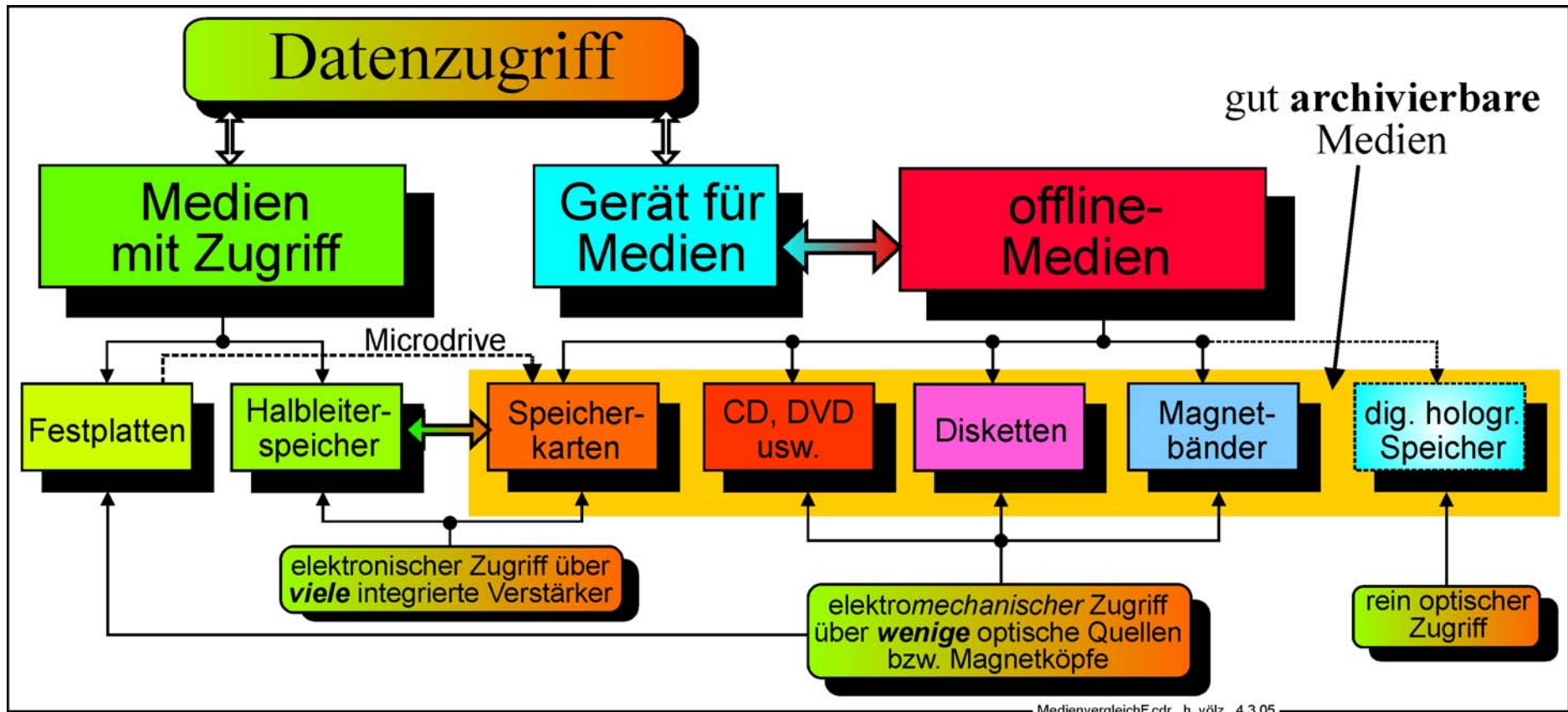
Dabei müssen drei Größen unterschieden werden:

- Nutzbares Volumen in einem **Gebäude**, z. B. einer Bibliothek oder einem Gehäuse
- **Volumenanteil** des zur Speicherung benutzten Materials in einem **Speichermedium**
- **Bitdichte** im Speichermaterial, sie kann auf bezogen sein auf
 - a) Volumen
 - b) (Ober-) Fläche
 - c) Länge innerhalb einer Spur oder Spurdichte

Zwei Medien Arten

Online-Medien	Offline-Medien
• werden direkt, ohne zusätzliche Geräte betrieben, z. B. Halbleiterspeicher und Festplatten • besitzen meist schnellen Zugriff • verlangen größeres Volumen/Bit	• benötigen ein Gerät zum Speichern, Wiedergeben, z. B. Disketten, CD, DVD, Magnetbänder • nutzen das Volumen besser aus, daher wichtig für Archivierung, Durch Trennung auch gut für den Datenschutz (wegschließen!) • haben längere Zugriffszeiten, zumindest bezüglich auswechseln • Gefahr für moralischen Verschleiß der Geräte

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



Redundanz der Speicherung

Betriebnotwendiges Volumen $\Leftrightarrow$ Volumen des eigentlichem Speichermaterials

Es sind **Abstufungen** im Volumen zu beachten, z. B.:

Elektronik

pn-Struktur $\Rightarrow$ unverkapselte Chip $\Rightarrow$ Chipgehäuse $\Rightarrow$ Leiterplatte $\Rightarrow$ Gerät

Magnetband-Technik

Magnetschicht $\approx 2 \mu\text{m}$ Dicke, meist ist weniger als $0,5 \mu\text{m}$ magnetisiert

$\Rightarrow$ **Mechanische Stabilität** erfordert Unterlage $\geq 5 \mu\text{m}$

$\Rightarrow$ Auf **Spule gewickeltes Band**: Wickelkern und Seitenhalterung

$\Rightarrow$ **Schutzhülle** oder **Kassette** nutzt bestenfalls $\frac{1}{5}$ für das Band; Σ bis hier $\approx \frac{1}{20}$ des Volumens

$\Rightarrow$ Das notwendige **Laufwerk** vergrößert die Redundanz deutlich weiter
jedoch umso geringer, je mehr Bänder verwendete werden

$\Rightarrow$ (automatisierte) **Bandbibliothek** fordert weitere Redundanzen

Klassische Bibliothek

Text und Bilder in Büchern $< 1\%$, Papiervolumen, Leerflächen auf den Seiten

$\Rightarrow$ Bücher wohlgeordnet in Regalen, Mensch (evtl. Roboter) leichten Zugriff hat $\approx 5\%$

$\Rightarrow$ Gebäude: Gänge, Treppen, Aufzüge, Klimaanlage, Versorgungs-, Arbeits-, Leseräume usw.

$\Rightarrow$ Bestenfalls $\approx 20\%$ des Gebäudes für „Buchräume“, für Bücher $\approx 1\%$ nutzbar

Geräte-Klassen $\Rightarrow$ Speichervolumen

Bestimmt durch *Handhabbarkeit, Bedienung, Transport, Reparatur, Nebenräume, Klimaanlage*

$\Rightarrow$ 4 Klassen

Handgeräte ($\approx 1 \text{ dm}^3$) $\Leftrightarrow$ *Standgeräte* ($\leq 1 \text{ m}^3$) $\Leftrightarrow$ *Räume* ($\approx 100 \text{ m}^3$) $\Leftrightarrow$ *Häuser* ($\approx 10^6 \text{ m}^3$)

Abschätzung für *elektronische Speicher*

Standgerät: pn-Strukturen $\approx 10^{-6} - 10^{-8}$, im *großen Gebäude* $\approx 10\,000$ Standgeräte

Daher maximal **mögliches Speichervolumen $\approx 1 \text{ m}^3$**

Auch für Band-, DVD-Bibliotheken usw. ergeben sich kaum wesentlich größere Werte

Überblick zur Volumen-Redundanz

	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?
Speicher material	pn-Übergänge, Gates usw.	Magnet-schicht	Farbstoff, RW-Material usw.	Magnet-schicht	Magnet-schicht	Holografie-material
Redundanz	1000	5000	2000	2000	200	≤ 2
Bemerkung	auf Leiterplatte kaum austauschbar	nur Gerät austauschbar	Hülle entfällt teilweise			3D-Aufzeichnung möglich

Varianten der Speicherdichte

Eigentlich ist Volumen-Speicherdichte wesentlich
Für **Technologie und Entwicklung** besitzen jedoch andere Dichten mehr Aussagekraft

In die **Volumen**-Speicherdichte geht der Unterschied von **Einwandler**- und **Vielwandler**prinzip ein
Ein Wandler für alle Bit (optische Einheit, Magnetkopf) ermöglicht sehr **hohe Speicherdichte**
Verlangt aber einen **Transport** zu den einzelnen Bit

Mit Ausnahme der digitalen Holografie erfolgt Speicherung immer auf **Oberflächen**
Typisch für Foto, Druck usw. liegen dabei **Punkte/mm** oder **dot per inch** (dpi) vor
Wegen Richtungs-Unabhängigkeit ist „Auflösung“ in **Linien/mm** bzw. **lines per inch** (lpi) üblich

Bei **mechanischem Transport** sind sogar **lineare Spuren** mit zwei Parametern entscheidend

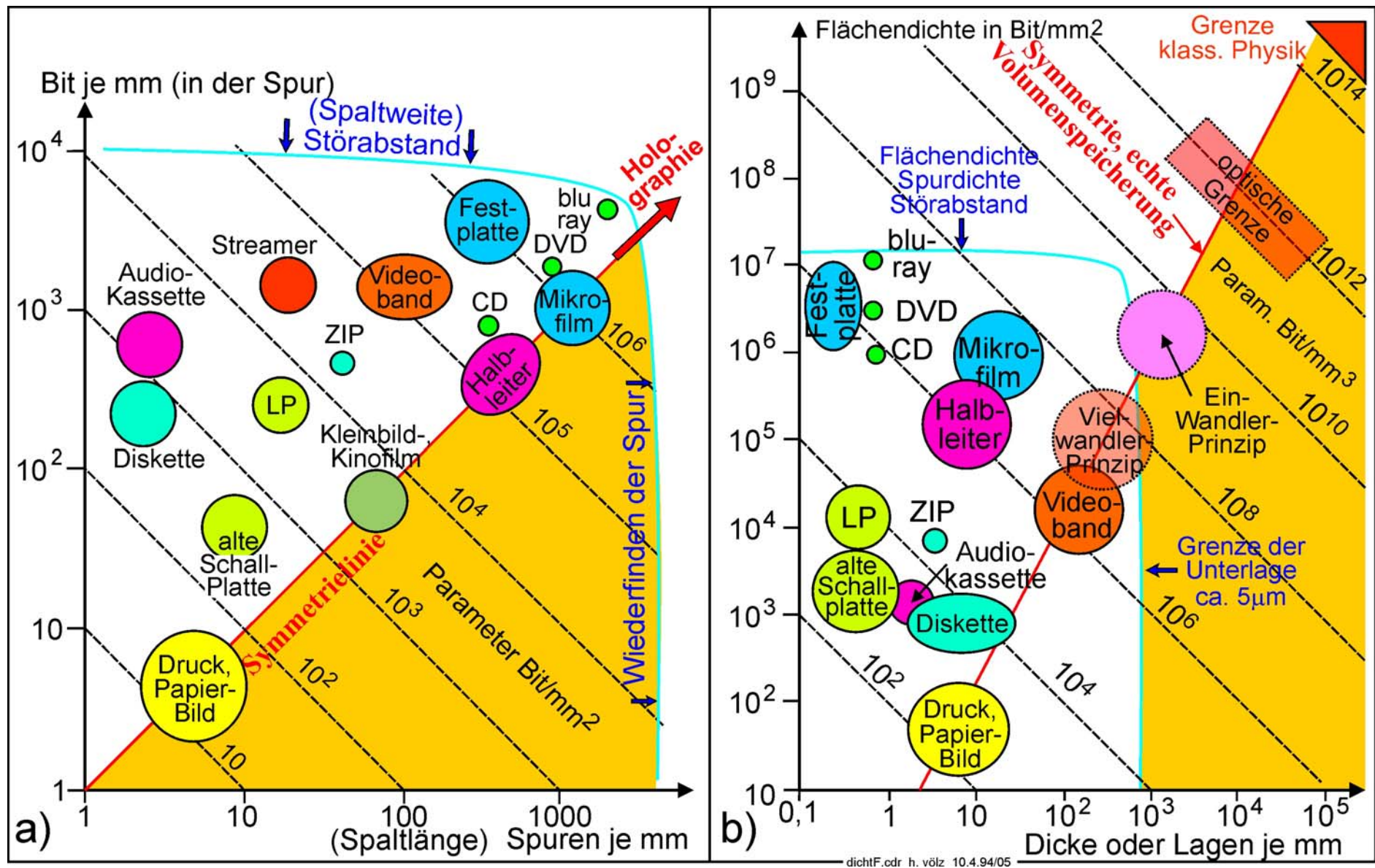
- **Längsspeicherdichte** $= d_l$ = speicherbare Bit in der Spur = **Bit/mm** oder **Bit/Inch** (bpi)
- **Spurdichte** = Abstand der einzelnen Spuren = **Spuren/ mm** oder **track per inch** (tpi)

Ist wesentlich durch die Toleranz bei Wiederfinden der Spur bestimmt

unterscheiden: Spurabstand d_s , genutzte Spurbreite d_b und unbenutzte Rasenbreite $d_r = d_s - d_b$

Nur bei der **Beta-Technik** ist zwischen den Spuren kein Abstand (Rasen) notwendig

Die Flächendichte ist das Produkt $d_f = d_l \cdot d_s$



2. Elektronische Speicher

Griechisch *elektron* mit Silber gemischtes Gold; Bernstein

Elektronik $\Leftrightarrow$ Elektrik, Elektrotechnik $\Leftrightarrow$ Tieftemperatur- und Quantentechnik

Zwei Kennzeichen

1. **Externe Steuerung elektrischer Ladungsträger:** Elektronen, Lochelektronen, jetzt auch *Spin*
Aber: gesteuerte Ionen, Elektro-Chemie, Glühlampen usw. werden meist Elektrik zugeordnet
2. Anwendung von sehr *wenig Energie* $\Leftrightarrow$ *Leistungs-Elektronik*

Wichtige Gebiete

- **Informations-Elektronik:** Speicherung, Verarbeitung und Übertragung kontinuierlicher oder diskreter (digitaler) Information (Daten, Signale oder Nachrichten)
- **Mikroelektronik:** unzerlegbare Zusammenfassung vieler elektrischer und elektronischer Bauelemente zu einer *Funktionseinheit*: Operations-, Leistungsverstärker, Spannungsstabilisator, logisches Gatter, sequentielle Schaltung, Speicherschaltkreis, Mikroprozessor und CCD-Matrix
- **Nachrichten-Elektronik:** elektronische Signal-, Datenübertragung über größere Entfernungen

Arten elektronischer Speicher

Bit-Bauelemente

Bit-Zellen (Flipflop, TTL usw.)

PROM, Flash

NV-RAM

ROM

Speicherschaltungen (Adressierung, auch Geschwindigkeit)

Speicherkarten usw.

CCD usw.

Assoziativspeicher

Etwas Geschichte

Bit-Bauelemente

Es können **3 Klassen** von Bauelementen für Speicher unterschieden werden

- **elektrisch** (passiv): Widerstand, Kondensator, Spule, Memristor, auch Transformator, Relais, Quarz, Motor, Schalter usw.
- **elektronisch** (aktiv, steuerbar): Transistor, Verstärker, Fotowiderstand und Laser, **historisch** Vakuumröhre, SEV, Bildröhre usw.
- **speicherfähig** (Zustand erhaltend): irreversible, hysteretische Eigenschaften, z.B. elektrisch, magnetisch, amorph $\leftrightarrow$ kristallin

Direkte Speicher-Bauelemente

Ein **Kondensator** speichert mit seiner Ladung

Infolge unvermeidlicher Verluste ist daher die Speicherzeit begrenzt $\Rightarrow$ **dRAM**: Refresh notwendig

Es gibt jedoch stabile Ferro-Elektrika, die eine dauerhafte Speicherung ermöglichen

Derartige Speicher befinden sich in der Entwicklung (s. künftige Speicher)

Magnetische Bauelemente entsprechen Dauermagneten

Die Technik wird z. Z. vor allem bei **Festplatten** und **Magnetbandspeichern** benutzt

Doch auch hier entstehen bereits künftige MRAM-Speicher

PAUL DIRAC forderte ein magnetischer Monopol, der bisher aber nicht nachgewiesen wurde

Dauerhafte Änderung von **Widerständen** ist mit der Umwandlung amorph $\Leftrightarrow$ kristallin möglich

Bisher wird diese Technik bei den **CD-RW** und **DVD-RW** benutzt

Sie wurde schon für Speicher-Elemente benutzt und könnte zukünftigen Speichern ermöglichen

Theoretisch ist der **Memristor** 1971 von LEON CHUA als 4. Bauelement vorausgesagt

Erstmalig wurde er 2008 bei Strukturen = 150 Atomlagen TiO_{2-x} bei Hewlett Packard nachgewiesen

Inzwischen deuten sich Möglichkeiten an, hieraus einen neuen Speichertyp zu entwickeln

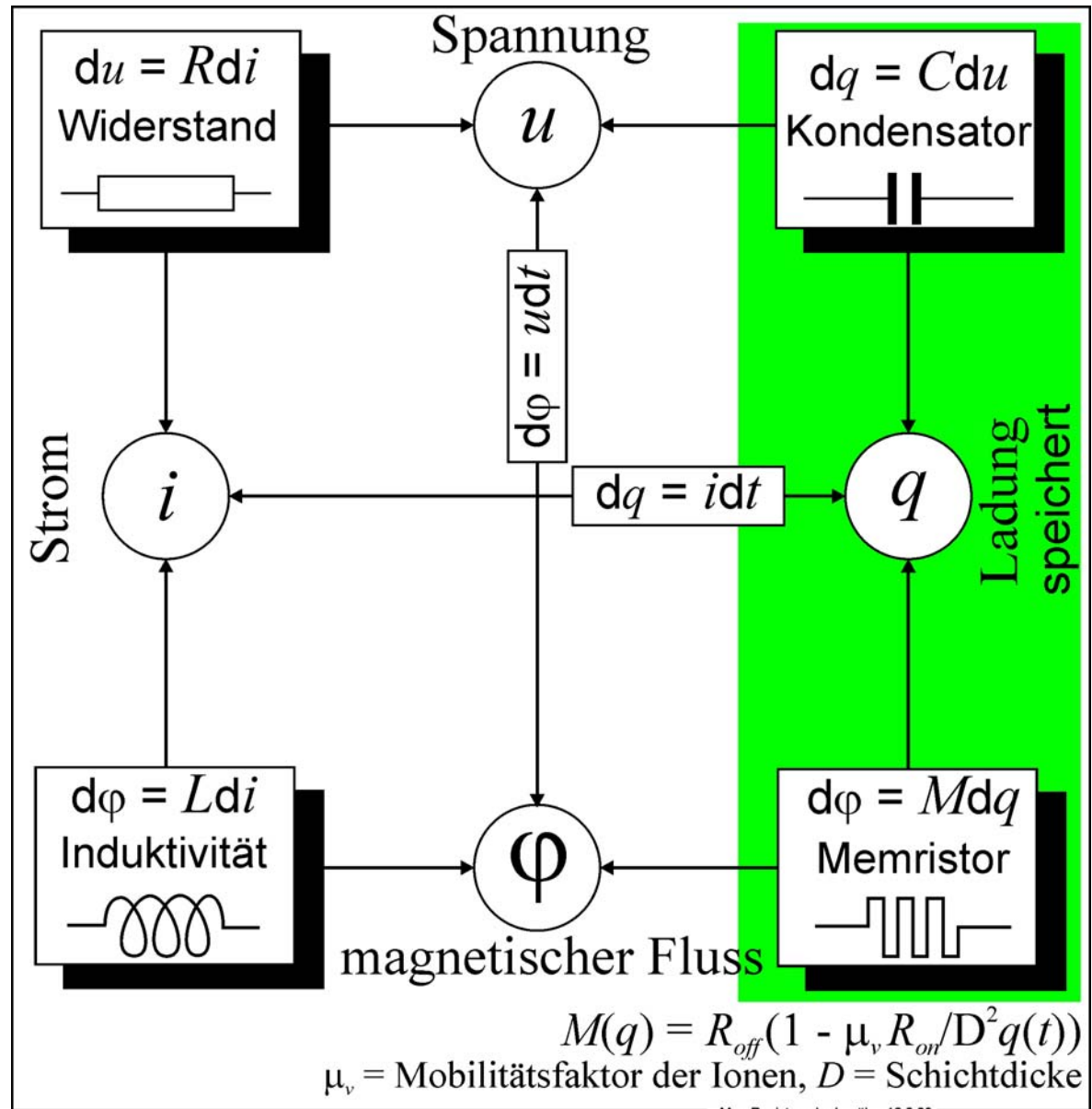
Aus den 4 Grundgrößen:

- Spannung u
- Strom i
- Elektrische Ladung q
- Magnetischer Fluss φ

folgen R , C und L
sowie als 4. der **Memristor**

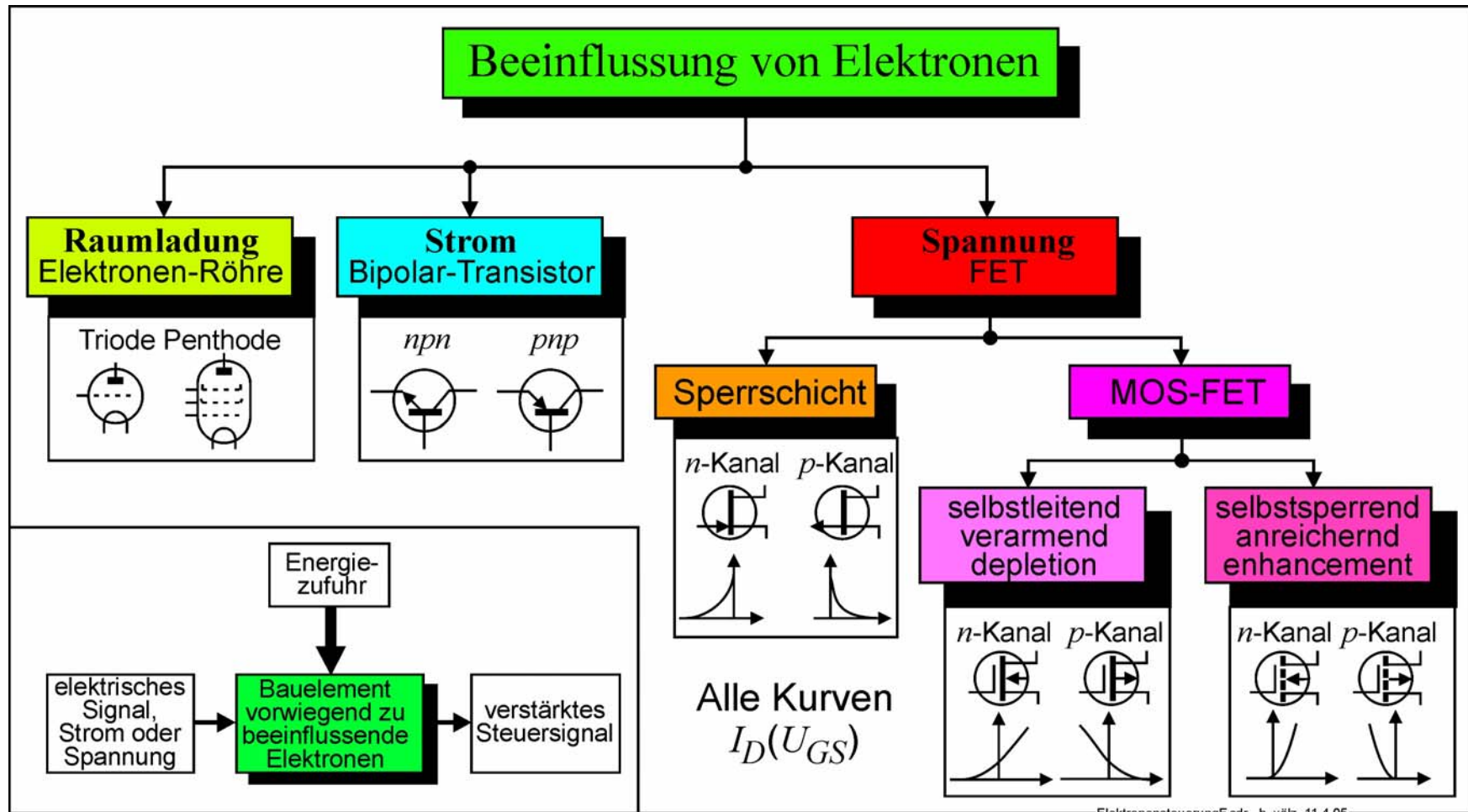
Er ist ein elektrischer Widerstand,
der seinen aktuellen Wert (wie die
Kapazität) über eine eingebrachte
Ladung speichert

Er ermöglicht einen statischen
Speicher, der ohne Stromzufuhr
seinen Wert beibehält und im ps-
Bereich schaltet



Voraussetzung für Bit-Zellen

Direkte **Bauelemente** zur Speicherung von ein oder mehr Bit sind heute (noch) **kaum möglich**
Daher werden **digitale**, elektronische Schaltungen benutzt, typisch hierfür sind **Flipflop** und **dRAM**



Bei den digital elektronischen Schaltungen ist es üblich, zwei Klassen zu unterscheiden

Kombinatorisch; *lateinisch combinatio* Vereinigung

Sequentiell; *lateinisch sequentia* Reihen- Folge

Hierfür werden jedoch je nach Hochschule usw. recht unterschiedliche Begriffe benutzt

Auffällig ist dabei, dass Speicher überhaupt nicht vorkommen

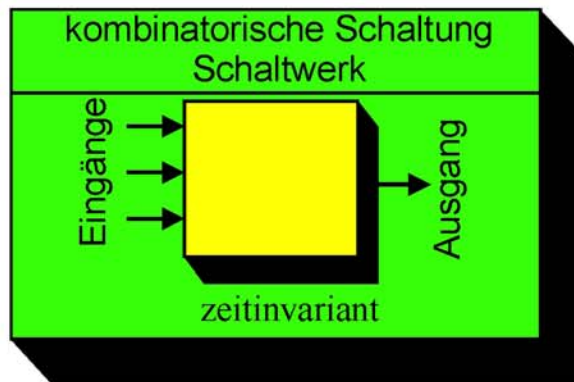
Sie sind als eine Baugruppe bei den sequentiellen Schaltungen eingeordnet

Begriffe der binären Technik	
kombinatorische Schaltung	sequentielle Schaltung
Synonyme z.T. mit etwas abweichender Bedeutung	
Schaltwerk, statische Logik, binäre Schaltung, Zuordner, Codierer.	Schaltnetz, Folge-Schaltung, dynamische Logik.
Theorien	
Schaltalgebra Boolesche Algebra formale Logik Karnaugh-Diagramm	Automatentheorie Petrinetze

binschalF.cdr h. völg 31.12.93

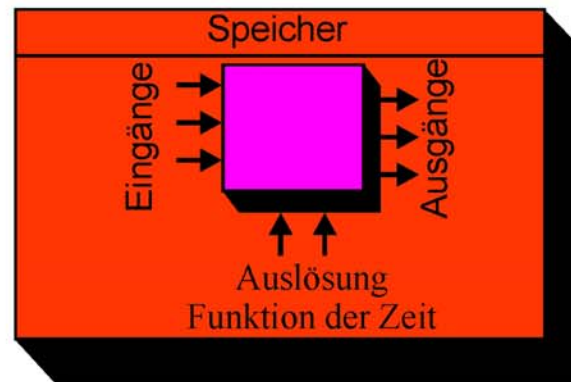
Wegen der fundamentalen Bedeutung der Speicher, ist es notwendig,
3 Grundsaltungen zu definieren

Die drei fundamentalen diskreten Systeme



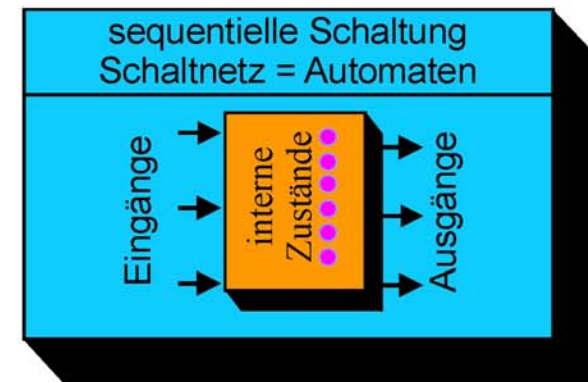
$$x_a = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

ohne Zeiteinfluß



$$x_a = x_e$$

*speichert Eingänge
durch Auslösung
zu anderen Zeiten*



$$x_a = f(Z_i, x_e)$$

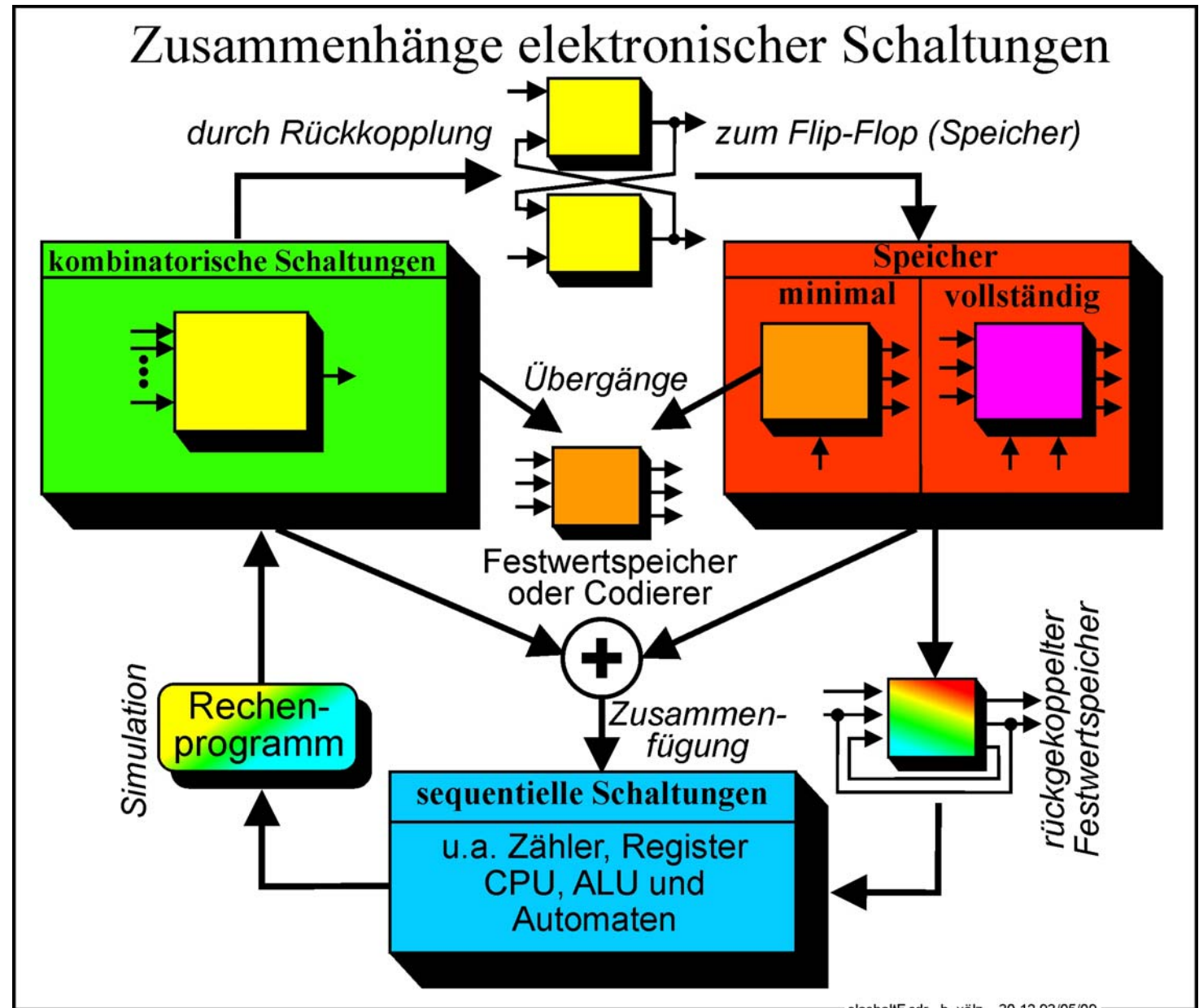
$$Z_i = g(Z_i, x_e)$$

*komplexe und zeitabhängige
Auswirkung der Eingänge*

diskrete_SystemeF.cdr h. vözl 24.3.00

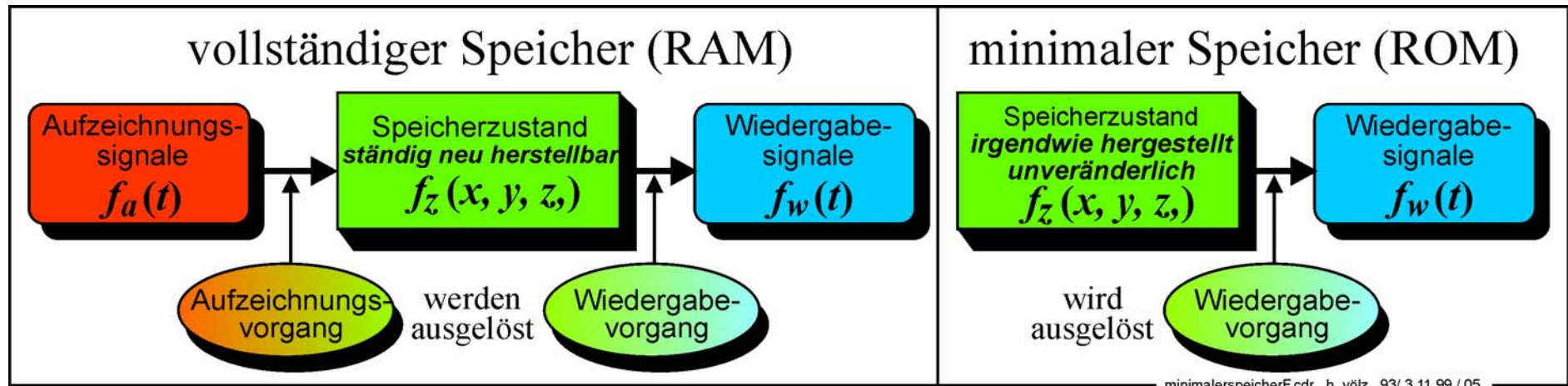
Durch Rückkopplung
u. a. Flipflop lassen
sich aus kombinatori-
schen Schaltungen
Speicher und dann
sequentielle
Schaltungen bilden

Insgesamt gibt es
zwischen den 3
Grundsaltungen alle
möglichen Übergänge



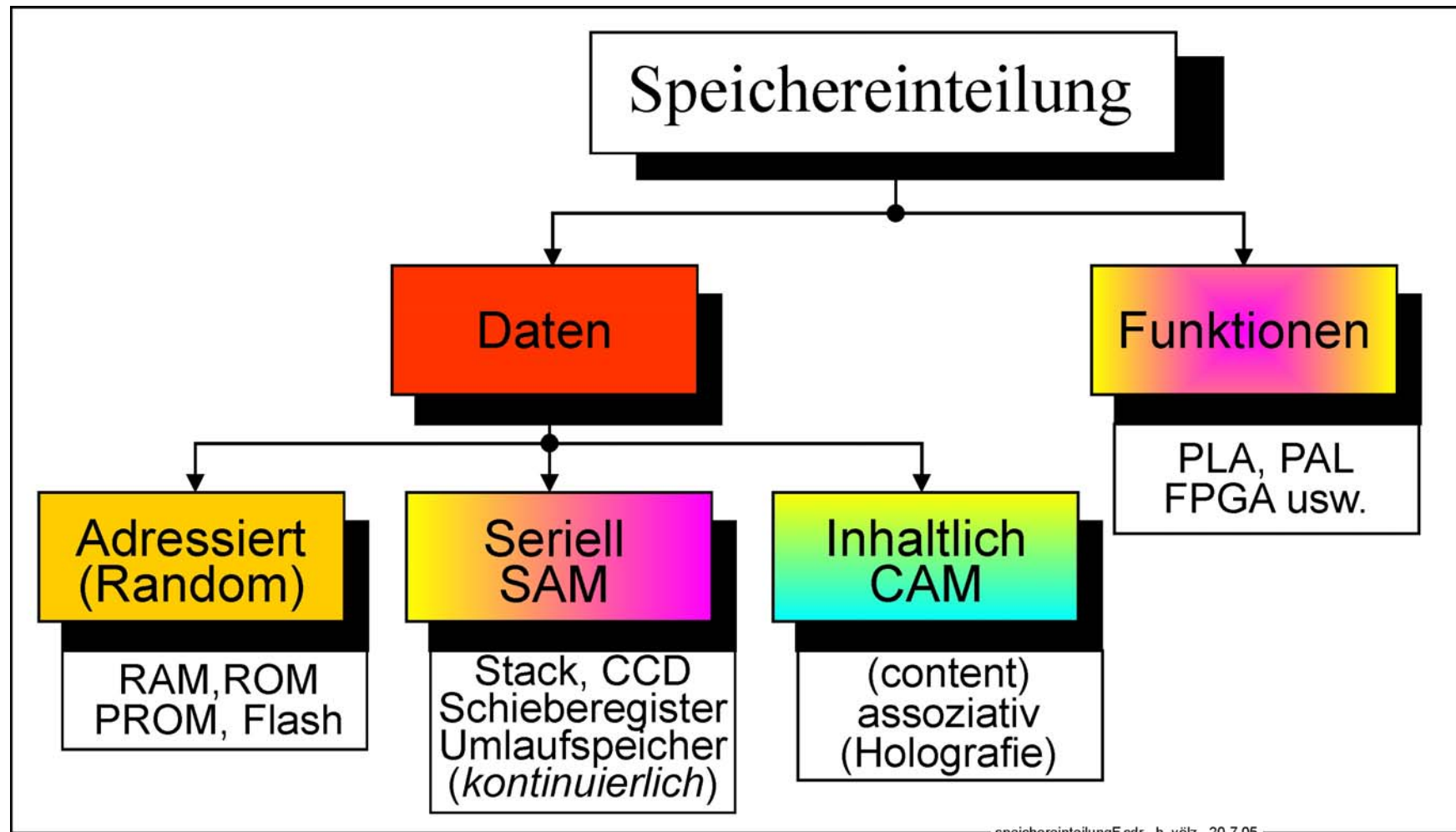
elschaltF.cdr h. vözl 30.12.93/05/09

Als spezielle Vereinfachung von Speichern ist noch der **minimale Speicher** zu ergänzen
 Hierbei sind Varianten wie das elektronische ROM oder die CD, DVD (-ROM) üblich
 Zwischen dem eigentlichen RAM (random access memory) und dem ROM (read only memory)
 Gibt es **Übergänge**, z. B. PROM (programmable) oder CD- bzw. DVD-R
 Ferner gibt es **elektronische programmierbare** ROM = EPROM
 Zu ihnen gehören auch die **Flash-Speicher**

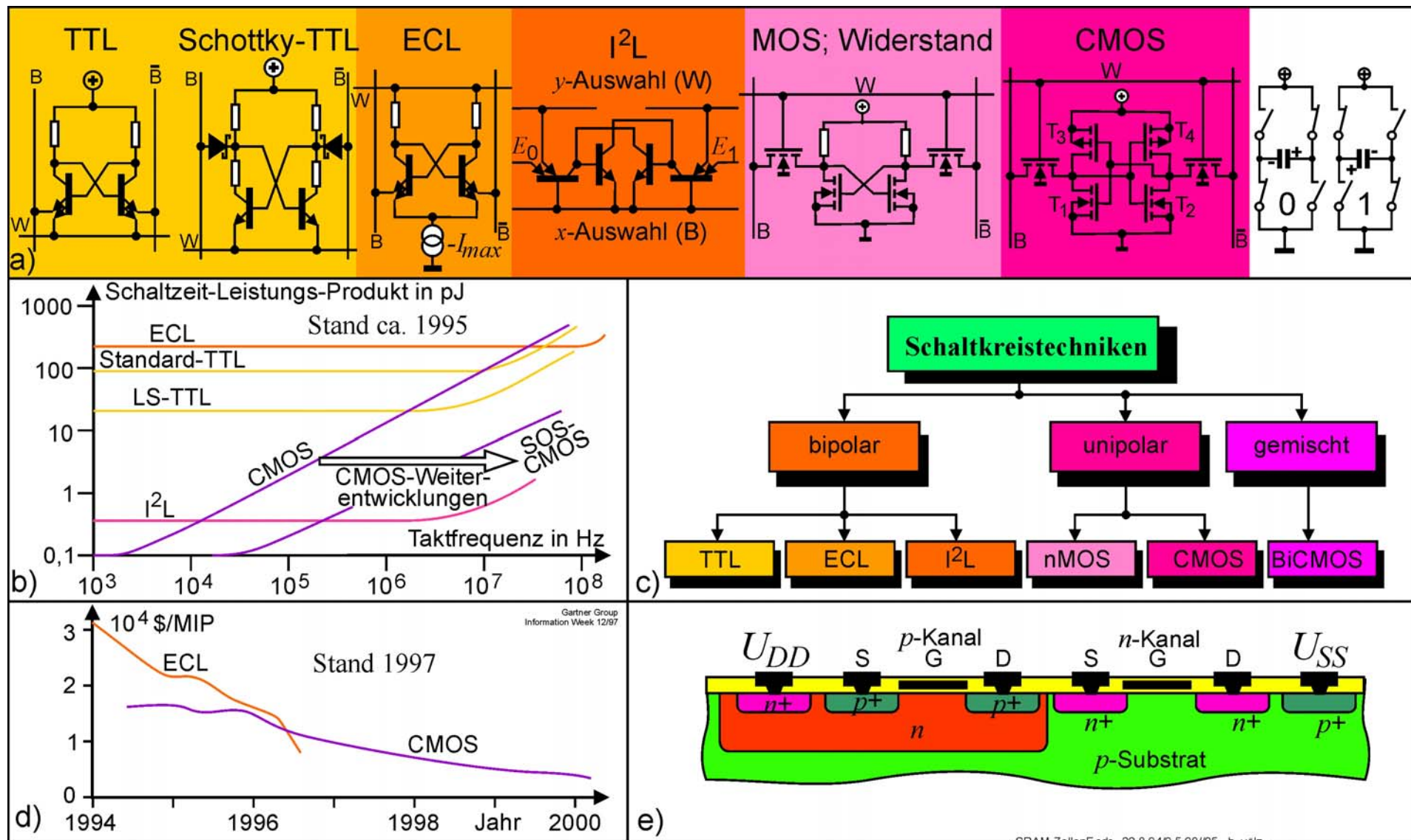


Insgesamt gibt es eine beachtliche **Vielfalt von Speicherschaltungen**, sie können

1. Daten oder Funktionen betreffen und
2. bei den Daten durch den Zugriff unterschieden werden

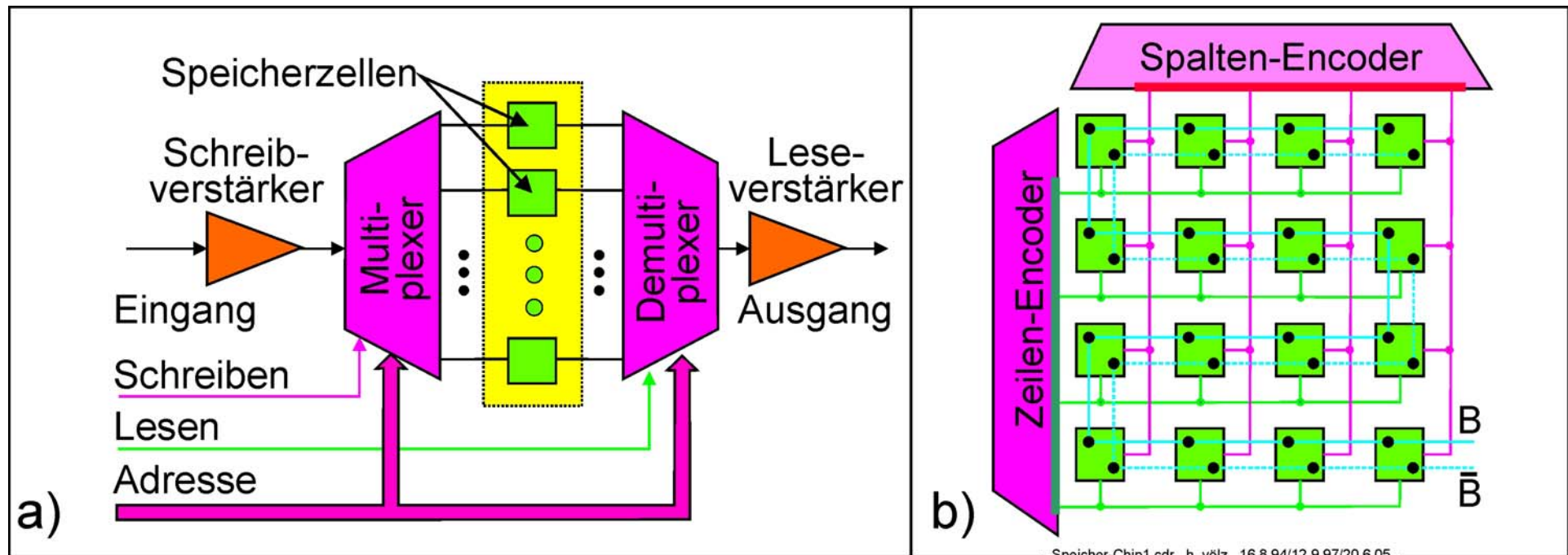


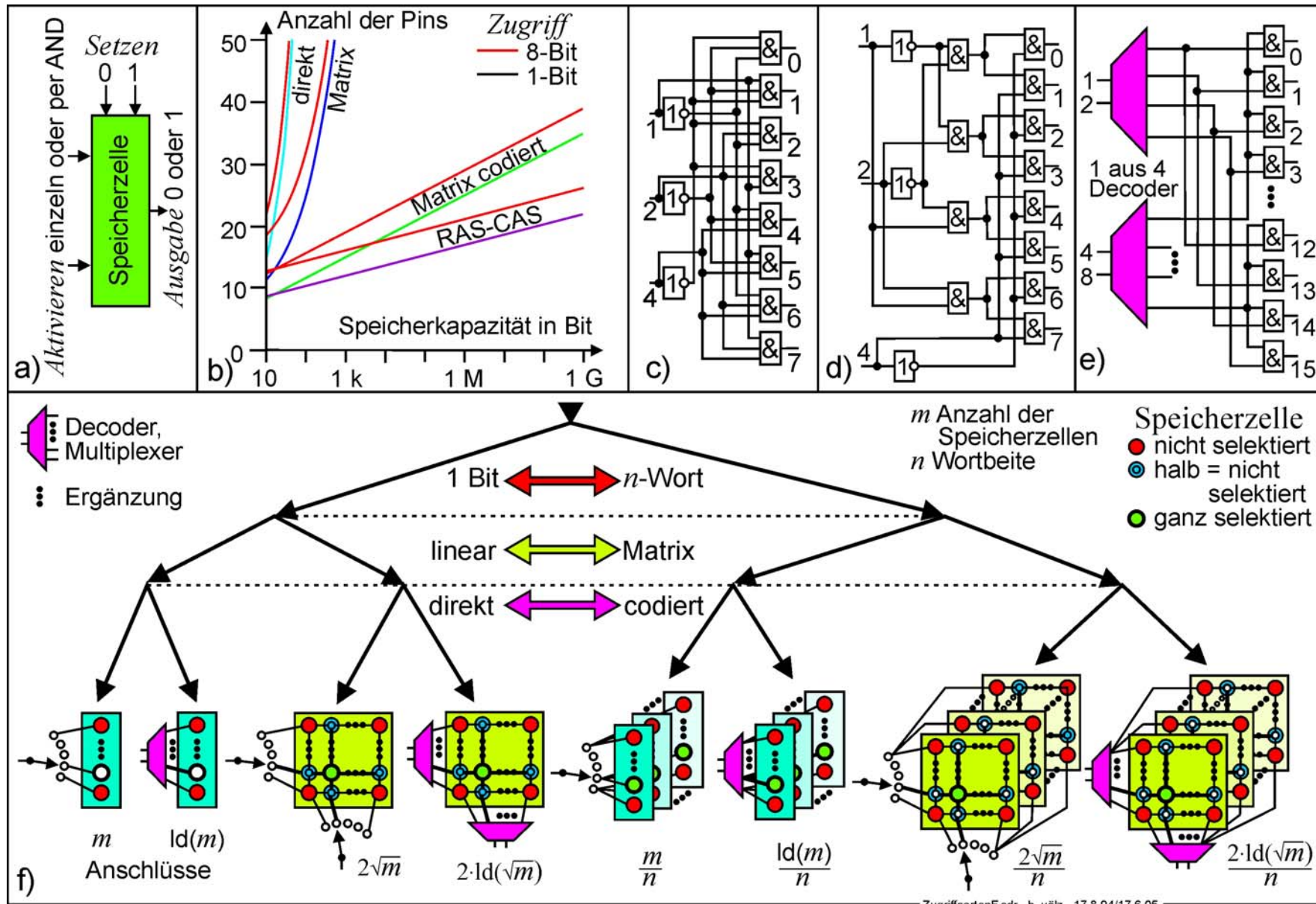
speichereinteilungF.cdr h. vözl 20.7.05



Schließlich sind unterschiedliche Technologien entstanden, besonders deutlich beim Flipflop

Speicher bestehen aus vielen Speicherzellen, auf die **bit- oder wortweise zugegriffen** werden muss. Infolge der **begrenzten Anschlüsse** (pin) sind Schaltungen für die **Adresswahl** notwendig. Zunächst genühten **Matrix-Schaltungen** und **Multiplexer**, Später wurde auch **RAS-CAS** erforderlich. **row bzw. column address select** = gespeicherte Zeilen-, Spaltenwahl.

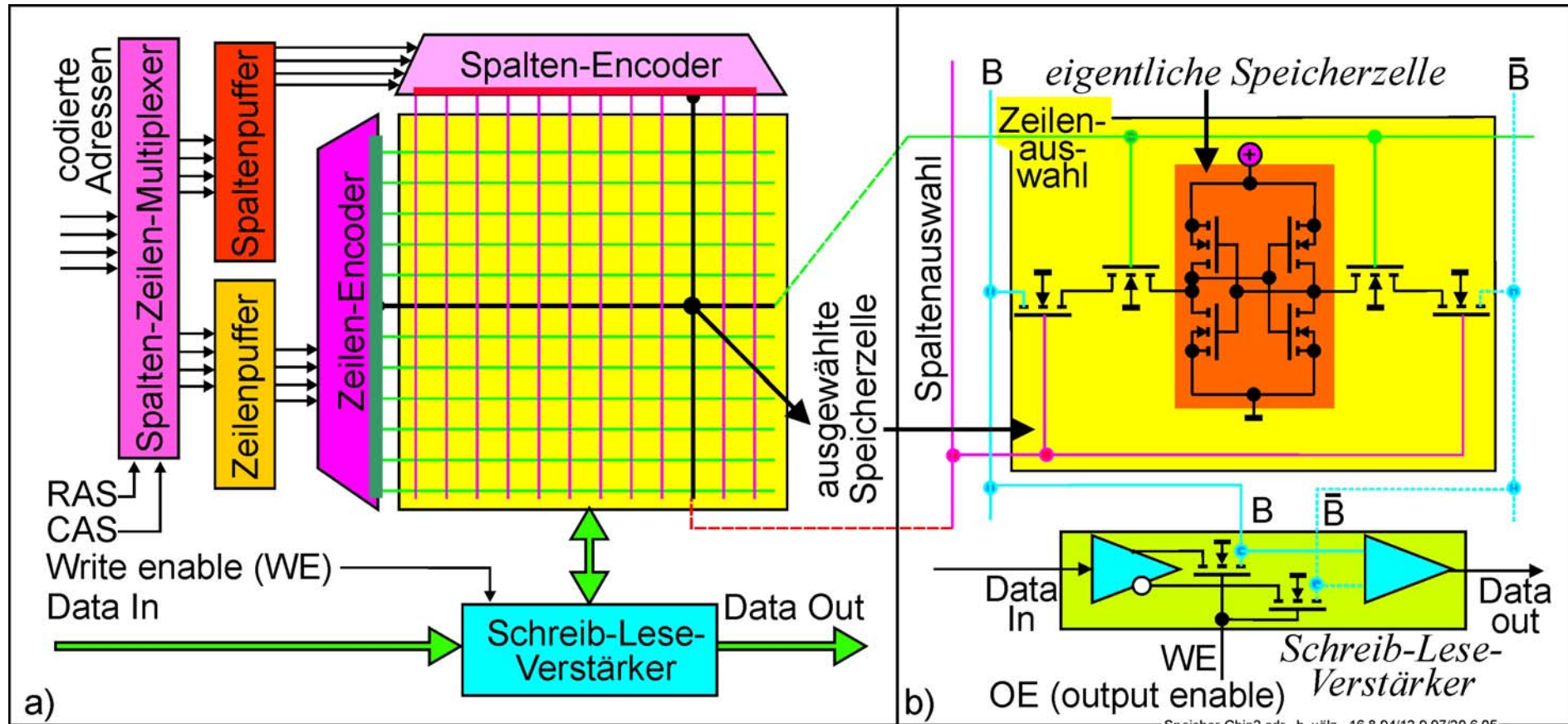




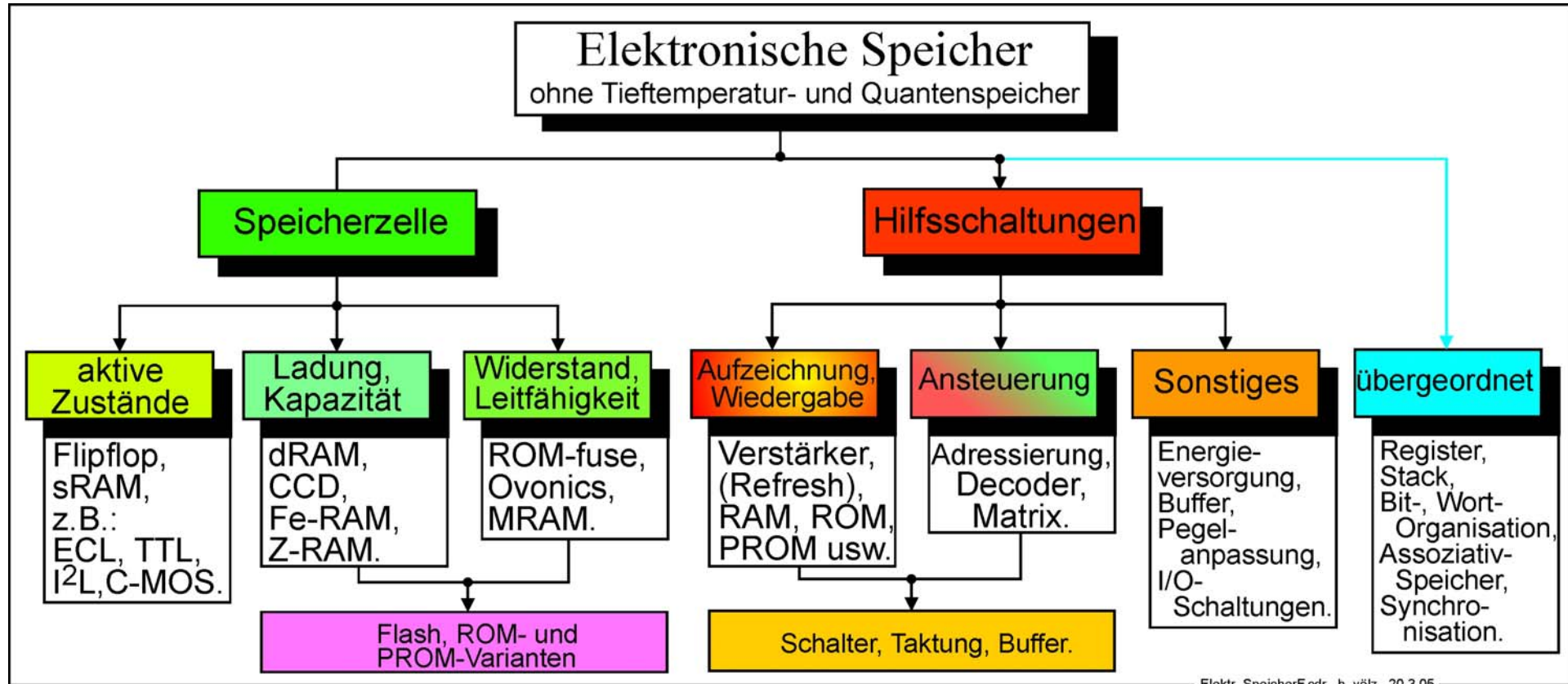
Prinzip-Schaltung eines vollständigen Speicherchips für sRAM

Neben der eigentlichen Speicher-Matrix sind **viele zusätzliche Baugruppen notwendig**

Beim **dRAM** kommt noch die **Refresh-Elektronik** hinzu (s. u.)



Ein Speicherchip enthält **viele Baugruppen** für den Betrieb der Speichermatrix



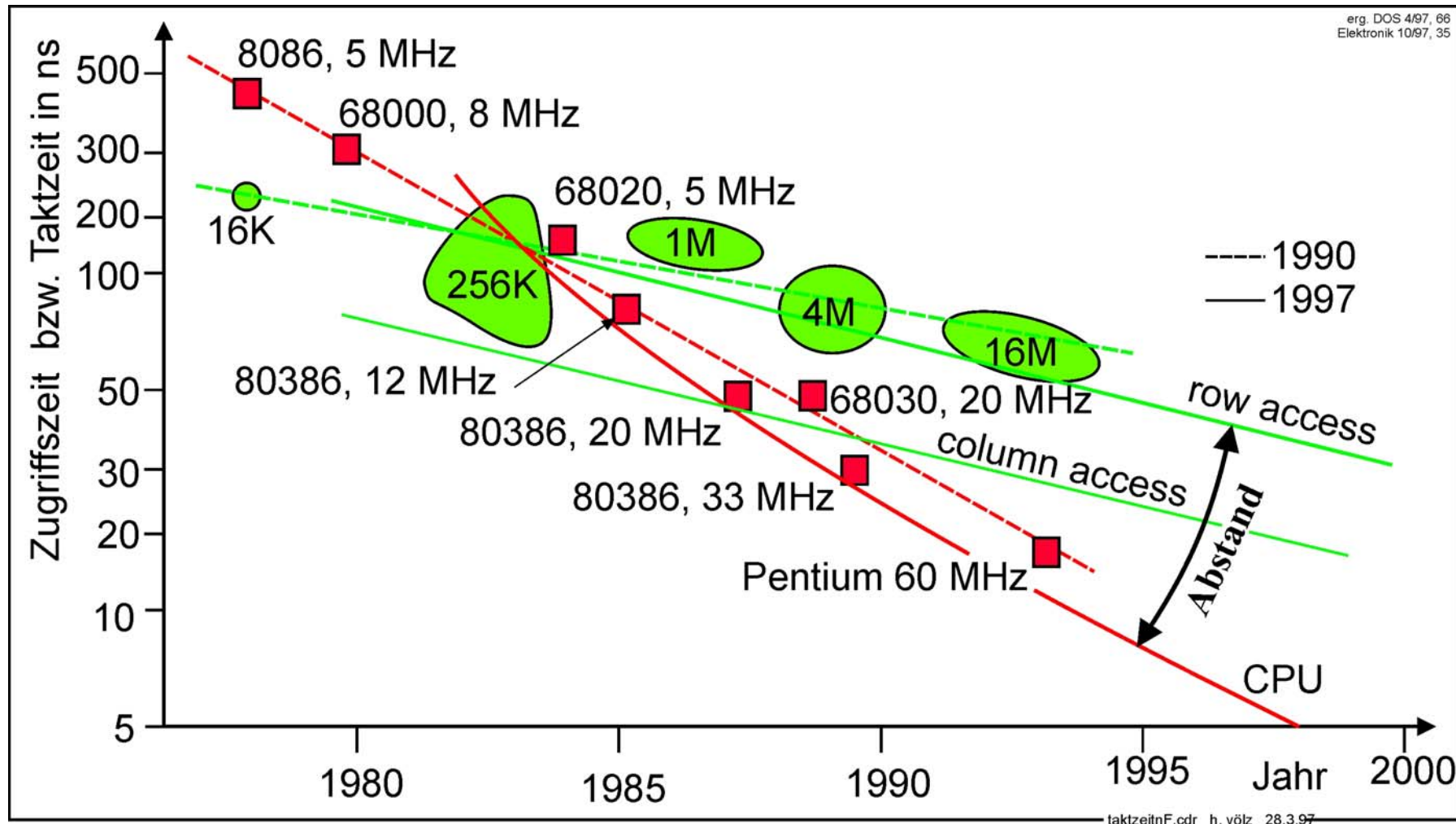
Elektr_SpeicherF.cdr h. völk 20.3.05

Flächen- und Leistungsanteile

Tabelle gilt für einem typischen dRAM-Chip der 80er Jahre (leider keine neueren Daten)
Doch der Flächen- und Leistungsanteil für die Speichermatrix ist jetzt noch wesentlich kleiner

in %	Fläche	Leistung
Speichermatrizen	50	4
Decoder	15	4
Taktgeneratoren	10	60
Leseverstärker	7	25
Sonstiges	10	7
Freifläche	8	0

Infolge der **mehrstufigen Codier-Schaltungen** usw. lässt sich die Zugriffszeit kaum senken
 Daher überholten die **Taktzeiten** der **CPU** um 1985 die der **Speicher**
 Dadurch wurden ständige **neue Speichervarianten** (dRAM) und **mehrere Cache** notwendig



Cache

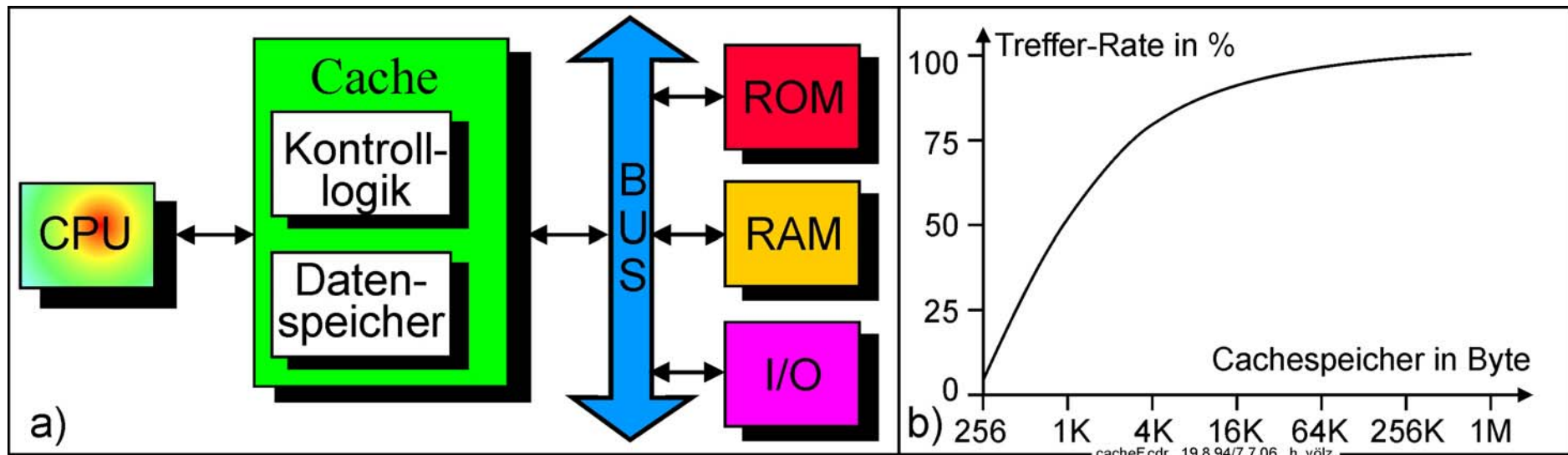
englisch Versteck, geheimes Lager

speichert, sammelt Daten im Voraus, die mit wahrscheinlich als nächste benötigt werden

⇒ „vorausdenken“ (look ahead), macht sich besonders bei Programmen vorteilhaft bemerkbar

Wenn erfolgreich dann **Hit** (*englisch to hit* treffen, bestätigen schlagen)

Anderenfalls **Miss** (*englisch to miss* vermissen, fehlen, verpassen, nicht Dame!)



1-Transistor-Zelle = dRAM

MOS-Speicher-**Vorteil**: geringer Stromverbrauch $\leftrightarrow$ 6 FET = teure Chipfläche

IBM 370/145 von 1970 war erster Rechner mit noch bipolaren Halbleiterspeichern

Schon bei den Relais- und Röhrenrechnern gab es Erfahrungen mit C-Speichern

1966 begann bei IBM ROBERT DENNARD Entwicklung

1970 technologisch reif, Intel 1970 ersten dRAM-Typ „1103“

1971 Serienproduktion für Hauptspeicher: IBM-Großrechner 370-158 und -168, später kleinere -125

Zur Speicher-Zellen-Auswahl dann außer **C** nur **1 Transistor** (statt 6) erforderlich

Kondensator hat Verluste durch Widerstand R

$$U_C = U_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right).$$

Für „1“ muss Toleranzbereich mit **minimalem** U_m festgelegt werden, wird bei der Zeit t_r erreicht

Dann muss ein **refresh** (*englisch* auffrischen) erfolgen, typische Zeit alle $t_r \approx 64$ ms

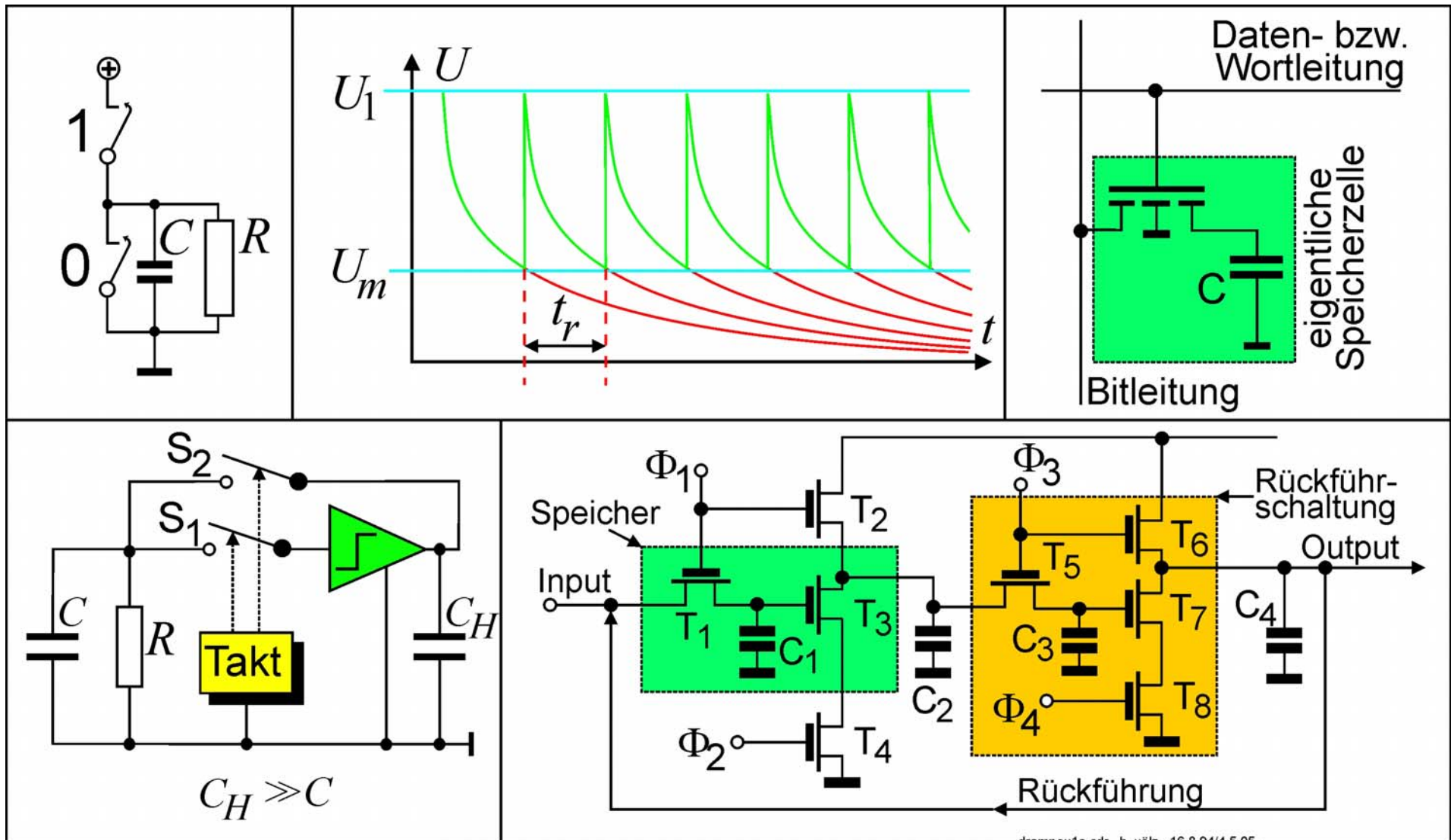
Hierzu ist komplexe Elektronik notwendig = 2 Schalter + OV + großer Hilfskondensator C_H

Während Refresh ist kein Lesen und Schreiben möglich.

Jedes Lesen entlädt Kondensator, anschließend zusätzlich Refresh

Bedeutet große **Zeitverluste** und hohen **Energieverbrauch** $\rightarrow$ 1 GBit-Chip heute ≈ 5 Watt!

Refresh zeilenweise, ≈ 150 ns ≈ 1 % der Betriebszeit, alle 15 μ s neue Refresh-Zeile



dRAM-Technologien

Weder der Speicherkondensator noch das Drain werden nach Außen herausgeführt
Anfangs **Speicherkapazität nur parasitär** (Nebeneffekt, *griechisch* παρά- neben und sitos Speise)
 C zum Substrat < 1 pF, 5 Volt $\rightarrow Q_C = U \cdot C \approx 1$ pC $\rightarrow \approx 10^7$ Elektronen
Strukturen jetzt sehr viel kleiner, daher zusätzlich technologisch deutlich vergrößerte Kapazität
dennoch nur noch wenige fF (10^{-15} F) $\rightarrow$ einige Tausend Elektronen/Bit (Quanteneffekte!)

Es entstanden **zwei Technologie-Lager**

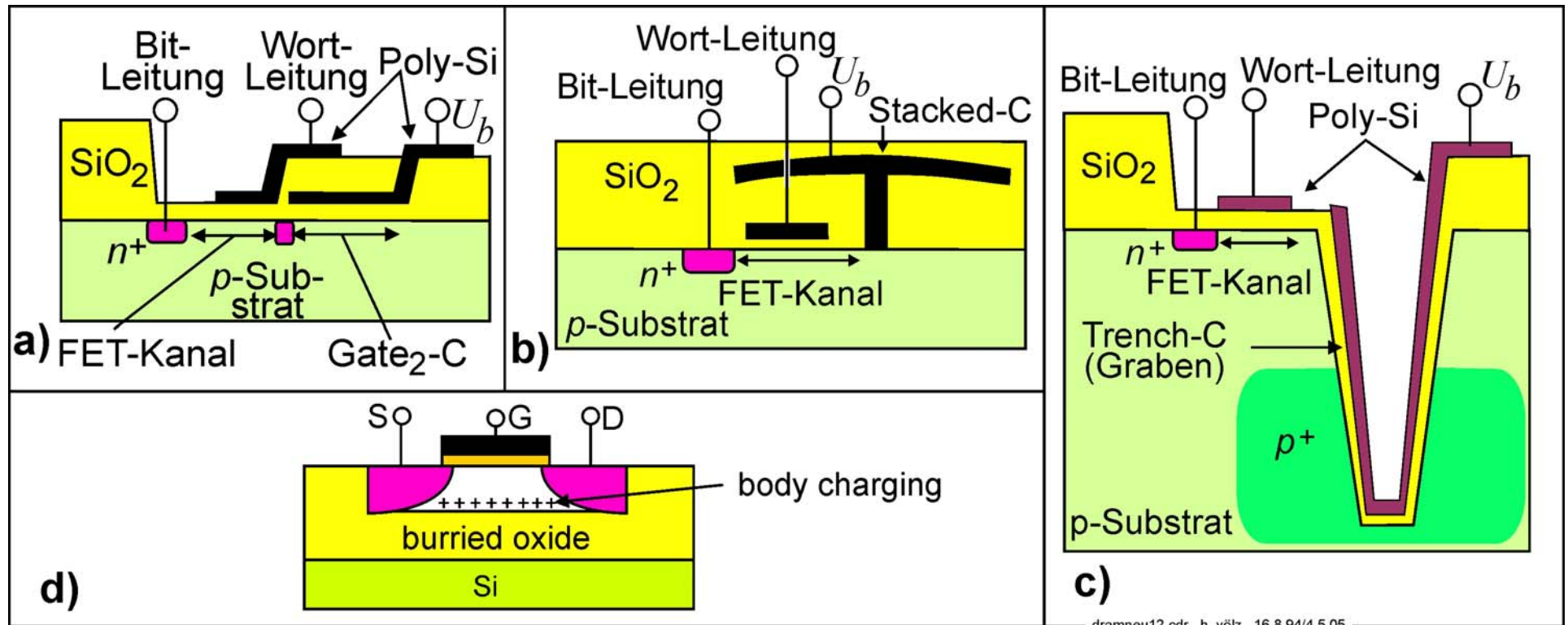
1978 **Stacked**-Technologie (*englisch* Stapel, Haufen, verschachtelt)

1983 **Trench**-Technologie (*englisch* Graben) durch anisotropes Ätzen (Richtung 1:100)

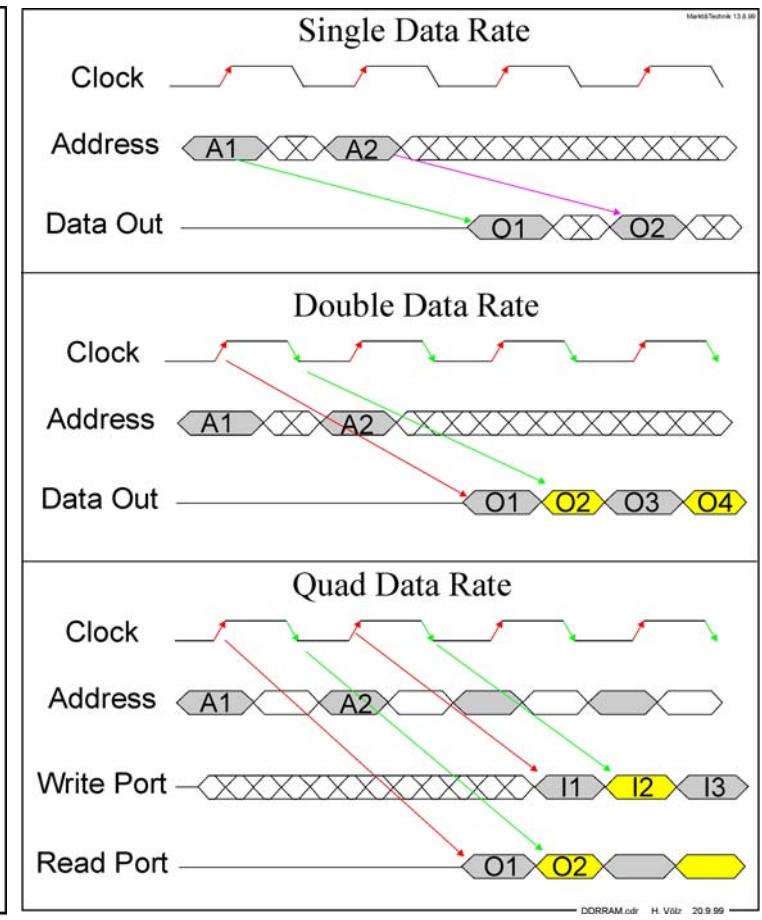
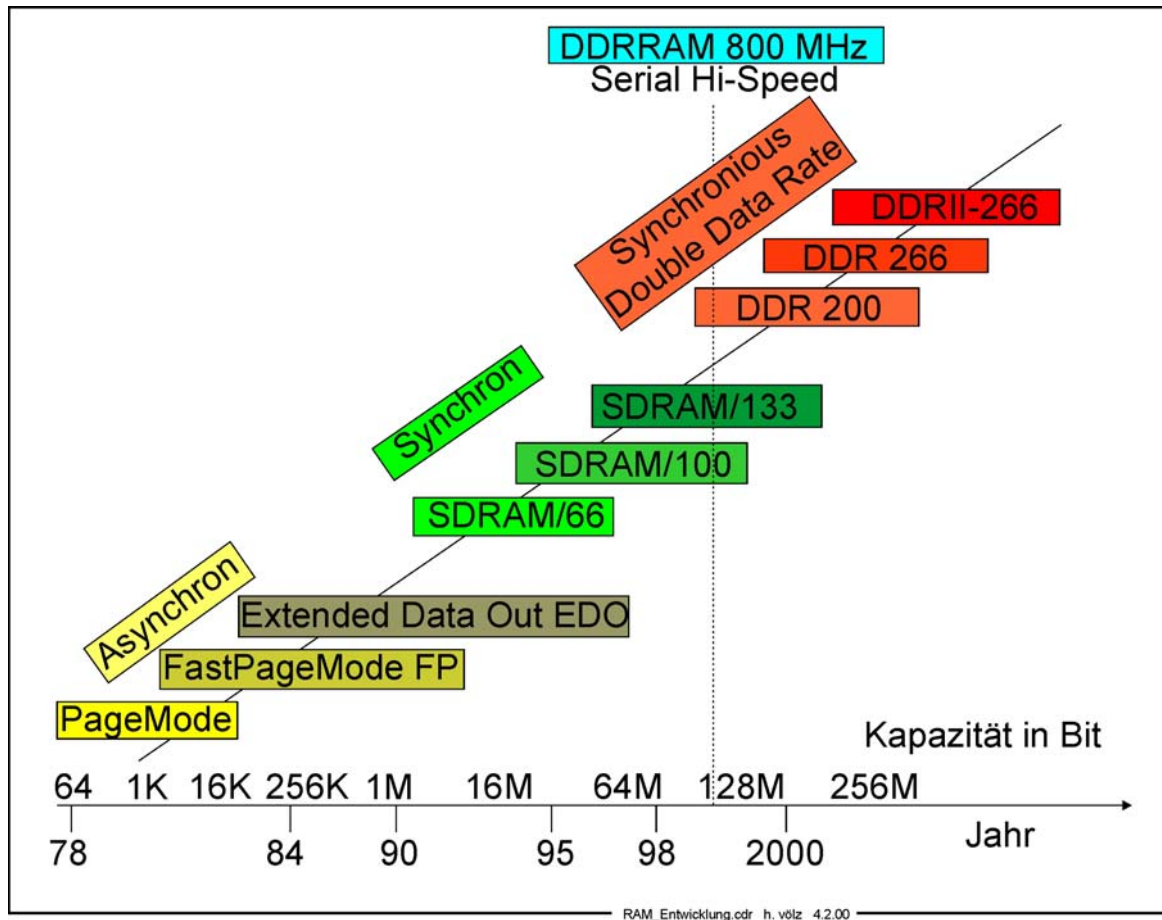
+ **Isoliermaterialien** mit großem ϵ_R ; Al_2O_3 , Ta_2O_5 später HfO_2 , $\text{Hf}_x\text{Al}_y\text{O}_z$, langfristig LaAlO_3
($\epsilon \approx 25$)

Neu hinzugekommen ist **body-charging** = Zero-Speicher

Wegen sehr kleiner Kapazität **dummy-Zelle** (*englisch* Attrappe) und **Differenz-Verstärker**



dramneu12.cdr h. vözl 16.8.94/4.5.05



Verbesserung der Zugriffszeit durch weiterentwickelte Betriebsweisen

Assoziativ-Speicher

= **CAM** (content addressed memory), Lateinisch *ad-* hin, zu und *socius* Gefährte

Mathematik: assoziatives Gesetz: $a+b+c = (a+b)+c = a+(b+c)$ bzw. $a*b*c = (a*b)*c = a*(b*c)$.

Große Vorteile für Datenbanksuche. Beispiel $\Rightarrow$ Tabellenausschnitt für Partnersuche

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	

Gesucht werden: unverheiratete, männliche Personen im Alter von 25 bis 35 Jahren mit Hobby Foto

Hierzu dient die **Maske**. Durch die ausgewählten Spalten (gelb) festgelegt $\Rightarrow$ *

Spalten: **Kinderzahl** und **Namen** sind unwichtig = Vermerk „don't care“

englisch nicht drum kümmern, Sie werden bei Suche ausgeblendet

Ausscheiden erfolgt durch Abweichungen **blau**

Entscheidung erfolgt für alle Zeilen **voll parallel in einem Takt**

Nur die markierten Zeilen werden in einer festgelegten Rangfolge angezeigt

Zur Schaltung, Aufbau

Paralleles Durchsuchen verlangt **umfangreiche Speicherzellen** und **zusätzliche Baugruppen**.

- Ein eigentlichen **Speicher** (Flipflop)
- Drei **logischen Baugruppen** für Schreiben, Lesen und Vergleichen
- Komplexe logische Verknüpfung für **Treffermarkierung**
- **Vorrangschaltung** für sequentielle Anzeige der Trefferzeilen

Erfordert etwa doppelte Fläche einer sRAM-Zelle bzw, fast 10fache einer dRAM-Zelle
Die komplizierte Verdrahtung zwischen den Zellen verlangt weiter viele Pins nach Außen

U. a. gab es

1983: 1 kBit-Speicher

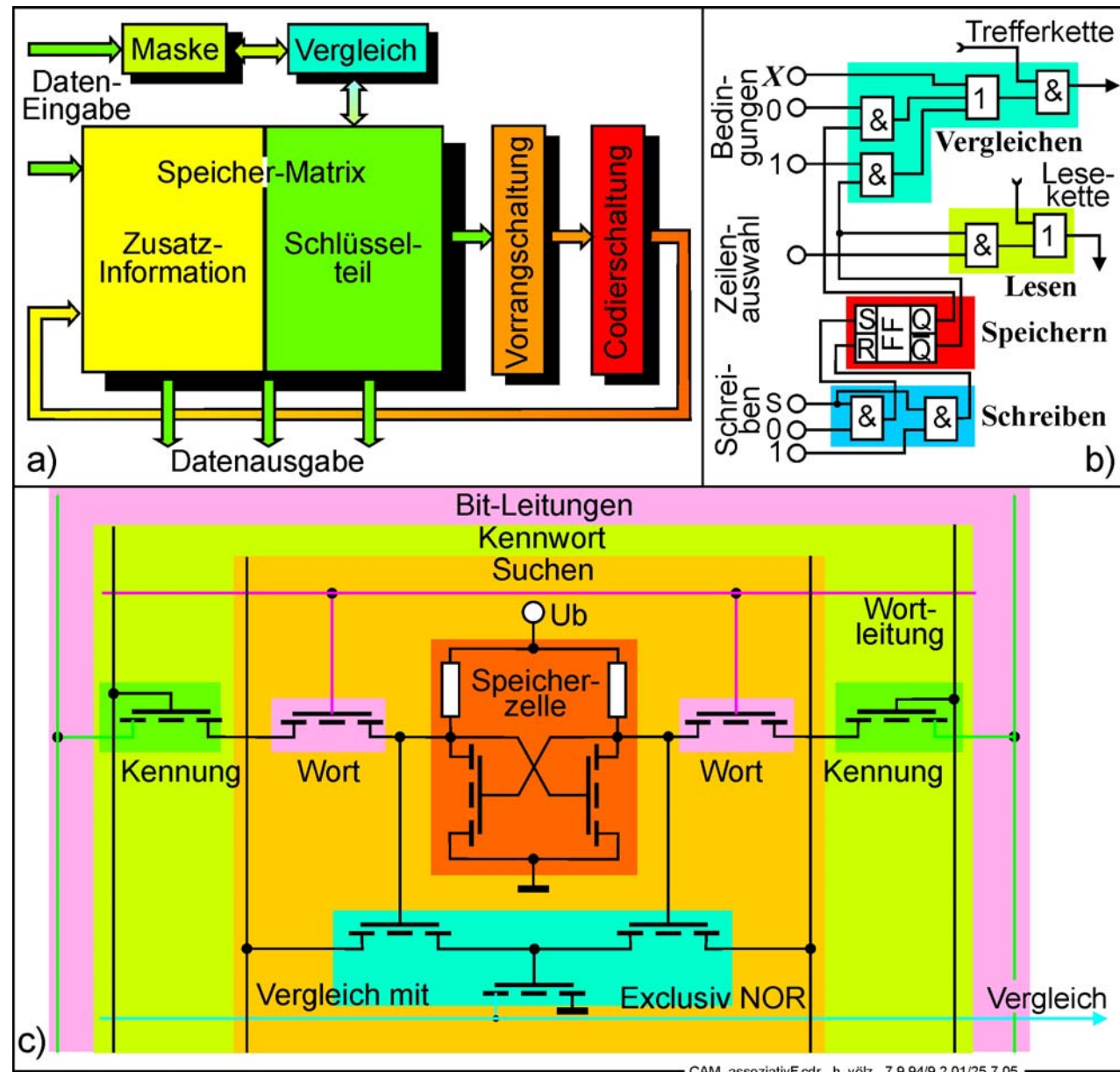
1985: 8 kBit-Speicher

1988: 16-kBit-Speicher

Sie kamen in speziellen LISP- und PROLOG-Rechnern zum Einsatz

2000 Mosaid: erstmalig mit dRAM-Zellen, 2 MBit, $7 \cdot 10^7$ Suchläufe je Sekunde

2003 gab es einen Baustein mit 16 Transistoren je Bit



Stack, für
Programmierung
Sonderschaltung

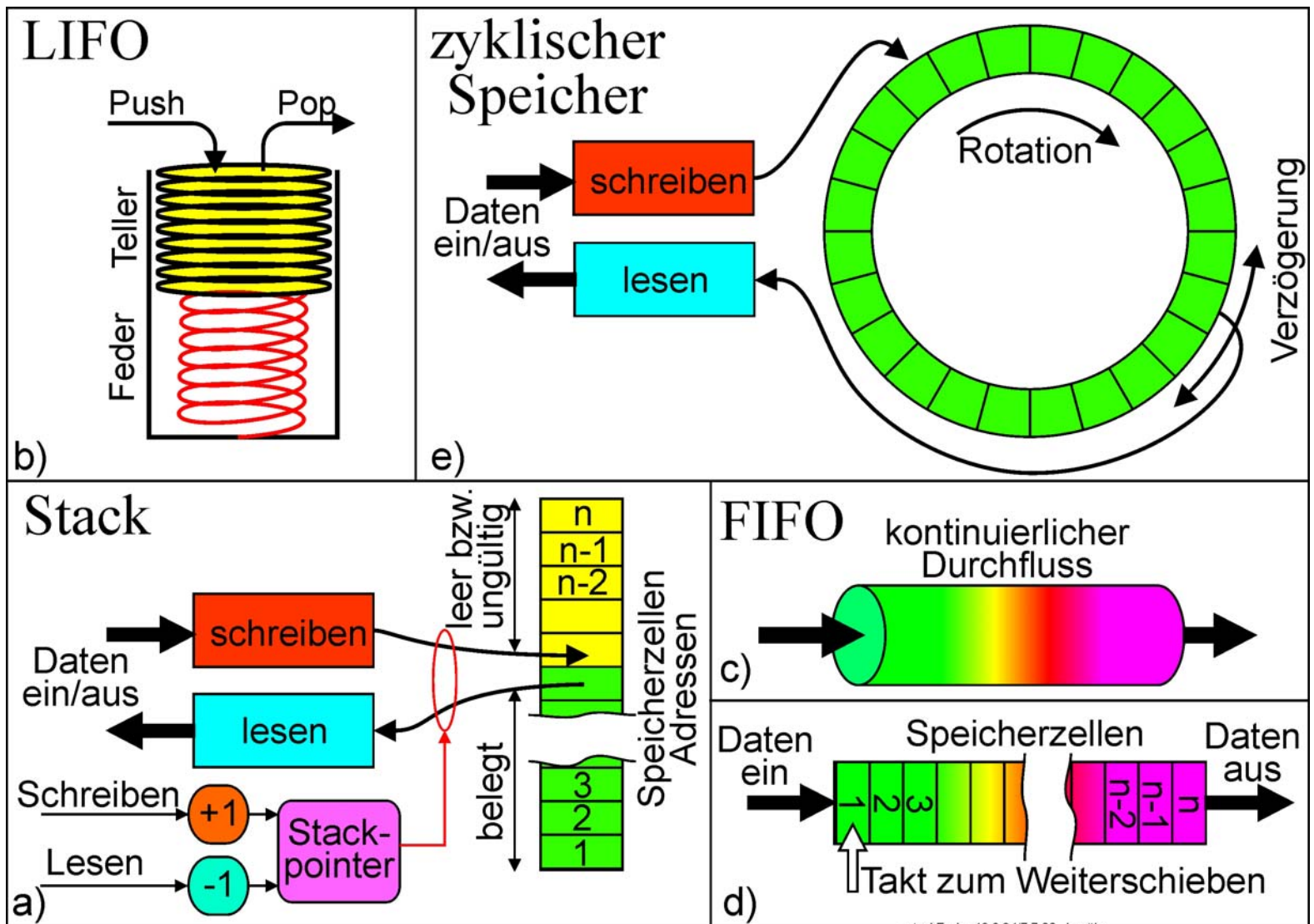
englisch Stapel,
Haufen, Warte-
raum, Miete,
Schacht, Schorn-
stein

= LIFO

= **last in first out**

Deutsch:
Kellerspeicher

Nie als Hardware
realisiert



Erfindung in den 50er Jahren, wahrscheinlich von WILHELM KÄMMERER (1905 – 1994)
Für die OPREMA (**O**ptik-**R**echen-**M**aschine) bei Zeiss Jena

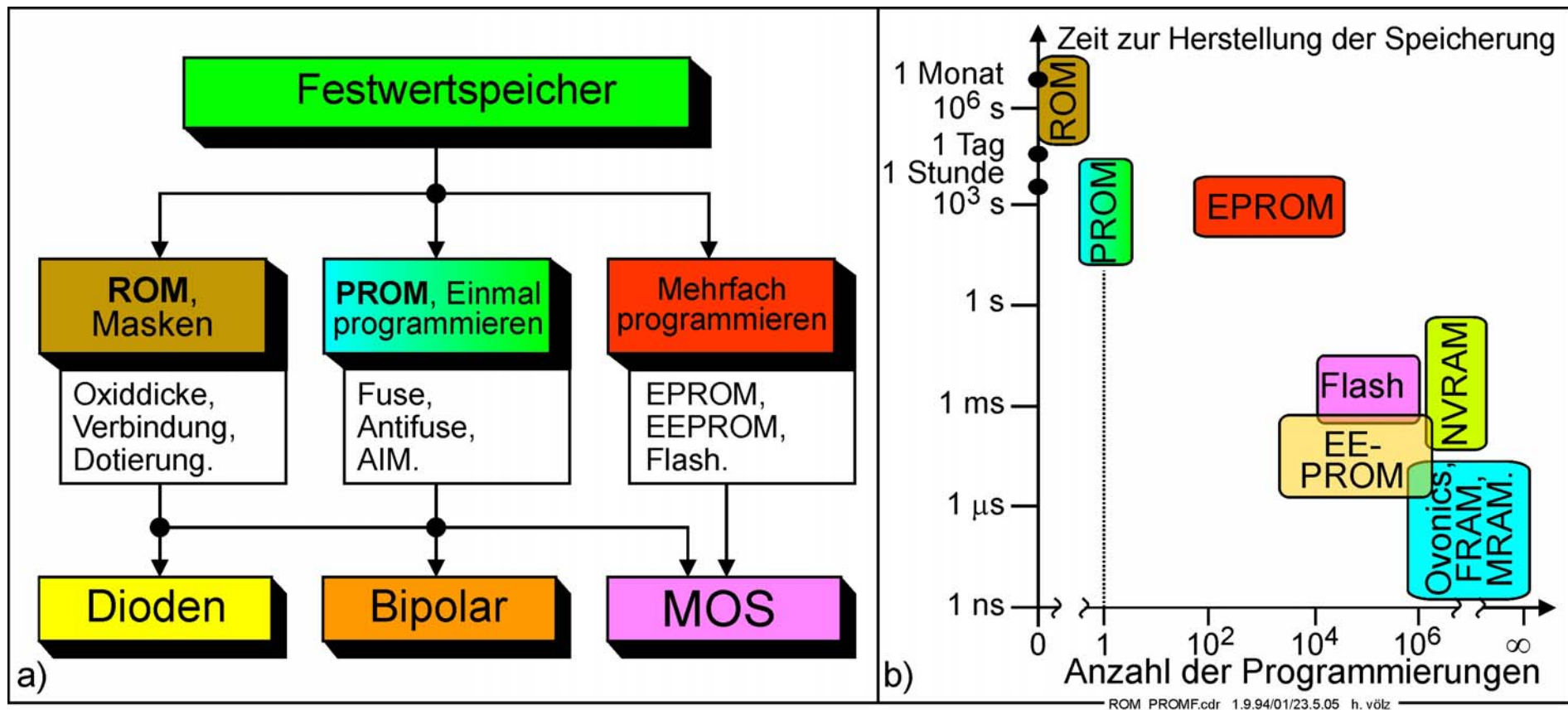
ROM, PROM, EPROM, EEPROM, Flash

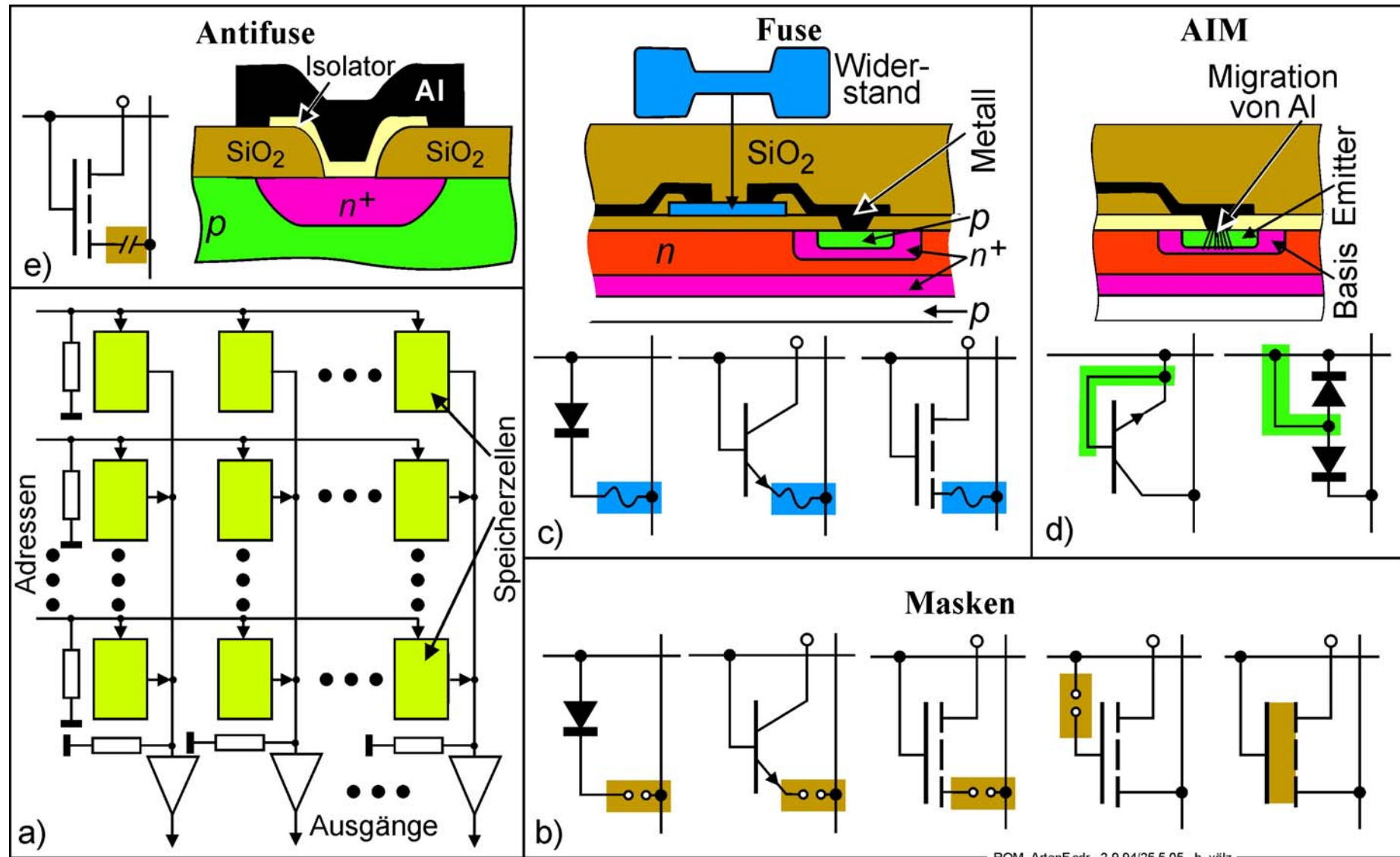
Heute sind die älteren Varianten fast vollständig durch **Flash-Speicher** verdrängt

Nur wegen Verständnis vom Flash und der Geschichte kurz erwähnt

ROM sind bei der Herstellung programmiert

Einfache PROM können nur einmal programmiert werden $\approx$ **one time programmable (OTP)**





Die Speichermatrix verlangt für OTP spezielle „gleichrichtende“ Speicherzellen

EPROM

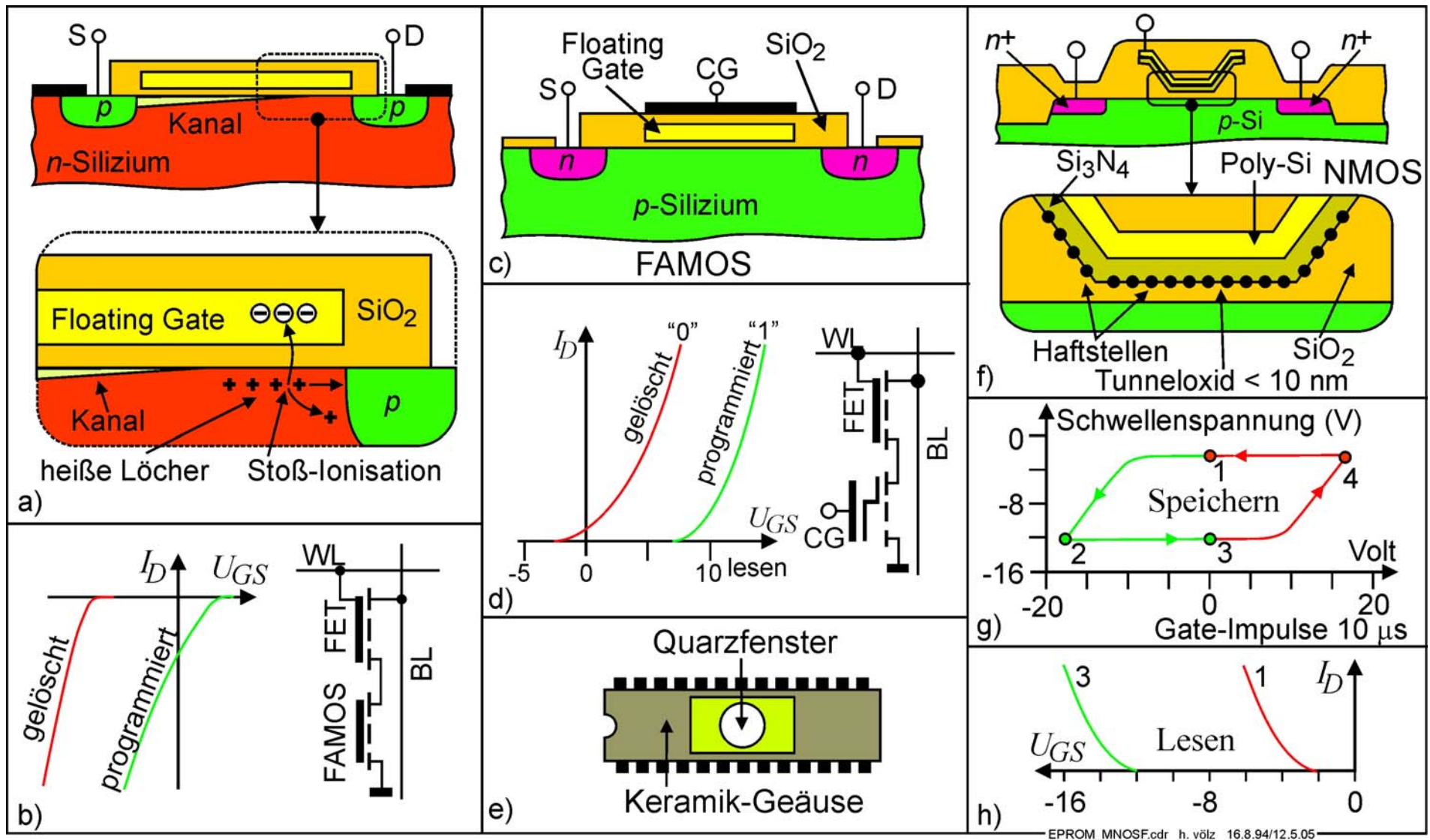
erasable PROM = löschbarer und damit erneut programmierbares ROM

Erfolgt mit zusätzlichem hochisoliertem **floating gate**; *englisch* floating fließend, schwebend
Es hat dann Anschluss zu einem Verstärker mit Eingangswiderstand
daher bleiben Ladungen langfristig erhalten, verlagern die Schaltschwelle 0 → 1

Programmierung verlangt hohe Spannung (≈ 20 V) zwischen Source (S) und Drain (D)
erzeugt leitenden Kanal; Ladungsträger (Elektronen) **hoher Geschwindigkeit**
durchwandern so die Energiebarriere ($\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 \approx 3,25$ eV)
werden auf das Gate injiziert (*lateinisch* **inicere** einflößen, hineinwerfen, einbringen)
erzeugt viel **Wärme** → einige hundert Impulse je Bit-Zelle, anfangs 10 ms, ab 1990 $\approx 0,1$ ms
nach Programmieren muss das Quarzfenster lichtundurchlässig **zugeklebt werden**

Zur **Löschung** sind die Ladungsträger wieder vom Gate zu entfernen
Sie müssen in das 4,3 eV höher liegende Leitungsband des SiO_2 gelangen
Chip wird ca. 20 Minuten mit UV, $\lambda \approx 250$ nm von 5 - 10 W/cm² bestrahlt
Oxid wird dadurch leitend. Alle Bit werden zugleich gelöscht
UV-Bestrahlung erfordert ein **Quarzfenster** und teures **Keramikgehäuse**

Wegen langer Löszeit auch Bezeichnung **RMM** (read mostly memory)
Infolge der hohen Belastung konnte ein EPROM nur 10^4 - bis 10^6 -Mal neu programmiert werden



EPROM_MNOSF.cdr h. völg 16.8.94/12.5.05

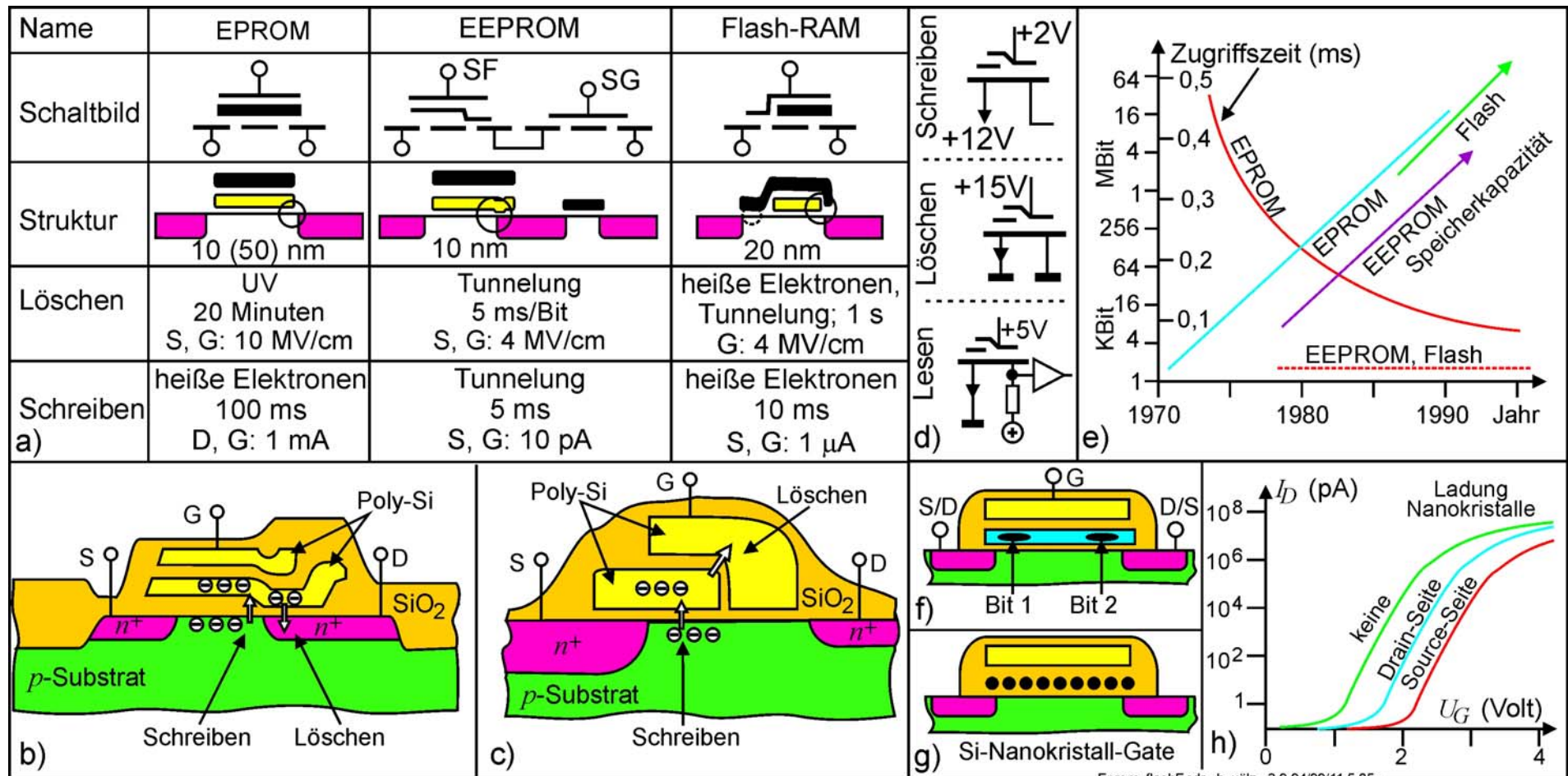
EEPROM = E²PROM ⇒ Flash

Electrical erasable PROM

Seit $\approx$ 2000 werden keine EPROM mehr gefertigt, sind zunächst durch EEPROM, dann Flash ersetzt
Zum Programmieren und Löschen werden dabei unterschiedliche Tunnel-Effekte benutzt

Mit Tunnel-Effekt erklärte 1928 GEORGE ANTHONY GAMOW (1904 – 1968) die Radioaktivität
1928 **Fowler-Nordheim**-Theorie Sir RALPH HOWARD FOWLER (1889 – 1944), LOTHAR NORDHEIM
1957 entdeckte LEO ESAKI (*1925) die Tunneldiode
1962 sagte BRIAN DAVID JOSEPHSON (*1940) den Effekt bei Tieftemperatur voraus
Tunnel-Effekte für **kleine Abstände ≈ 10 nm**, unabhängig von Temperatur → kalte Emission

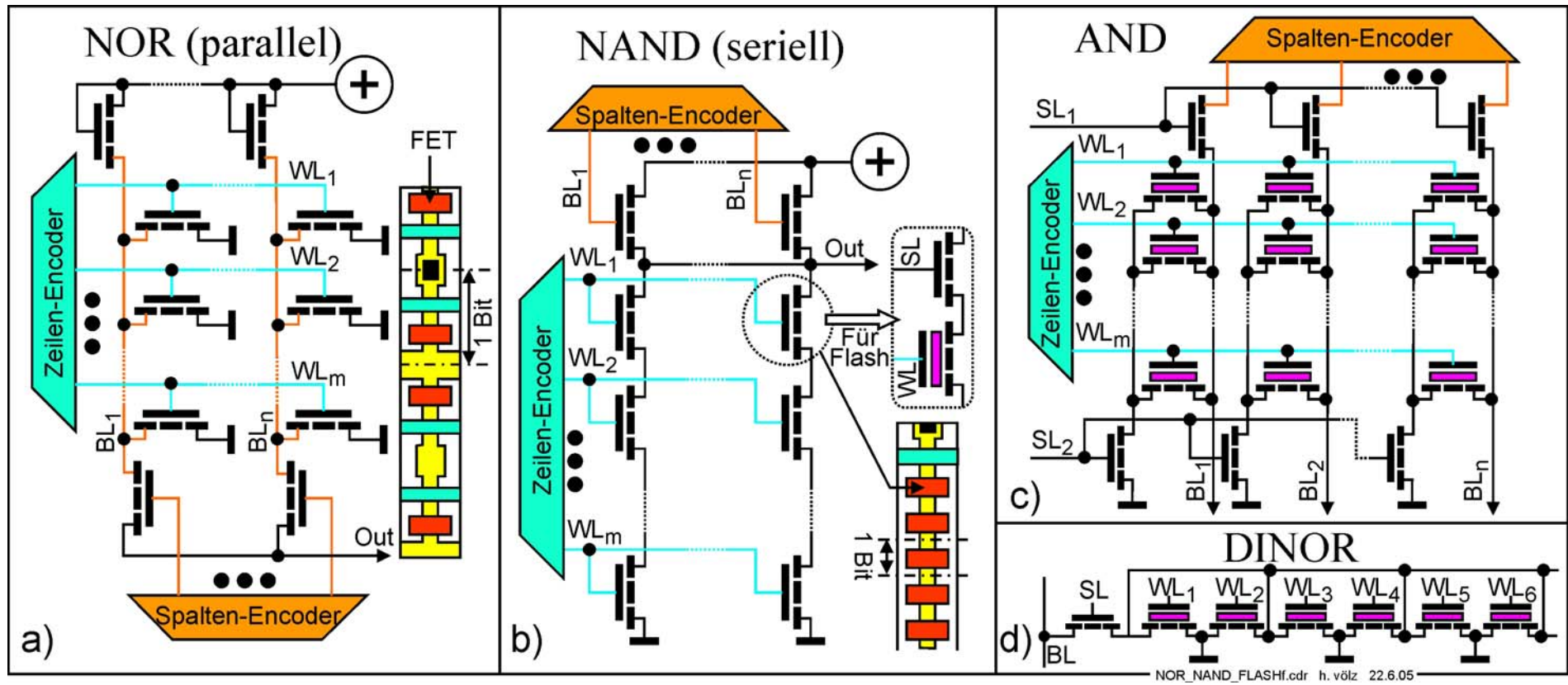
1985 **Flash** (*englisch* Blitz $\approx$ schnell), Löschen nicht mehr bit- sondern blockweise ⇒ schneller
1988 Intel: **NOR-Flash**; 1989 Toshiba: **NAND-Flash**
1997 Multilevel-Flash (MLC = **m**ulti **l**evel **c**ell) von Sandisk 4 Stufen = 2 Bit je Zelle
2005 auch erste 3-Bit-Zellen = 8 Amplitudenstufen



Eprom_flashF.cdr h. vözl 3.9.94/99/11.5.05

Vergleich von NOR- und NAND-Flash

	NOR	NAND
Vorteile	Wahlfreier Lesezugriff 60 - 90 ns für 16 Bit-Wort Ersatz für EEPROM Höhere Zuverlässigkeit Mikroprozessortauglich	Platzbedarf $\approx \frac{2}{5}$ NOR Programmieren 2 MB/s Löschen 5 MB/s Massenspeicher, z.B. Speicherkarten
Nachteile	Höherer Platzbedarf Programmieren 0,2 MB/s Löschen 0,08 MB/s	Serieller Zugriff mit 15 μ s/Seite (528 Bytes)
Schnittstelle	SRAM-ähnlicher Bus	gemultiplextes I/O
Zellgröße	groß	klein
Lesen	schnell	langsam
Programmieren (Byte)	schnell	langsam
Programmieren (KByte)	langsam	schnell
Löschen	langsam	schnell
Leistungsaufnahme	relativ hoch	gering
Fehleranfälligkeit	gering	erheblich, wird korrigiert



NVRAM

non volatile *englisch* nicht vergänglich, flüchtig

Jede Speicherzelle besteht aus einem sRAM und E²PROM bzw. Flash

1982 wurde der erste von Xicor vorgestellt

Die sRAM-Matrix – jetzt meist dRAM – wird wie üblich betrieben

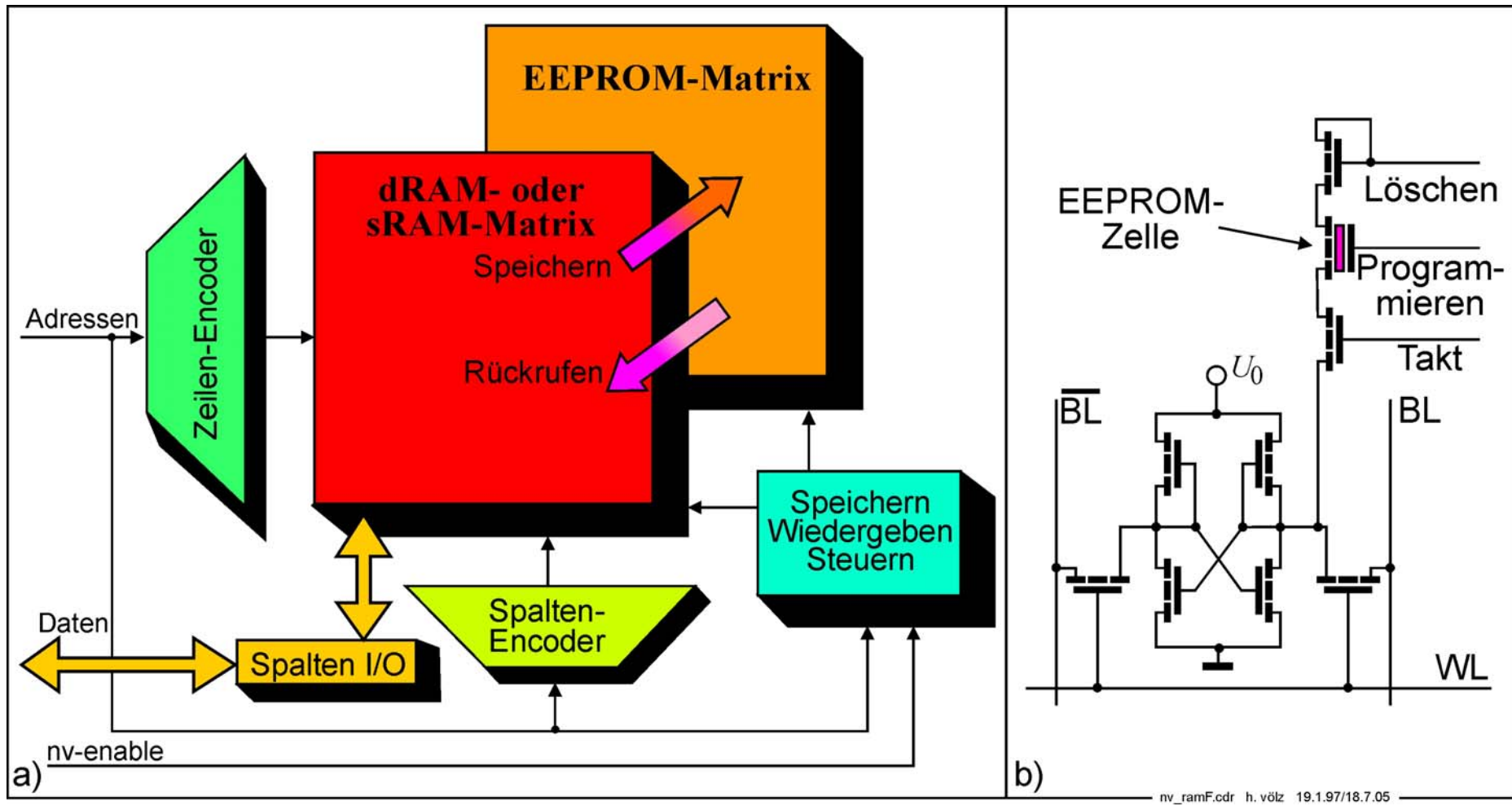
Hier kann ***ständige Änderung der Daten*** erfolgen.

Ihr Inhalt wird mit einem Takt (meist Sekunden) oder anderen Strategien in den E²PROM übertragen

Bei Stromausfall, Störung können nahezu aktuelle Daten aus E²PROM zurückgeschrieben werden

Die Bit-Zelle ist daher sehr aufwändig $\Rightarrow$ nur kleine Speicherkapazität möglich

Für kritische Anwendungen ergibt sich jedoch eine sehr große Sicherheit

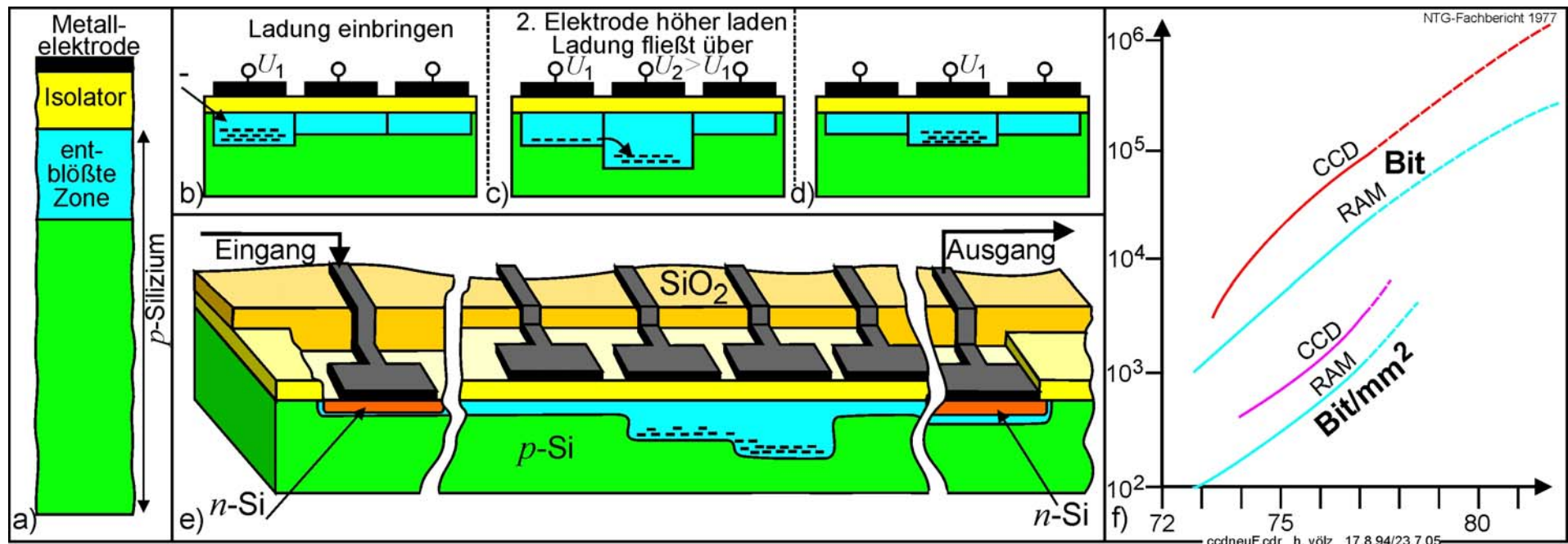


Serielle Speicher

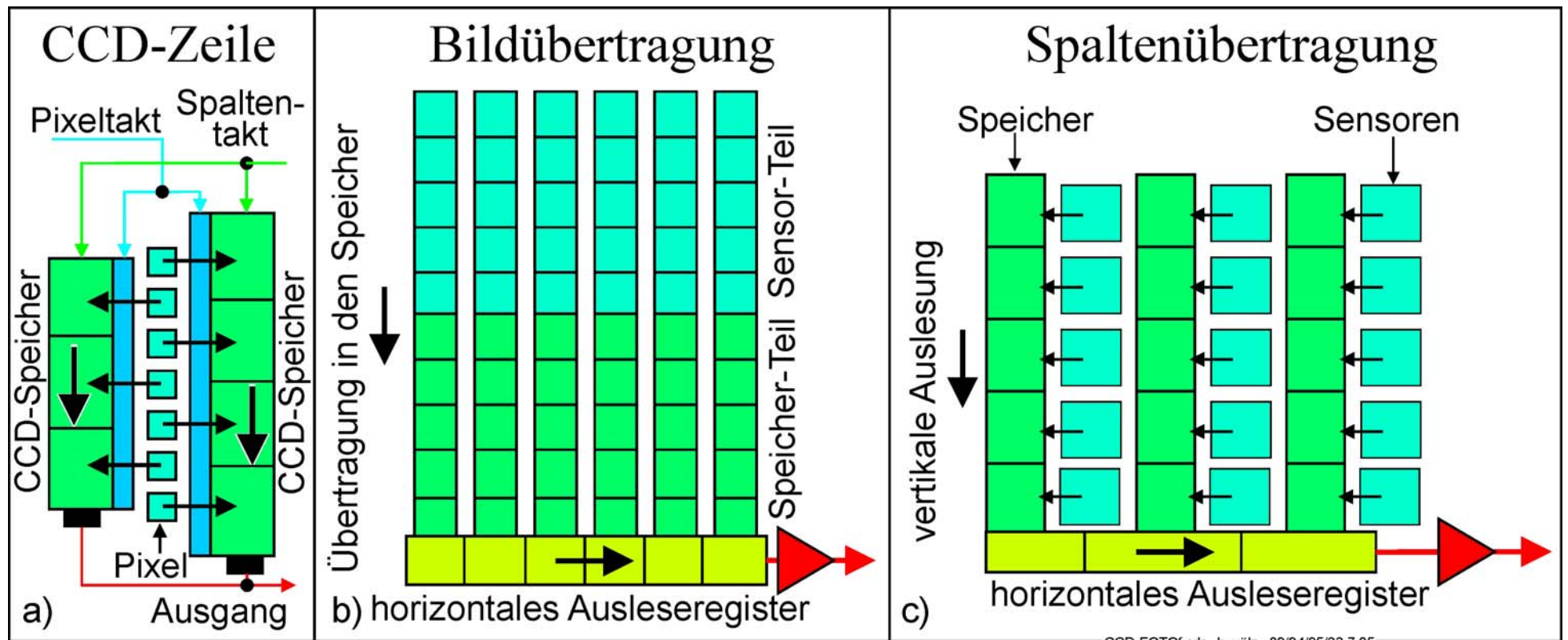
Zu Beginn der Rechentechnik (50er Jahre) mit **Kondensatoren** und aktiven (verstärkende) Schaltern
Benutzen heute **Verschiebung von Ladungen** → **CTD** (charge transfer devices)
Wichtig für kontinuierliche Signale u. a. zur **Video- und Audioaufzeichnung**
Notwendig für Scanner und elektronischen Kameras

1969 von SANGSTER **BBD** (**b**ucket **b**rigade **d**evice, *englisch bucket* Eimer, Becher →
Eimerkettenspeicher = Feuerlöschkette)
Später Ladungen entgegengesetzt zur Information bewegt

1971 von BOYLE und SMITH **CCD** (**c**harge **c**oupled **d**evice, *englisch charge* Ladung)
Zunächst kaum beachtet, heute durchgesetzt
Nutzen: in der Tiefe variierbare verarmte Zonen (Töpfe), die Ladungen halten können
ermöglichen sehr einfachen integrierten Aufbau



Die von Trägern entblößte Zone kann in der Tiefe durch die Gate-Spannung verändert werden
 Hier können dann Minoritäts-Ladungen wie eine Flüssigkeit für ms gelagert werden
 Bei mehreren „Töpfe“ nebeneinander kann sie durch verstellen Tiefe transportiert werden
 Taktfrequenzen von etwa 10 Hz bis vielen MHz möglich, Stufenzahl auf einige Tausend begrenzt
 Prinzip war früher Hoffnung für große Speicherkapazitäten
 Heute wichtig bei Scannern und elektronischen Kameras
 Anwendungen auch zur Signalverzögerung und bei digitalen Filtern



Lichtempfindliche Zellen = blau, Transport-CCD grün, bei erhöhtem Takt gelbgrün

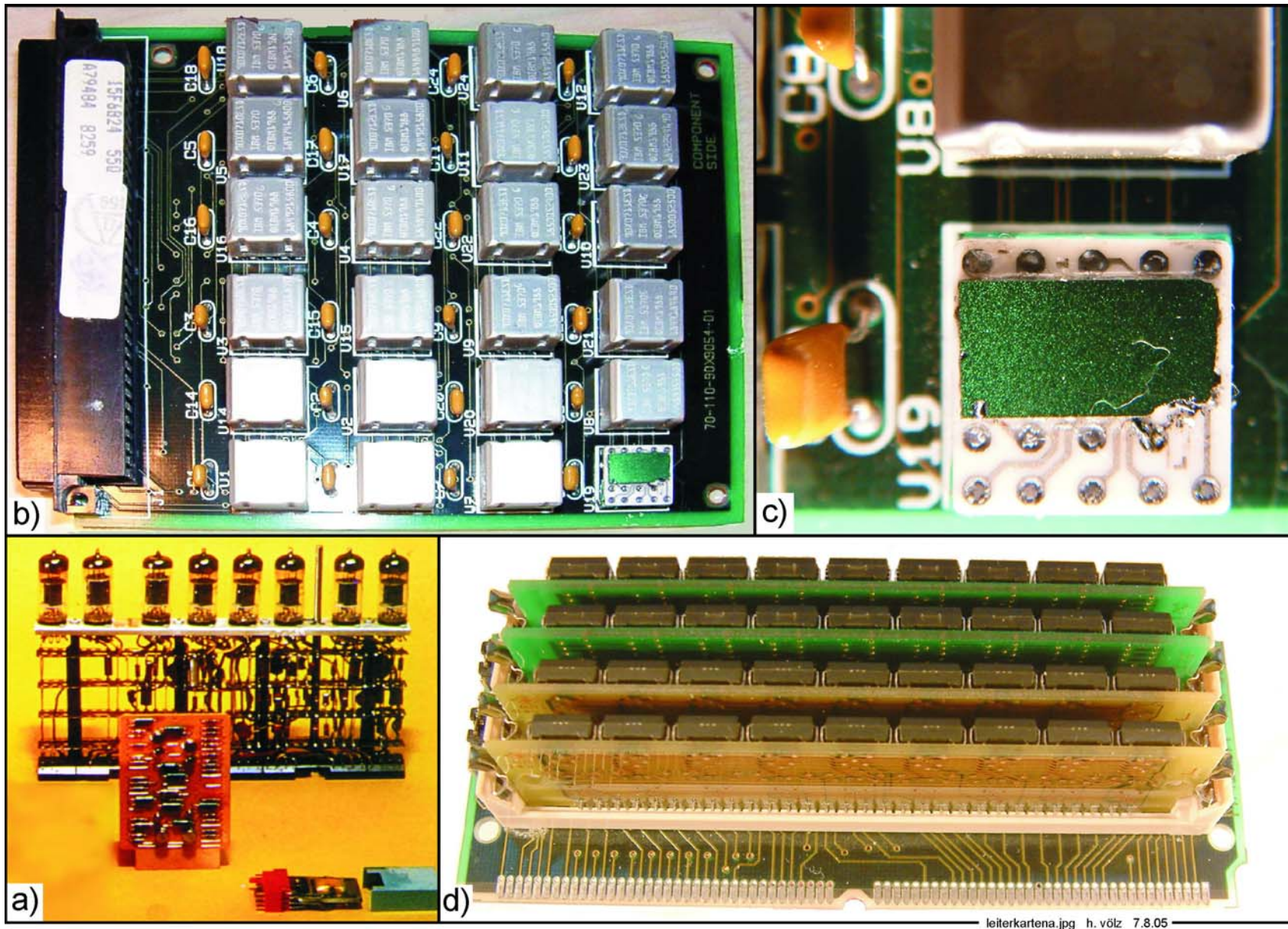
Gehäuse usw.

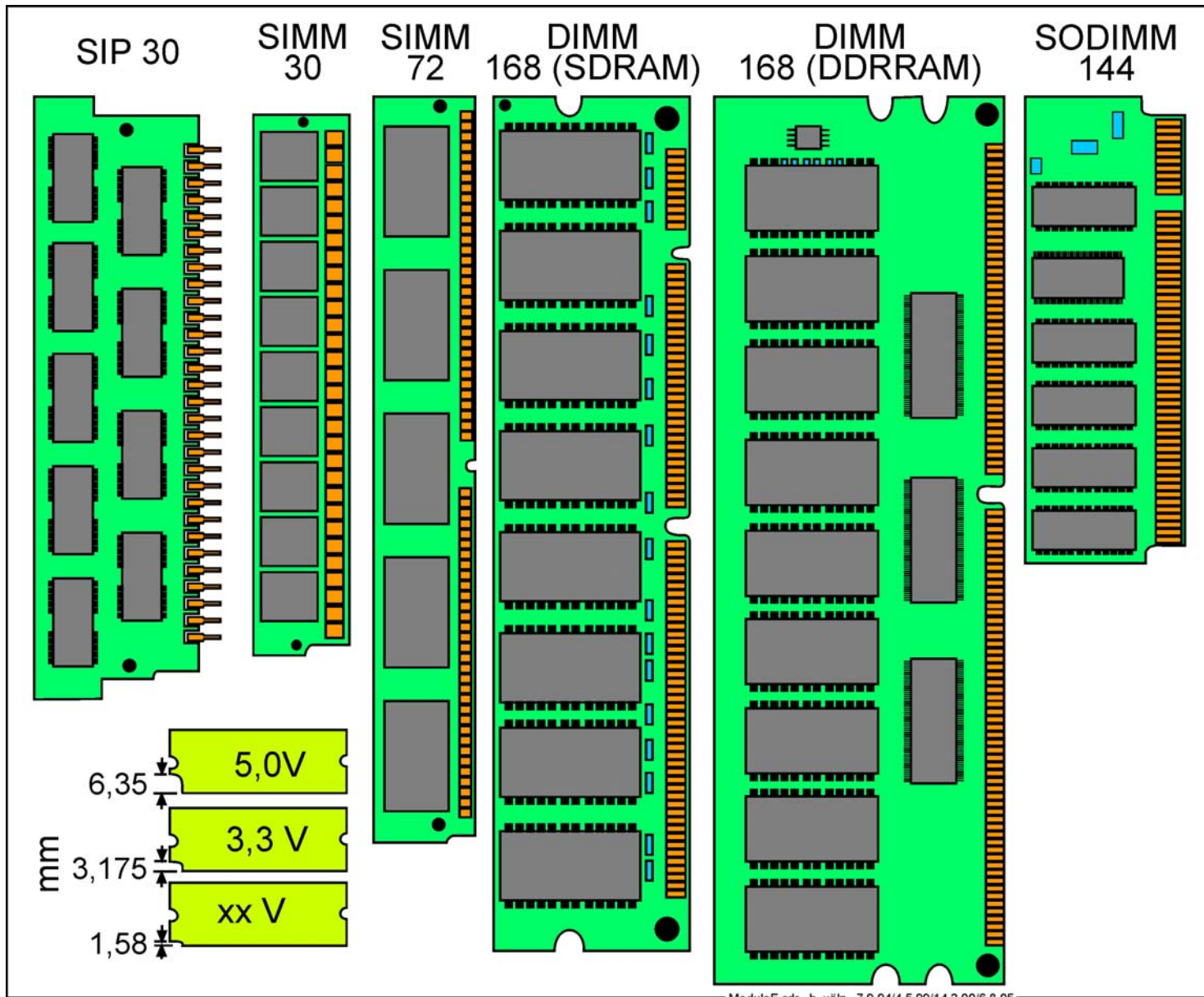
Halbleiter müssen geschützt verpackt werden

Ursprünglich Keramik-Gehäuse, als Chips zu Einlöten

Wegen kleiner Kapazität zunächst auf speziellen leiteplatten auch als Einbaumodule

Schließlich als Karten wie SD usw.





Ausgewählte kleine Speicherkarten

Karte	Compact Flash (CF)	Smart Media (SM)	Memory Stick (Pro)	Secure Digital (SD)	Multimedia (MMC)	xD-Picture
Größe (mm)	42,8×36,4×3,3	45×37×0,76	21,5×50×2,8	21×24×2,1	32×24×1,4	20×25×1,7
Masse (g)	11	2	4	2	1,5	2
Anschlüsse	50	32	10	9	7	18
Controller	integriert	ohne	integriert	integriert	integriert	ohne
Interface	parallel, ATA&True-IDE	parallel proprietär	seriell, proprietär pro = parall.	seriell MMC&SPI	seriell, MMC&SPI	parallel
Überspiel-, Kopierschutz	nein nein	ja nein	ja ja	ja ja	nein nein	nein nein
Besonderheiten	Microdrive Höhe 5,0; 16 g; IBM, Hitachi	2 Spannungen, flach, instabil, kompatibel?	mechanisch empfindlich	Es gibt 2 kleinere Varianten	Es gibt eine MMMmicro	xD = extreme Digital
Einführung	Nov. 94	(1996)	1998	1999	1997	2002
Aussehen: nicht maßstabs- gerecht!	 Flashcard.cdr h. vö lz 12.8.05					

Es fehlen hier die kleine Mini- und Mikro-SD

Smartcard

*Englisch **smart** gerissen, mit Durchsetzungsvermögen ausgestattet, clever*

= Scheckkartenformat: **82,55×54×0,76** mm³ (ISO-Standard 7816)

Entwicklung verlief **weitgehend unabhängig** von Speicherkarten

Vielfältige Speicherverfahren, zuweilen kombiniert benutzt, wichtige Varianten sind:

- **Magnetstreifenkarten** ab etwa 1935 bzw. 1965 (auch viele andere Formate)
- **Hochgeprägte Karten**, z.B. Diners Club, ab 1950
- (elektronische) **Chipkarten** ab etwa 1980
- **Optische Speicherkarten**, z.B. LaserCardTM von JEROME DREXLER 1981

Zusätzlich spezieller Aufdruck, Unterschrift, Lichtbild, Hologramm usw.

1949 FRANK MCNAMARA 1949 kann sein Essen nicht bezahlen, Geldbörse vergessen

1950 gründet er mit seine Freunden „**Diners Club**“ → Kreditkarte mit Hochprägung

Heute: Kredit-, Geld- (1980), EC- (1968); Telefon- (1986; 1995), Kranken-Karte (1992) usw.

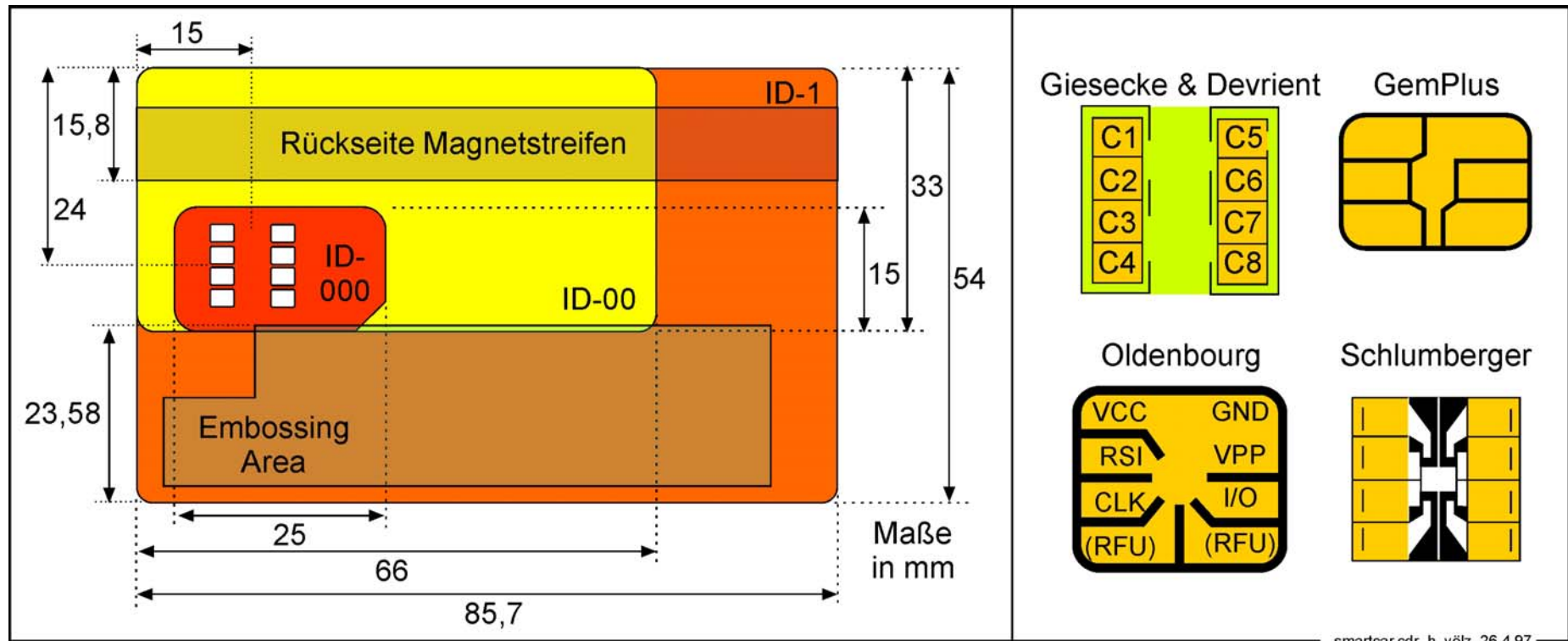
Bahncard, Hotelschlüssel (1972), EU-Führerschein und Autosicherung (1994 kontaktlos)

1968 JÜRGEN DETHLOFFS und HELMUT GRÖTTRUP Patent: Plastik-Smartcard **mit Halbleiter-Chip**

1979 erste Muster erprobt, 1980 in Hamburg erste Bargeldautomaten, 1982 mit 4 kBit EPROM

1996 **EC-Karte** von allen Sparkassen und den meisten Banken eingeführt

Heute drei Größe üblich: kleinste als **SIM-Karte** (ID000) bei Handy (subscriber **i**dentity **m**odule)



smartcar.cdr h. vözl 26.4.97

3. Mögliche zukünftige Speicher

Neuentwicklungen entstehen vor allem bei *elektronischen Speichern* im Folgenden werden davon kurz behandelt:

- Ferroelektrisch, FRAM
- Magnetischer RAM
- Amorph - kristallin = u. a. PRAM, PCRAM
- Organischer RAM
- Nano-Techniken

Nicht berücksichtigt werden mögliche Speicher u. a. bzgl.:

- Tieftemperatur
- Tunnel-Effekte
- Quanten-Effekte
- Magnetismus, z. B. kombiniert optisch-magnetisch und Wandverschiebungen
- ungewöhnliche Varianten, z. B. IBM-Tausendfüßler und Kabel-Laufzeit-Speicher

Ferroelektrika $\Rightarrow$ FRAM

Im Kondensator gespeichert elektrische Ladung geht durch Widerstände u. Radioaktivität verloren

Es gibt jedoch **Ferroelektrika**, die Eigenschaften wie Dauermagnet besitzen, u. a. Hysterese

1920 entdeckte J. VALASEK das Rosette-Salz = Möglichkeit der anhaltenden Umpolarisation

1922 werden erste Elektrete vom Japaner JOHUTSI hergestellt

1955 werden die ferroelektrischen Perovskit-Kristalle, u. a. PZT, entdeckt

1970 dauerhaft polarisierte Kunststofffolien = Polarisation einer Flüssigkeit (Schmelze, Lösung),
anschließendes Einfrieren des Feldes, Abkühlung bzw. Lösungsmittelentzug,
andere Verfahren benutzen Streckung der Folie oder mittels Korona-Entladung bekannt.

≈1980 ferroelektrische Membranen (Elektret) bei Kondensator-Mikrofonen

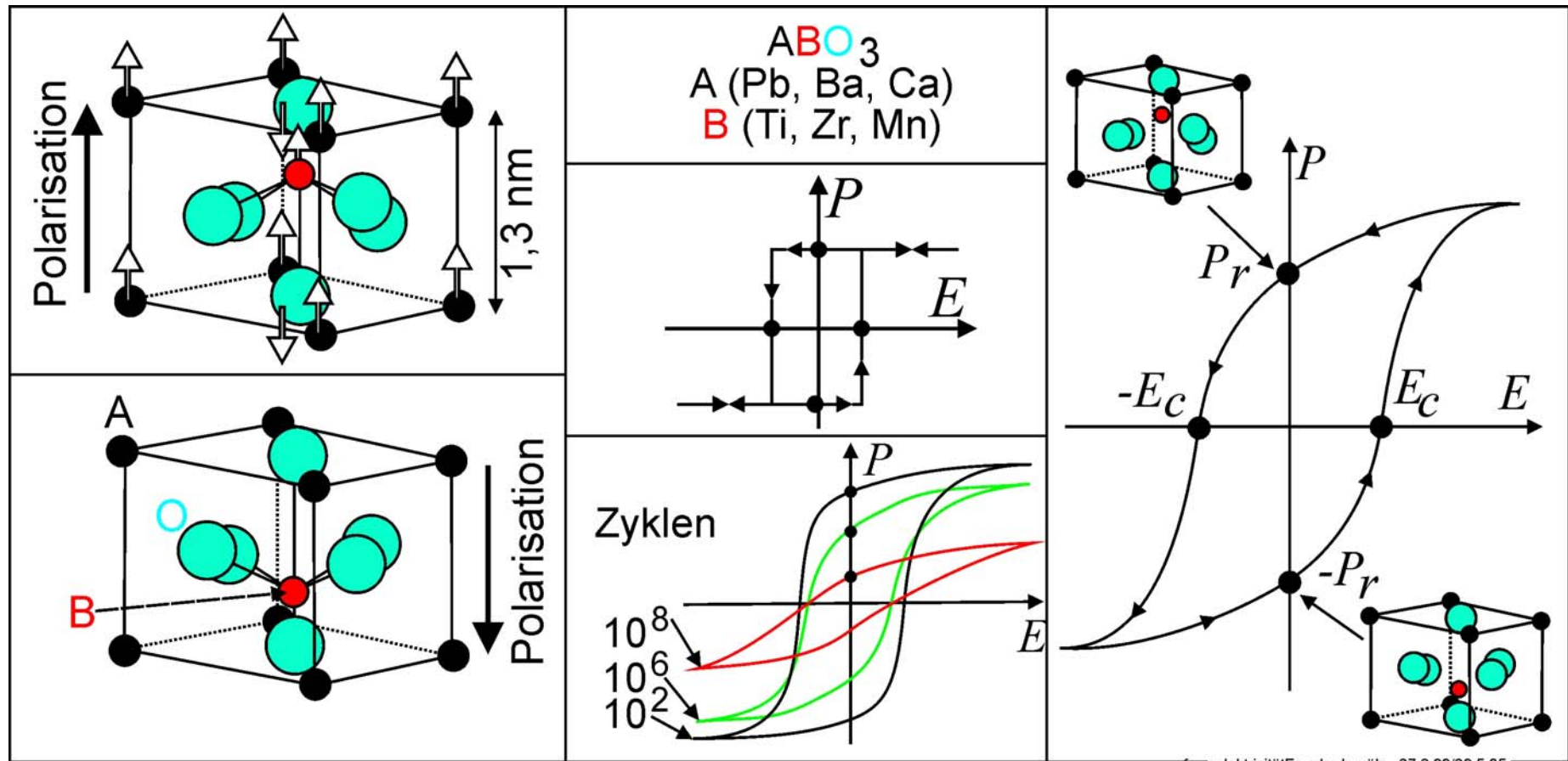
1992 Fa. Ramtron versucht den Effekt für Speicher (Kondensator-Dielektrikum) zu nutzen

1993 **4 KBit**-Speicher, 1996 **16 KBit** und 1999 **256 KBit**, 2007 **4-MBit** mit 10^{14} Schreibzyklen

1997 auch japanische und koreanische Hersteller

2003 Zellgröße $<1 \mu\text{m}^2$, Zugriffszeit $<50 \text{ ns}$, Betriebsspannung $<3 \text{ V}$; 2005: $<1,8 \text{ V}$

2009 Speicher mit mehreren Bit je Kondensator



ferroelektrizitätFa.cdr h. vözl 27.3.99/29.5.05

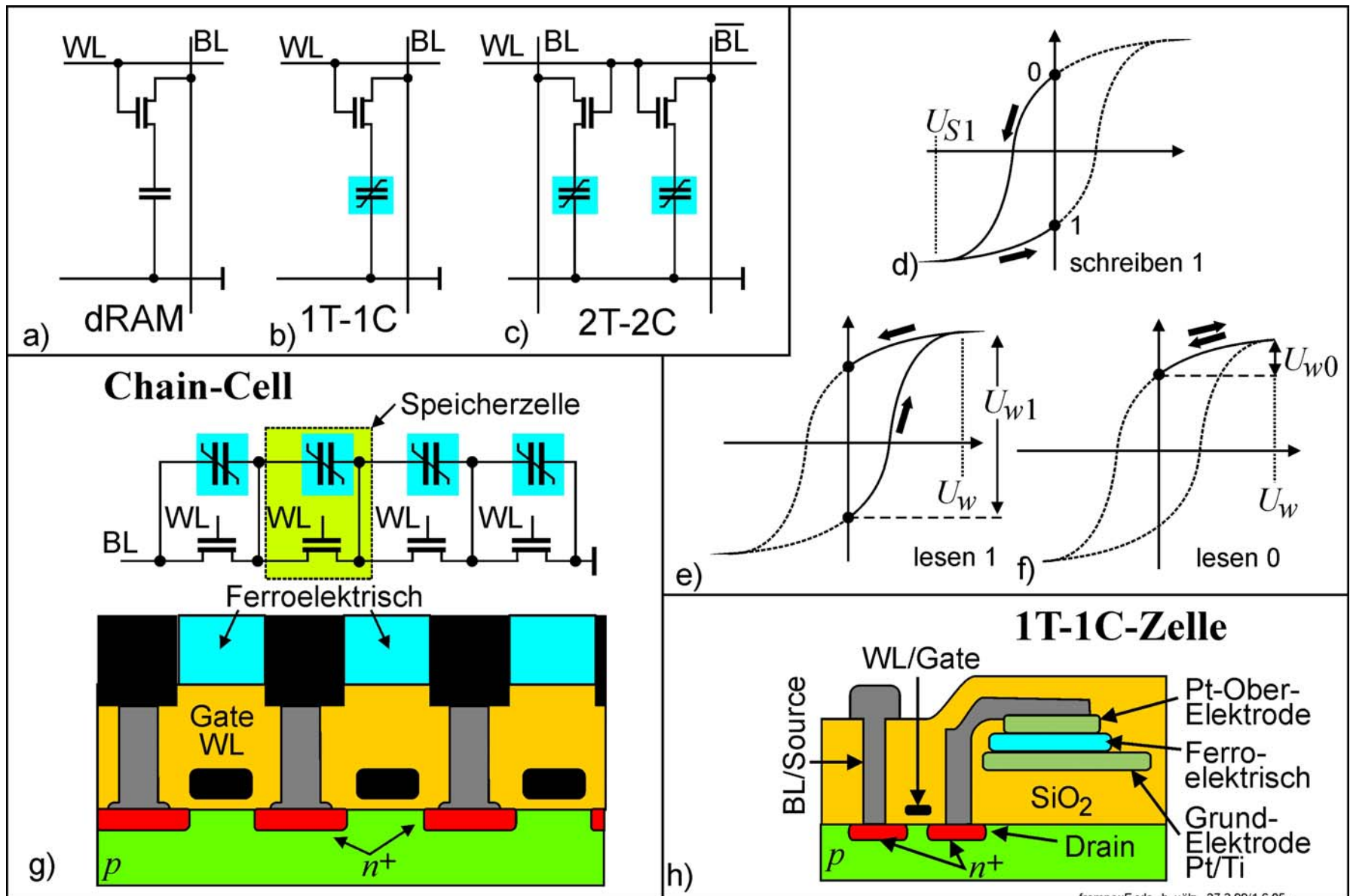
Prinzip und Hysterese bei Ferroelektrika
 Das Verflachen der Hysterese konnte ständig verringert werden

FRAM-Varianten

Ferroelektrische Substanzen sind technologisch schwer mit der **Si-Technologie** zu kombinieren
Werden meist **aufgesputtert** (englisch **to sputter** heraussprudeln, spritzen, hier Kathodenzerstäubung)
Zunächst großer Nachteil: Qualität sinkt mit Anzahl der **Speicherzyklen**, z. B. $>10^6$
Es entstanden nacheinander xT - yC -Zellen/Bit: x Anzahl Transistoren und y Kondensatoren:

- $0T$ - $1C$ mit Polymerfolien zwischen gekreuzte Leiterbahnen, umfangreiche Randlelektronik und langsamen Zugriff
- $1T$ - $0C$ als **FeFET** = dRAM-ähnlich, Elektret als Dielektrikum epitaktisch unterm Gate, hat sich nicht bewährt
- $2C$ - $2T$ **FRAM** ab 1992. zwei Zellen werden komplementär je Bit betrieben, große Fläche, technologisch einfach
- $1T$ - $1C$ Seit 2000 üblich, nur eine Referenzspannung $\rightarrow$ enge Fertigungs-Toleranz u. a. „Chain-Cell“, $\rightarrow$ längere Zugriffszeit, erheblich höhere Speicherdichte

Achtung: Name der Speicher wurde mehrfach geändert (Patentrechte)



Elektronen-Spin → MRAM

1921 STERN-GERLACH-Versuch weist Spin der Elektronen nach: „↑“ und „↓“, „up“ und „down“

Ähnlich wie **Licht polarisiert** werden kann, sind auch Elektronen nach ihrem Spin zu trennen

Fließt Strom durch Magnetmaterial mit Magnetfluss, dann kann „**Spin-Flip**“ auftreten

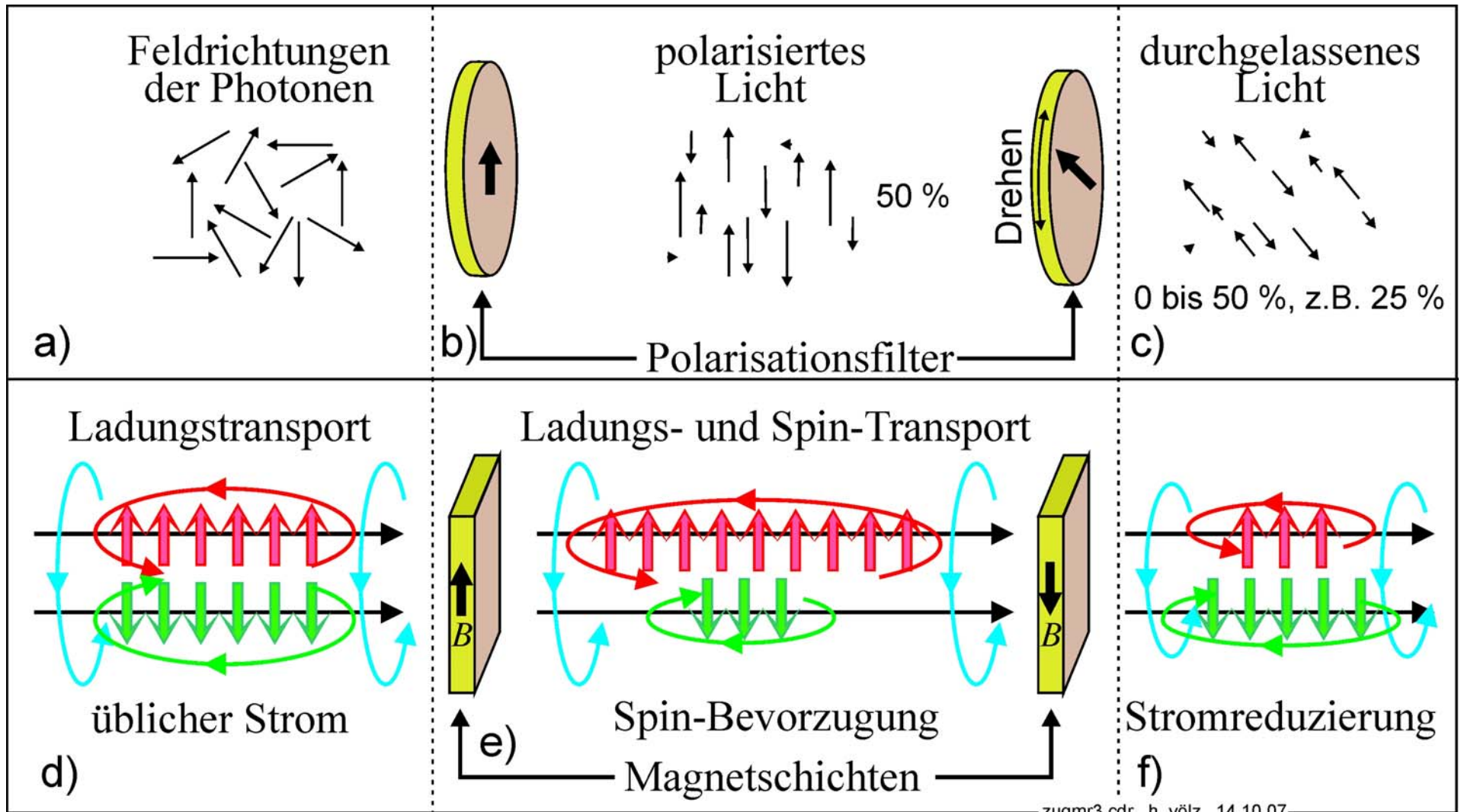
Elektronen mit Spin in „ungünstiger“ Orientierung kippen ihre Spin-Richtung, z. B. „↓“ $\Rightarrow$ „↑“

Dabei kann, muss aber nicht die Stromstärke erhalten bleiben

Fließt der so geänderte Strom durch ein zweites Magnetmaterial mit entgegengesetztem Fluss, so erfolgt erneut eine Spin-Auswahl, Flippen weniger möglich $\Rightarrow$ Stromreduzierung

Im „normalen“ Strom sind beide Elektronen gleichviel vorhanden $\Rightarrow$ rotationssymmetrischer magnetischer Wirbel um Stromfluss

Jeder **Spin** bewirkt einen typischen **transversalen Wirbel** um den Stromfluss



zugmr3.cdr h. völz 14.10.07

Geschichte

Vorteil magnetischer Speicher ist die stabile **Hysterese**

Ab 1950 **Ferrit-Ringkerne**, blieben bis ca. 1970 die einzigen effektiven Arbeitsspeicher

In 60er bis 80er Jahren viel Forschung zu **Draht-, Bubble-** und **Dünnschicht-Speicher**

Erlangte keine bedeutende Anwendung, aber hohe **Strahlenfestigkeit** für Weltraum

Ab 80er Jahre bis heute fast nur die Halbleiter für Arbeitsspeicher

Neuer Anstoß durch Entwicklungen bei **Festplatten**

1970 **Tunneleffekt** bei Tieftemperatur mit Al_2O_3 von 1 - 5 nm (4 bis 20 Atomlagen) nachgewiesen

1985 ARTHUR POHM, JIM DAUGTON (Honeywell) $\Rightarrow$ 1993 CRAM (*englisch cros-tie* gekreuzte Verbindung), genutzt magnetische Anisotropie = **AMR** (anisotropic magneto resistance)

1994 Für Raumtemperatur STUART PARKIN $\Rightarrow$ IBM Speichervariante als **MTJ**

2004 IBM und Infineon 16-MBit-MTJ-Speicher

2006: Freescale 4 MBit-**MRAM**, 3,3 V, 35 ns, Lese-/Schreibstrom 55/105 mA, Standby 9 mA, 15 \$

Voraussetzungen für MRAM

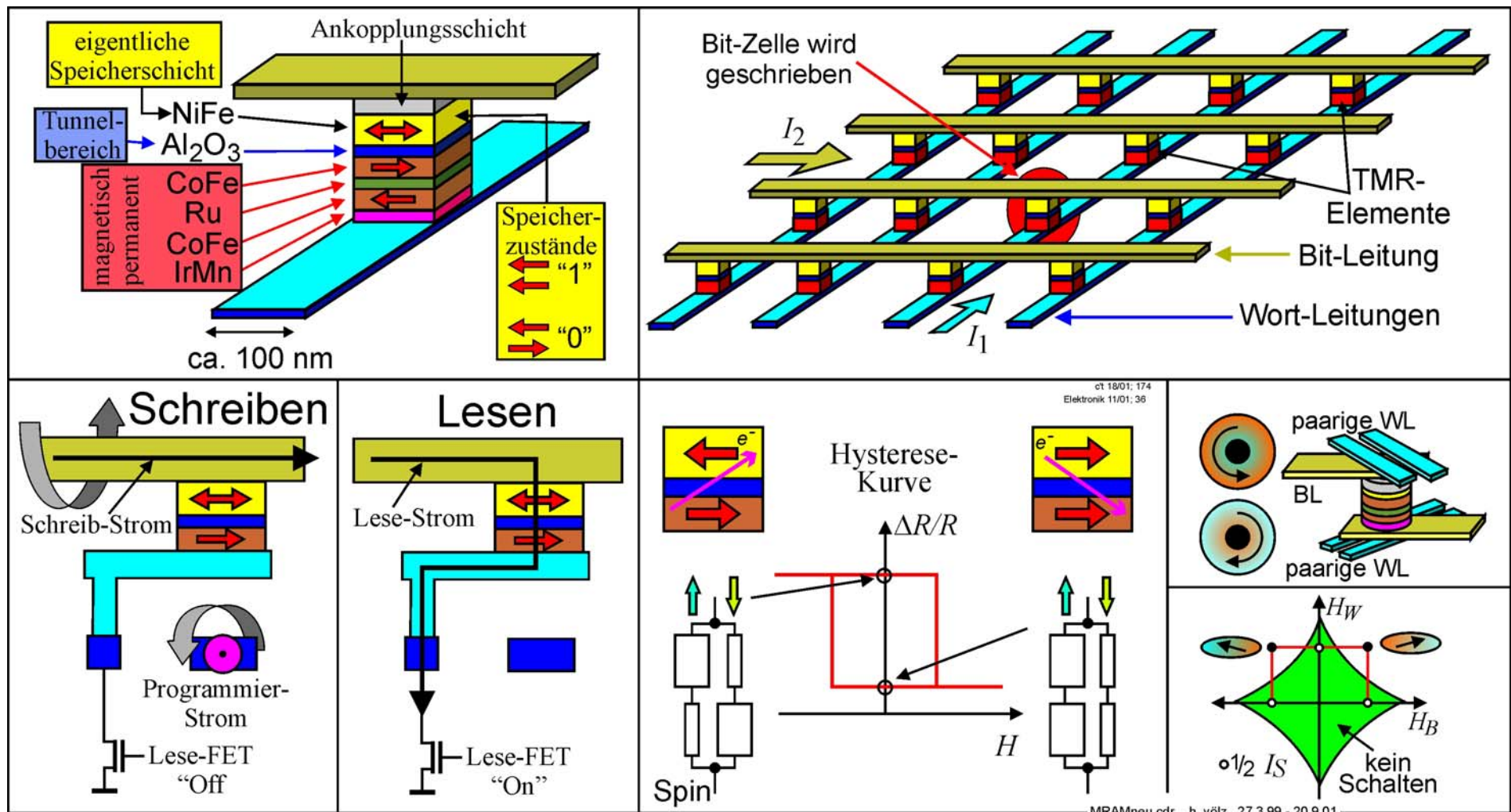
Für Spin-Änderung müssen Magnetschichten ***nm-dünn***, ähnlich weit entfernt und ***entkoppelt*** sein
Es muss mittlere ***freie Weglänge*** (2 - 5 nm) der Leitungselektronen unterschritten wird
Sonst würden Stoßprozesse Spin-Orientierung zur Gleichverteilung umkehren können
Aber Abstand so groß, dass magnetische ***Austauschkopplung entfällt***, sonst nicht frei einstellbar
Optimale Trennschicht 2 - 3 nm: sowohl Leiter ($\Rightarrow$ GMR) als auch Isolator ($\Rightarrow$ Tunneleffekt)
Der elektrische ***Strom*** wird so über ***Magnetfelder gesteuert*** $\Rightarrow$ Spin-Valve, Spin-Ventil
Der technische Aufbau verlangt noch zusätzliche Schichten

Vorteile MRAM

Schaltgeschwindigkeit < 1 ns (Randelektronik langsamer), wenig Energie
Daten bleiben auch ohne Strom erhalten, beliebig oft löschen und überschreiben
Geringer Platzbedarf: $\varnothing \approx 30$ nm, strahlungssicher, großer Temperaturbereich
Damit Strom klein bleibt, sehr kleine Zellen mit mittlerer Koerzitivfeldstärke
Leitungen dicht an den Zellen, Schreibleistung etwa 10 bis 200 pJ/Bit

Wiedergabe mehrere Effekte möglich, z. B.:

Stromdurchgang = GMR, Hall-Spannung, Tunneln, optimal über Strom an R und FET



Amorph $\Leftrightarrow$ kristallin $\Rightarrow$ PCRAM

Festkörper können u. a. kristallin oder amorph vorliegen (verschiedene Energiezustände)
Dabei besitzen sie unterschiedliche optische, elektrische, wärmeleitende usw. Eigenschaften
Bei einigen Materialien kann der Wechsel amorph $\Leftrightarrow$ kristallin wiederholt vorgenommen werden
Das Material wird in Nähe des Schmelzpunktes erhitzt und schnell $\Leftrightarrow$ langsam abgekühlt
Manchmal kann auch durch Zuführung von Energie amorph $\Rightarrow$ kristallin erfolgen

Heile **rechte Scheibe** ist wie bei Glas
üblich amorph und daher durchsichtig

Linke Scheibe ist durch Stein in einzelne
kleine Kristalle überführt und daher
„undurchsichtig“. Prinzip der
Windschutzscheibe
Zweck ist aber die Vermeidung von
scharfen Glassplittern



Geschichte

Um 1920 wurde Änderung der elektrischen Leitfähigkeit beim **Chalkogenids MoS₂** entdeckt

*griechisch **chalkós*** Kupfer, Bronze

Allgemein werden so erzbildenden Stoffe mit den Elementen O, S, Se, Te und Po bezeichnet.

In 50er Jahren begannen Arbeiten zu den halbleitenden Eigenschaften

Ab 1960 unabhängig u. a. PEARSON, SOUTHWORTH und KOLOMIEZ optische Eigenschaften

Um 1965 gewinnt **STANFORD OVSHINSKY** (*ca. 1924) wesentliche neue Erkenntnisse

1968 versucht er Widerstandsänderung amorph ↔ kristallin für elektronische Speicher zu nutzen

Ergebnisse gezeigt ROBERT NOYCE und GORDON E. MOORE, die gerade Intel gegründet hatten

1970 MOORE, D.L. NELSON und R.G. NEAL erste nichtflüchtige chalkogene Speicherzelle

Weil Intel kein Interesse zeigt, gründet OVSHINSKY für Speicher die Firma **Ovonyx**

Bald 16×16 = 256 Bit. Ø = 5 µm. 50 - 150 ns. 20 Cent/Bit = 20-mal teurer als ROM

1990 breite Anwendung bei wiederbeschreibbaren **opto-motorischen RW-Speichern**

neue, weitaus bessere Materialien gefunden → neue Ansätze für elektronische Speicher

2004 Samsung 64 MBit, 10 Jahre Garantie. Je Zelle 9 Bit = 512 Stufen

2005 Philips spezielle Form: „**Phase Change Line Memory**“ und „Line Cell Speicher“

2007 Numonyx Intel + STMicroelectronics 256-MBit mit 2 Bit/Zelle (MLC = Multi-Level Cell)

Heute und Namen

U. a. arbeiten heute Ovonic, Azalea und Intel intensiv an der Einführung solcher Speicher

Es sind **mehrere** (geschützte) **Namen** entstanden:

Glas- bzw. glasartige Speicher, weil Glas ältester amorpher Werkstoff

OUM (**o**vonics **u**nified **m**emory). Ableitung von OVSHINSKY, **o**rganic ist falsch!

Meist Ableitung aus Phasenwechsel **PRAM**, **P-RAM** oder **PCRAM** (**p**hase **c**hange)

Micron benutzt Begriff **PMC** (**p**rogrammable **m**emory **c**ell).

Wegen Chalkogenide auch **C-RAM** (chalcogenide) benutzt (Achtung! $\neq$ CAM)

OVSHINSKY hat ursprünglich Selenverbindungen und organische Gläser benutzt

Heute Gemische aus Ge, Sb (Antimon) und Te,

z. B. GeTe, dotiertes SbTe, Sb_2Te_3 , $\text{Ge}_x\text{Sb}_y\text{Te}_z$, $\text{Ge}_{1,5}\text{Sb}_2\text{Te}_4$ +12 % Leerstellen

Anfangs waren mehrere 100 mA mit 50 ns, heute einige 10 bis 100 μA von 100 ns

Betrieb und Eigenschaften

Schmelzpunkt 100 - 200 °C, darunter ist Änderung der Phase kaum noch möglich

Thermische Energie ist zu gering, um die Schwelle zwischen beiden Zuständen zu überwinden

An Grenze zur Flüssigkeit lassen sich beide Varianten erreichen = **Hysteresse-Bereich**

Für jeden Zustand gibt es **typische Zeitdauern und Temperaturen**

Hohe Temperatur + schnelle Abkühlung: keine Zeit zur Keimbildung, erstarrt sofort **amorph**

Langsame Abkühlung + etwas **niedrigere Temperatur**: Keimbildung $\Rightarrow$ **kristallin**

amorph = viele **Fehlstellen** = **niedriger Widerstand**, **kristallin keine** = **hoher Widerstand**

Widerstände mehrere Zehnerpotenzen verschieden: $R_H \approx 10^6 - 10^{12} \Omega$ und $R_N \approx 1 - 500 \Omega$

$\rightarrow$ **sehr große Störabstände**, kleinste Materialmengen genügen, mehr Bit je Zelle

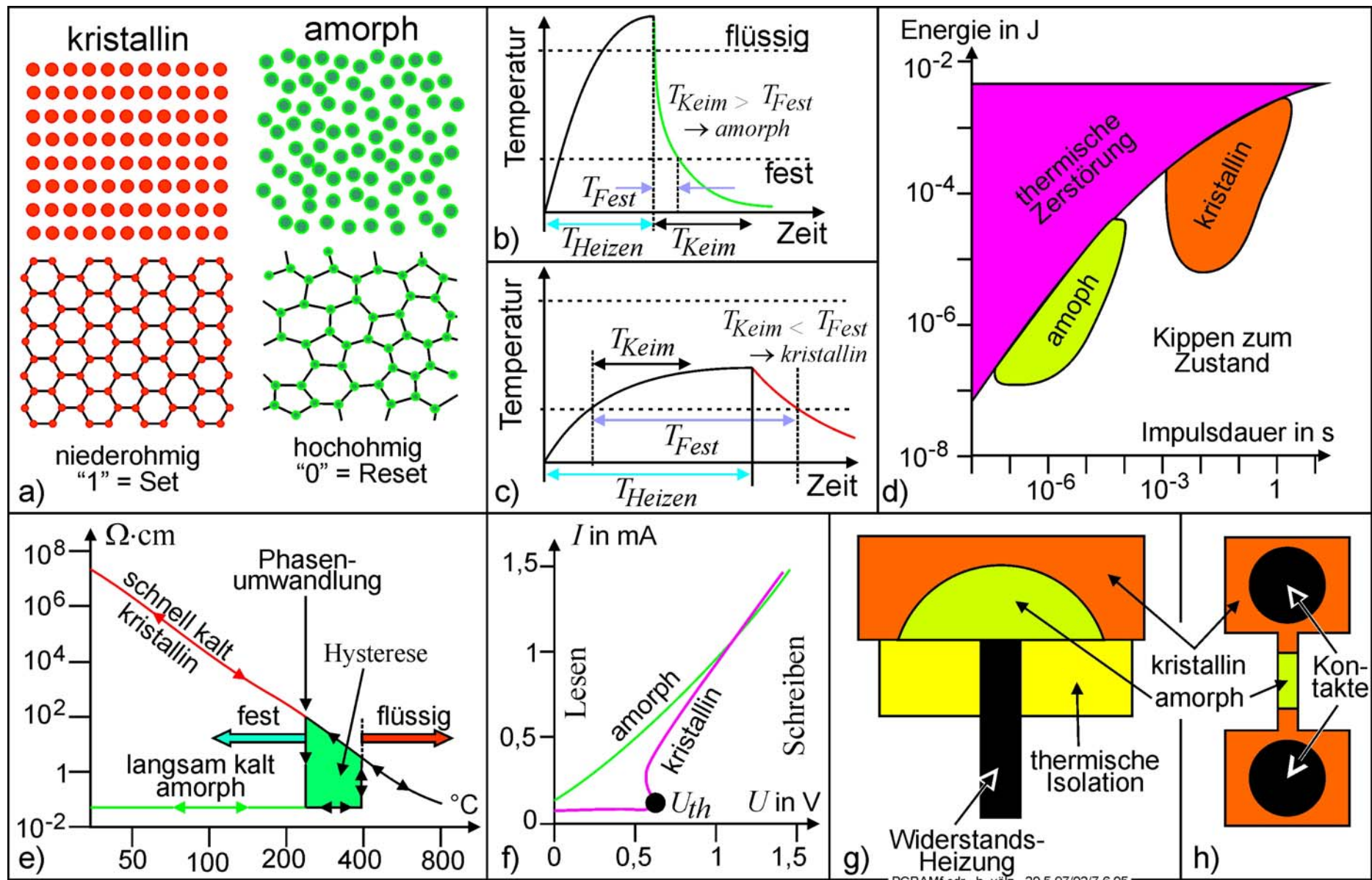
amorph mehr Volumen als kristallin $\Rightarrow$ **sehr dünne Schichten** erforderlich

Amorph höheren Energieinhalt, daher metastabil, Tendenz zum Kristallisieren

10^{14} Programmierzyklen möglich, hohe Strahlungsfestigkeit

Grenze der Speicherdichte stellt thermisches Übersprechen dar.

Jede Speicherzelle benötigt nur eine Diode, typisch $\frac{1}{3}$ der Fläche anderer Speicher



Organische RAM

Fotographie, CD-R usw. benutzen Licht als Energie verweisen aber auf **organische RAM**

Dafür sind jedoch Aufzeichnung und Wiedergabe mit **elektrischen Signalen** erforderlich

Organische Halbleiter $\Rightarrow$ OLEDs, Displays, Solarzellen, elektronischen Preisschilder usw.

1976 HIDEKI SHIRAKAWA, ALAN MACDIARMID, ALAN HEEGER: Polyacetylen mit Cl bzw. Br

oxidiert: Leitfähigkeit 10^9 -fach $\Rightarrow 10^3$ S/cm; Cu = 10^6 . **Kunststoffe erstmals keine Isolatoren.**

1998 - 2002 Skandal JAN-HENDRIK SCHÖN, gefälschte Daten zu organische Transistoren publiziert

Inzwischen ist dennoch klar, dass hier ein Potential für neue Speicher liegen könnte

2003 arbeitet **Philips** mittels Tetracen = orangegelber Kohlenwasserstoff = vier aneinander gefügte

Benzolringe, Einkristalle in dünnen Schichten auf Silizium besitzen gute Speichereigenschaften

Andere Variante: **zwischen zwei Goldkontakten** organische Moleküle bzw. Substanzen ≈ 50 nm

Elektrische Felder bewegen Orbitale zum überlappen $\Rightarrow$ Material wird dabei leitend

2007 Crossbar-Speicher 160 kBit mit organische Moleküle und Nanodrähte erprobt, $\approx 160 \mu\text{m}^2$

400 parallele Si-Nanodrähte $\rightarrow$ Monolage **Rotaxan**-Moleküle $\rightarrow$ gekreuzt 400 Ti-Nanodrähte

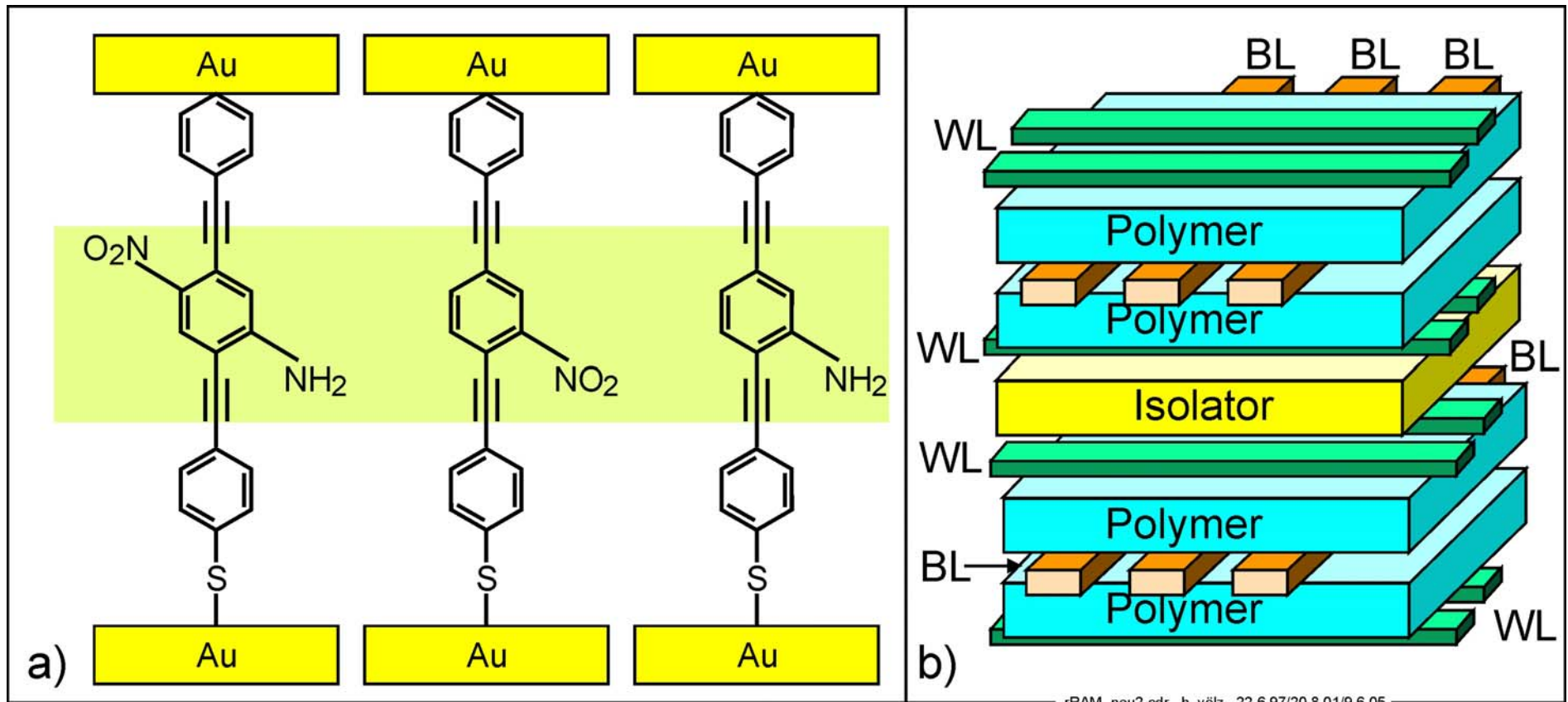
Draht-Abstand 33 nm $\rightarrow$ Speicherzelle $\approx 1000 \text{ nm}^2 \approx 100$ Moleküle = bistabiler Schalter

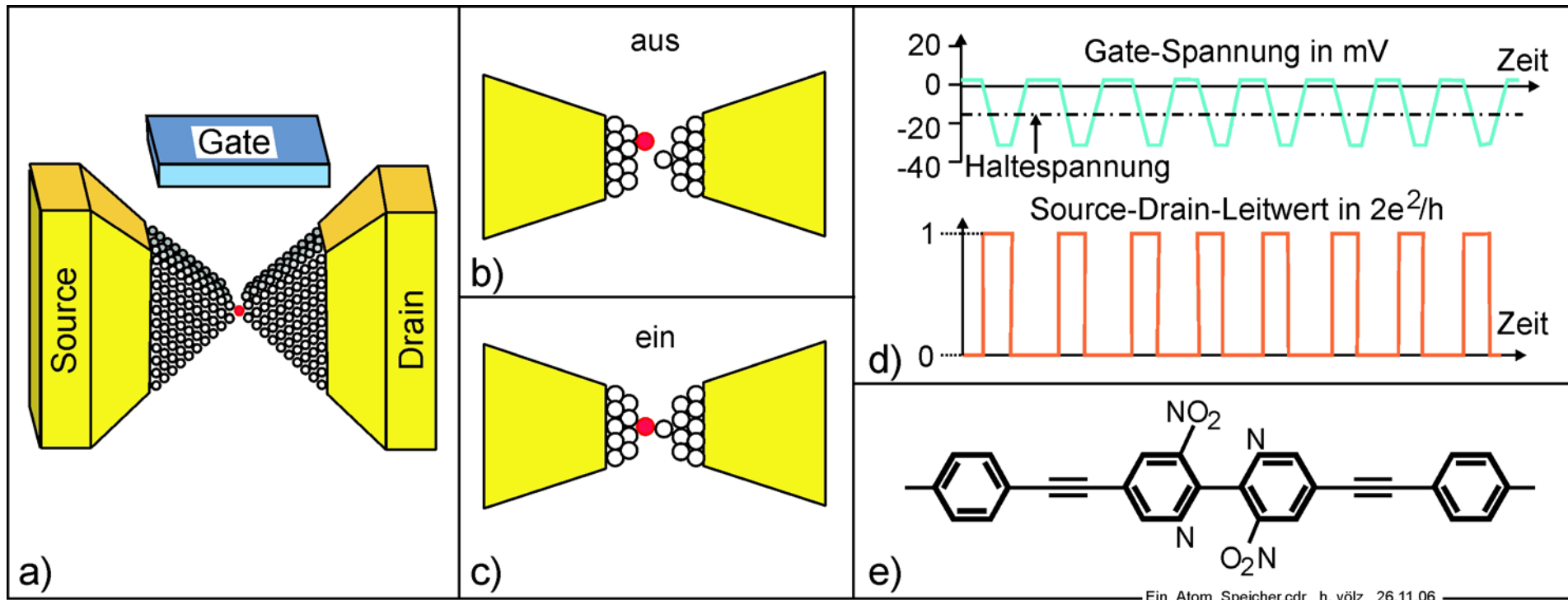
2009 Kunststoff Elektronenbeweglichkeit ($1/1000$ von Si) = modifizierte Naphthalenketten

Mit „**Tintenstrahldrucker**“ verarbeitbar $\Rightarrow$ Plastikchips als „**Wegwerfware**“ möglich

Vorteilhaft **Schichten sind mehrfach übereinander zu schichten** $\rightarrow$ Speicherkapazität

Auch DNA-Stränge in Erprobung



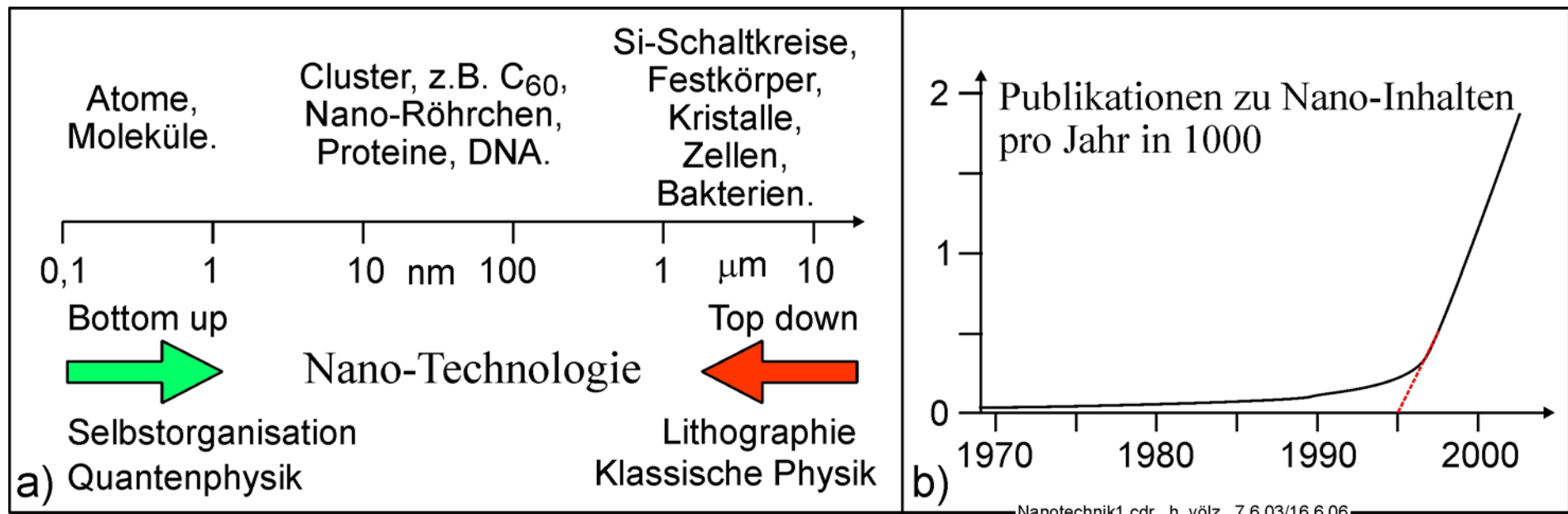


Richtungen der Nano-Technik

Der Begriff Nano-Technik wird heute inflationär verwendet, SI-Vorsatz nano = 10^{-9}
Daher ist es nützlich folgende vier Gebiete abzugrenzen

- **Nano-Elektronik** benutzt Schaltelemente, z. T. mit Quanteneffekten
1998 erstmalig **Einzel-Elektronen-Transistor** beschrieben
Häufig werden **Kohlenstoff**-Modifikationen benutzt, u. a. Fullerene, C-Röhrchen und Graphene
- **Nano-Computer** = übliche Rechentechnik, verwenden jedoch u. a. **Polymere und DNA-Stränge**
1994 LEONARD ADLEMAN (*1945) mit DNA NP-vollständiges Traveling-Salesman-Problem
Z. T. werden hier auch **Quanten-Computer** eingeordnet
- **Nano-Mechanik** = mechanische nm-Elemente, u. a. MEMS (**m**icro **e**lectro **m**echanical systems)
Meist lithographisch, z. B. kleinste bewegliche Spiegel, Motoren, Schalter, Zahnräder, Mikrofone
U. a. **Millipeds** von IBM und **Vielfach-Spiegel-Chips** für Beamer von Texas Instruments
Erprobt kleinste bistabile mechanische Schalter als Speicherelemente, jedoch zu langsam

Nicht dazugehörend Quanten-Elemente mit **QuBit**



Nanotechnik kann auf ***zwei Wegen*** geschaffen werden

- ***Top down*** mittels immer feinerer Lithografie, das Ende dürfte hier bei Linien ≈ 20 nm liegen
- ***Bottom up*** = selbststrukturiende, selbstorganisierende Methoden ähnlich der Biologie

Auf Grund der Publikationen wird der Beginn von Nano-Technik auf 1995 fest gelegt

Geschichte neuer C-Varianten

1950 Rein theoretische Untersuchungen von Graphenen durch P. R. WALLACE

1985 ROBERT FLOYD CURL (*1933), HAROLD W. KROTO (*1939) und RICHARD E. SMALLEY (*1943) zufällig **Fullerene** (Buckyball), (fußballähnliche) **60 C-Atome**

⇐ Kuppel des amerikanischen Pavillons der Weltausstellung 1967 in Montreal nach Architekt RICHARD BUCKMINSTER FULLER (1895 – 1983)

Halbe Fullerene bilden auch Abschluss bei Nano-Röhrchen

1991 synthetisierte SUMIO IIJIMA (*1939) Nanodrähte aus Kohlenstoff

= **Nano-Röhrchen** = **CNT** (carbon nano tubes), zunächst nur **Multiwall** (MW-NT) einige zig Röhrchen konzentrisch ineinander, Ø ca. 10 bis über 100 nm

2003 einlagige CNT = single wall (SW-NT) etwa 0,4 – 5 nm Ø

2004 einatomare C-Schichten = **Graphene** = Nanobänder

Nur Nano-Röhrchen und Graphene werden wahrscheinlich zu neuen Anwendungen führen

Geschichte der Nano-Röhrchen

1991 SUMIO IJIMA (*1939) synthetisiert erste **Nano-Röhrchen** = **CNT**, noch **Multiwall** (MWNT)

1996. RICHARD E. SMALLEY **Laserverfahren**: Herstellung einwandiger Kohlenstoffnanoröhren

1998 Erste **Transistoren** von S. J. TAUS, A. VERSCHNEREN und C. DEKKER

2003 *einlage CNT* = single wall (SW-NT) etwa 0,4 nm Ø

2005 Samsung: Twin-Si-Nanowire MOSFET (TSNWFET) mit zwei Nanodrähten, $r = 5$ nm

2006 einen **Gate-All-Around**-(GAA)-TSNWFET mit 2 Si-Drähten $r = 4$ nm

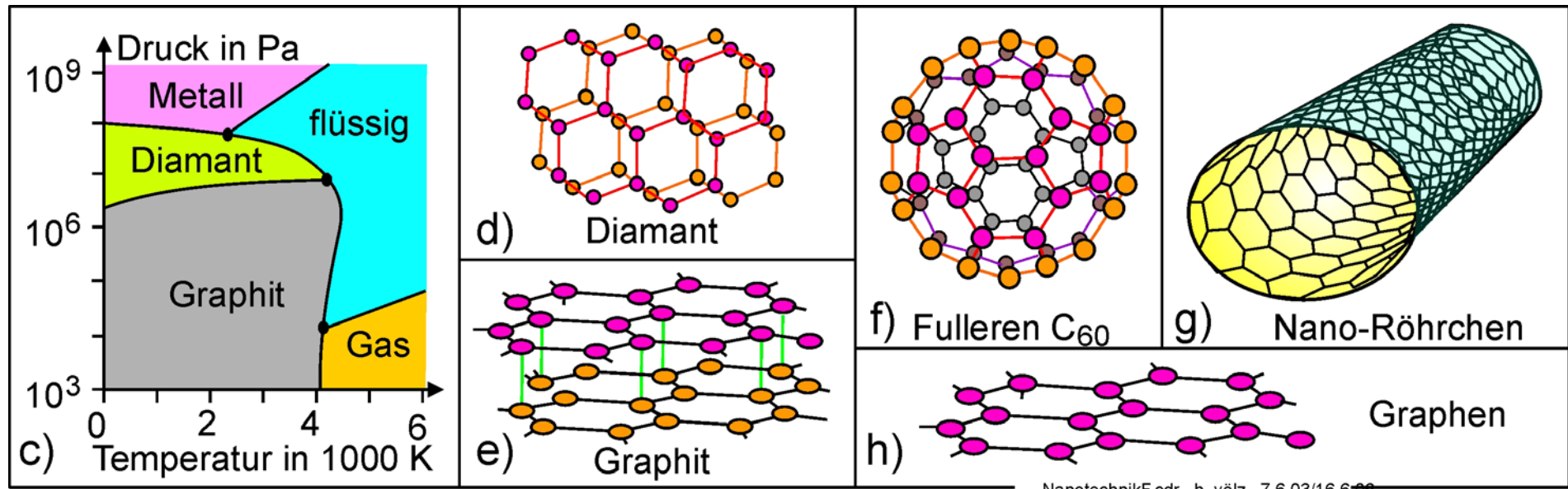
2007 CNT als künftige *elektromechanische* Datenspeicher

2007 Ge-NT für „**CrossPoint**“-Speicherzelle

2007 auch Material für *Phasenwechsel*-Speicher

Heute mehrere Verfahren zur Herstellung

Große Vielfalt und Anwendung bei anderen Stoffen, u. a. Si, GaAs, ZnO bekannt



Üblich sind bei festem Kohlenstoff die nur die beiden Modifikationen **Graphit** und **Diamant**
 Bei hohen Temperaturen und Drücken existieren **metallischer, flüssiger, gasförmiger** Kohlenstoff
 Erst in den letzten Jahrzehnten wurden **Fullerene, Nano-Röhrchen** und **Graphene** gefunden
 Sie besitzen außergewöhnliche Eigenschaften

Eigenschaften der Nano-Röhrchen

Sehr **flexibel**, **leicht** $1,3 - 1,6 \text{ g/cm}^3 \approx \text{Baumwolle}$

Zugfestigkeit $\approx 5 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ » Diamant oder übliche Carbonfasern, 20mal fester als Stahl

Beständig an Luft bis etwa 1000°C , im Vakuum bis 2800°C

Thermische Leitfähigkeit $\approx 6000 \text{ W/mK}$ (Diamant nur 2000 W/mK).

Piezoelektrische Verformung $\Delta l/l$ liegt für 1 V bei $0,11 \%$

Energielücke $E_g/V \approx 1/d$ [in nm] $\approx 0,1 - 1 \text{ eV}$, je dünner, desto größer. Bei $1 \text{ nm} \approx 0,5 \text{ eV}$

In Längsrichtung sehr hohe **Leitfähigkeit** $\approx 10^5 \text{ S/m} = 20 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2$ » Cu

freie Weglänge der Elektronen $\approx 10 \mu\text{m}$ → elektrischer Widerstand unabhängig von Länge der Röhre

Quantentheoretischer **Einströmwiderstand** $= h/4e^2 \approx 6,5 \text{ k}\Omega$

Elektronentransport „**ballistisch**“, d. h. ohne Streuung, Widerstand praktisch Null

Elektronenmobilität von $10^5 \text{ cm}^2/\text{V}$ = 200-mal höher als bei Si; bis $\approx 10 \text{ GHz}$

Strombelastbarkeit bis zu $10^{10} \text{ A/cm}^2 \approx 25 \mu\text{A}$ je Röhre; Cu schmilzt bei 10^7 A/cm^2

Einige nicht-metallische CNT zeigen **magnetisches Verhalten** $\leq -240^\circ\text{C}$

Kann theoretisch nicht erklärt werden

Könnte zu leichten und preiswerten Magneten führen

Versuchte Anwendungen

1998 erste **Transistoren** von S. J. TAUS, A. VERSCHNEREN und C. DEKKER vorgestellt

2007 Um Nano-Röhrchen isoliertes Gate gelegt, Eigenschaft ähnlich üblichem Si-FET
jedoch sehr geringem Kanalwiderstand, Schaltverhältnis $1 : 10^6$

2008. Racetrack-Speicher (IBM) = Schieberegister, Trennwänden zwischen magnet. Domänen
Bewegung als dauermagnetische Nanodrähten mit spinpolarisierten Strömen
Kopplung mit Si-Halbleitern möglich, hohe Datenrate = je Nanodraht Schreib-/Leseinheit

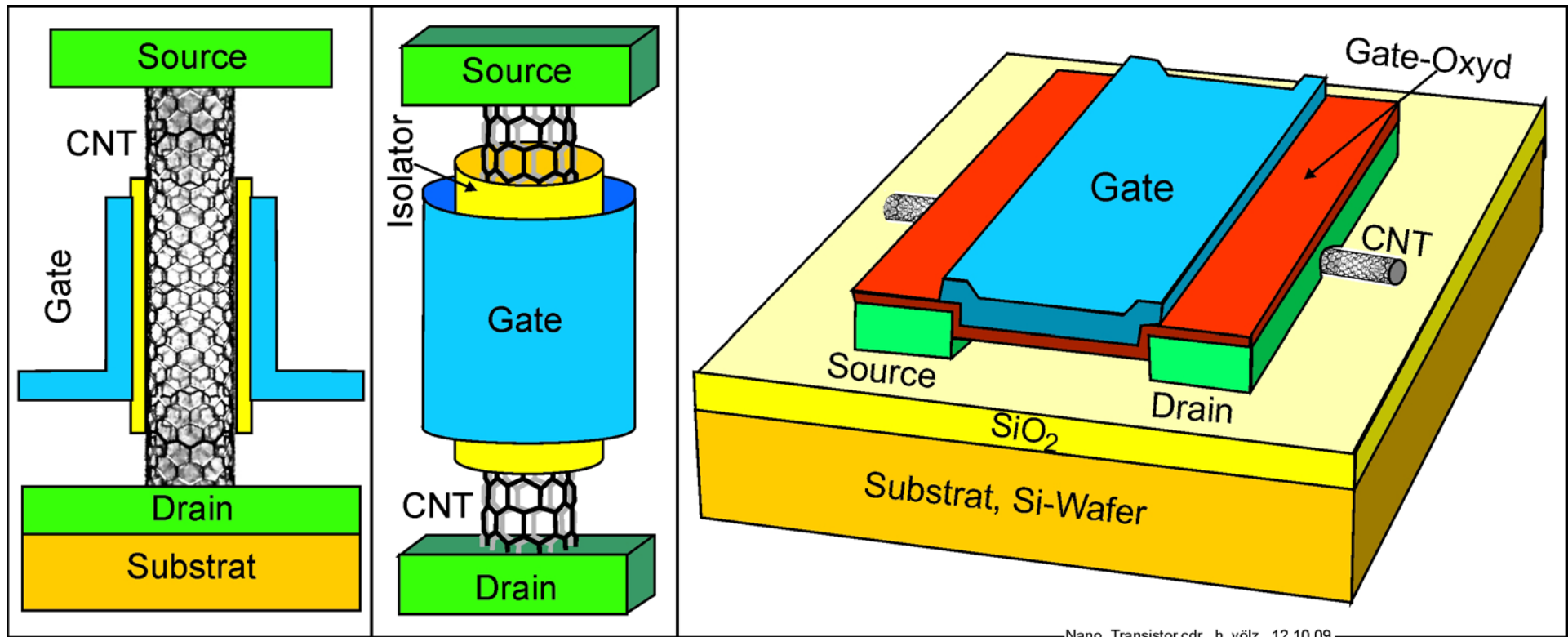
Weitere Beispiele

FET aus Zwillings-Nanodrähten $\varnothing = 2 - 3 \text{ nm}$, Gatelänge 30 nm, Gate „all around“ um Nanodraht
Schreiben bei 1 ps, Löschen bei 1 ms

Diode aus Ge-NT: „CrossPoint“ = Matrix-Adressierung, Kreuzungen: Moleküle als Speicherzellen

Elektromechanischer Datenspeicher, auf Si *Wald* aufrecht stehender Nano-Röhrchen
Elektrische *Spannung* zieht Röhrchen an, *verbiegt es*, Elektrode berührt

Feldemission bei sehr geringen Spannungen, **Kontaktierung** meist durch Gold-Elektroden



Graphene

Graphit-Bindungsenergie zwischen C-Atomen: innerhalb Schicht 4,3 eV, zwischen nur 0,07 eV
Daher der leichte Abrieb $\Rightarrow$ Bleistift, Kohlezeichnung

1950 P. R. WALLACE untersucht theoretisch einatomare C-Schichten = **Graphene** = Nanobänder

2004 ANDRE K. GEIM und KOSTYA S. NOVOSELOV isolieren Graphen auf Siliziumoxid-Substrat

C-Atome sind in einem **hexagonalen Gitter** angeordnet.

Leitungs- und Valenzband berühren sich in 6 ausgezeichneten Punkten, **direkte Übergänge**

Quanten-Hall-Effekt ist bei Raumtemperatur zu beobachten, verlangt sehr hohe Magnetfeldstärken

Schwache Spin-Bahn-Kopplung $\rightarrow$ Anwendungen in **Spintronik** möglich

Elektronen verhalten sich wie masselose Teilchen; **Flächenwiderstand** von 6 k Ω

Graphen-Schicht ist unter optischem **Mikroskop sichtbar**, **Optische Transmission** $\approx$ 80 %

Erste Anwendungen

FET = 10 nm breiter Graphen-Streifen, funktioniert wegen sehr hoher Beweglichkeit auch bei Raumtemperatur

Statt Indium als **Elektroden** (LCD), dessen weltweite Vorräte in etwa zehn Jahren erschöpft sind
vermeidet außerdem Nachteil, dass Indiumzinnoxid Sauerstoff freigibt

(neue) Systematik möglicher Arbeitsspeicher

Betrifft u. a. Art von **Aufzeichnung, Speicherzustand und Wiedergabe**

ROM (englisch **read only memory**, nur lesbarer Speicher)

Varianten PROM, EPROM, EEPROM, Flash

RAM (**r**andom **a**ccess **m**emory; *englisch **random*** zufällig, regellos; ***memory*** Erinnerung, Gedächtnis *lateinisch **accessum*** hinzukommen)

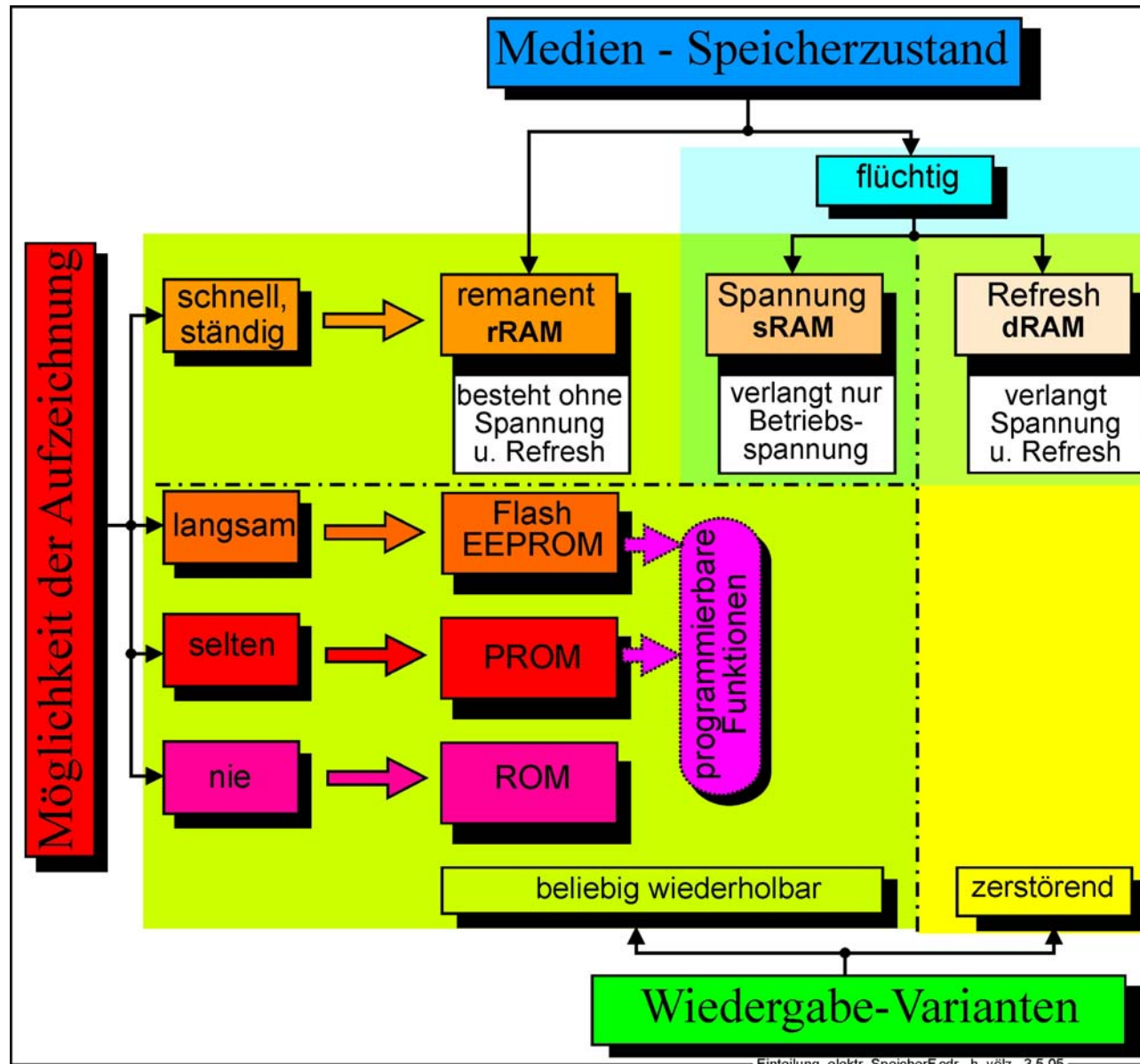
Begriff eigentlich nur historisch sinnvoll, nichts mehr mit Zufall (random) zu tun

Notwendig besondere **Oberbegriffe: kleine r, s bzw. d**, (Literatur nur üblich SRAM und DRAM)

sRAM (*griechisch **statikos*** stellend, stehend machend, wägend). Spannung zum Erhalt der Daten

dRAM (*griechisch **dynamos*** Kraft). Zeit und Wiedergabe wirken zerstörend, **refresh** notwendig

rRAM (**r**emanent; *lateinisch **re-*** zurück, wieder; ***manere*** bleiben): Daten ohne Betriebsspannung



rRAM-Typen

Die wichtigsten Varianten sind:

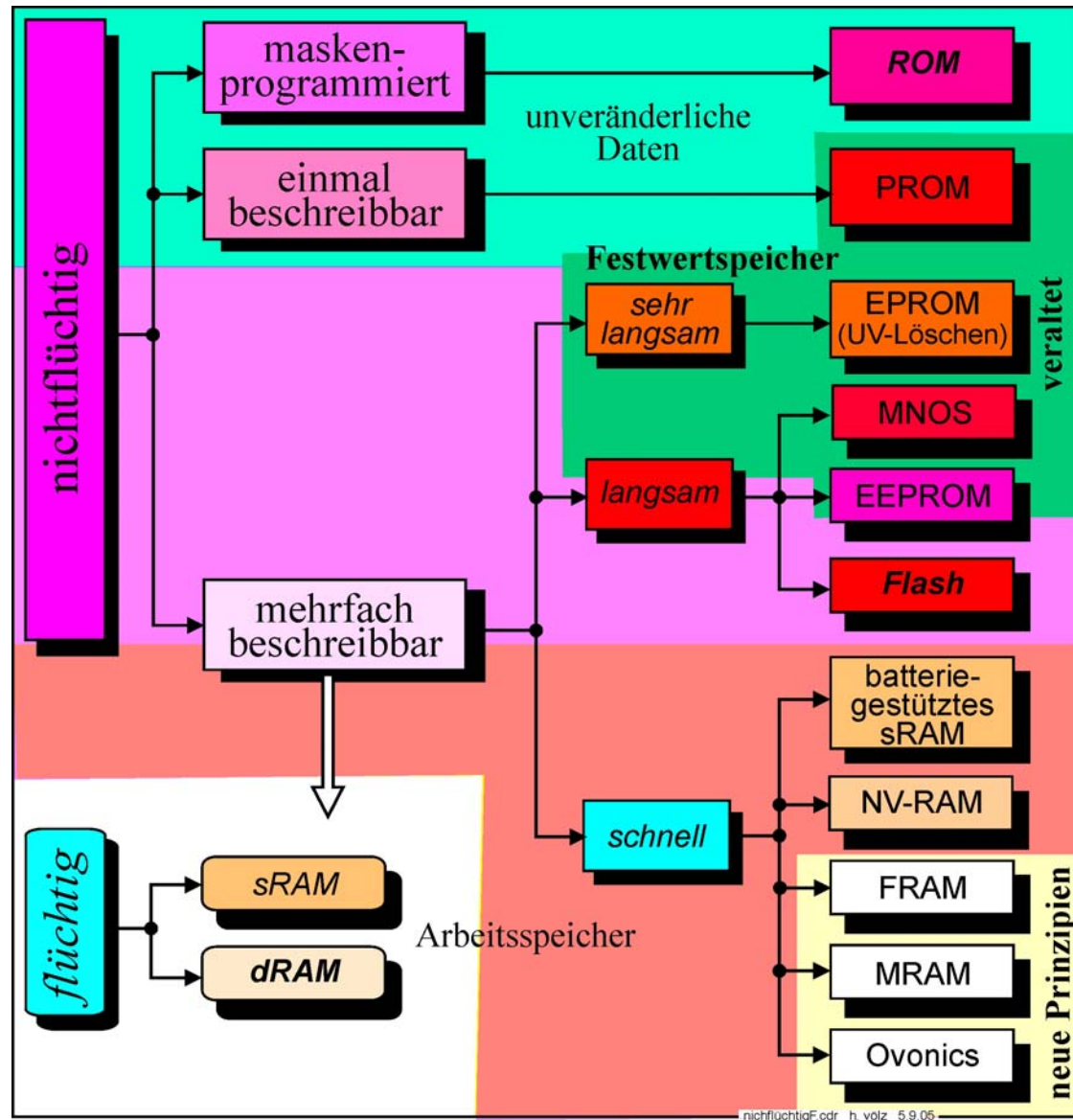
- **FRAM** = ferroelektrische Kondensatoren zur Verschiebung der FET-Schwelle arbeiten bei Aufzeichnung und Wiedergabe elektrostatisch
Name von Ramtron (1984 gegründet) geschützt. Deswegen häufig **FeRAM**
- **MRAM** magnetische Effekte; werden durch elektrischen Strom ummagnetisiert ändern quantenmechanisch ihren elektrischen Widerstand.
- **PRAM** (Phase Change) bzw. Ovonic (auch P-RAM, PC-RAM, OUM)
Umschaltung kristallin $\Leftrightarrow$ amorph durch Wärmewirkung umgeschaltet ändert elektrischen Widerstand
- **ORAM** (organische RAMs), *polymere* und *chemische* RAM
- Sehr viel später evtl. *Ein-Elektronen-, Quanten-, Nano-, Atom-* und *Molekül-Speicher*
- Mittelbar hierzu zählen auch **NV-RAM** und teilweise spannungsgepufferte **sRAM**

Vorläufiger Vergleich der (neuen) rRAM

dRAM-Preise 2008 $\approx 5 \mu\text{Cent/Bit}$, 2015 $\rightarrow 0,05$, Tendenz könnte neue Varianten unmöglich machen
 Es wird dennoch immer zu neuen rRAM-Varianten geforscht
 Wiedergabezeit bei allen, mit Ausnahme dRAM, $\approx 10 \text{ ns}$.

rot = Nachteil, Problem, **grün** = Vorteil

Forderungen [Wunschwerte]	dRAM	sRAM	Flash	FRAM	MRAM	PCRAM
Beständig ohne Energie	-	$\pm$	+	+	+	+
Aufzeichnung ohne Löschen	+	+	-	+	+	+
Zerstörungsfreies Auslesen	-	+	+	-	+	+
Neu beschreibbar [$\rightarrow \infty$]	∞	∞	10^6	10^{14}	$\rightarrow \infty$	10^{12}
Schreibleistung/Bit [$\rightarrow 0$]	0,3 mW	$\rightarrow 0$	5 mW	0,3 mW	20 mW	3 mW
Fläche ($\approx x$ -fach) [$\rightarrow 0$]	1	6	0,5	2	0,5	0,3
Zugriff Aufzeichnung [$< \text{ns}$]	$< 0,1 \mu\text{s}$	$\approx 10 \text{ ns}$	$> \mu\text{s}$	$< 0,1 \mu\text{s}$	$< 50 \text{ ns}$	$< 0,1 \mu\text{s}$



4. Holografie

Prinzip

Griechisch **holos** ganz und **gramma** Geschriebenes
Anschauliche Erklärung: Fenster zur Welt

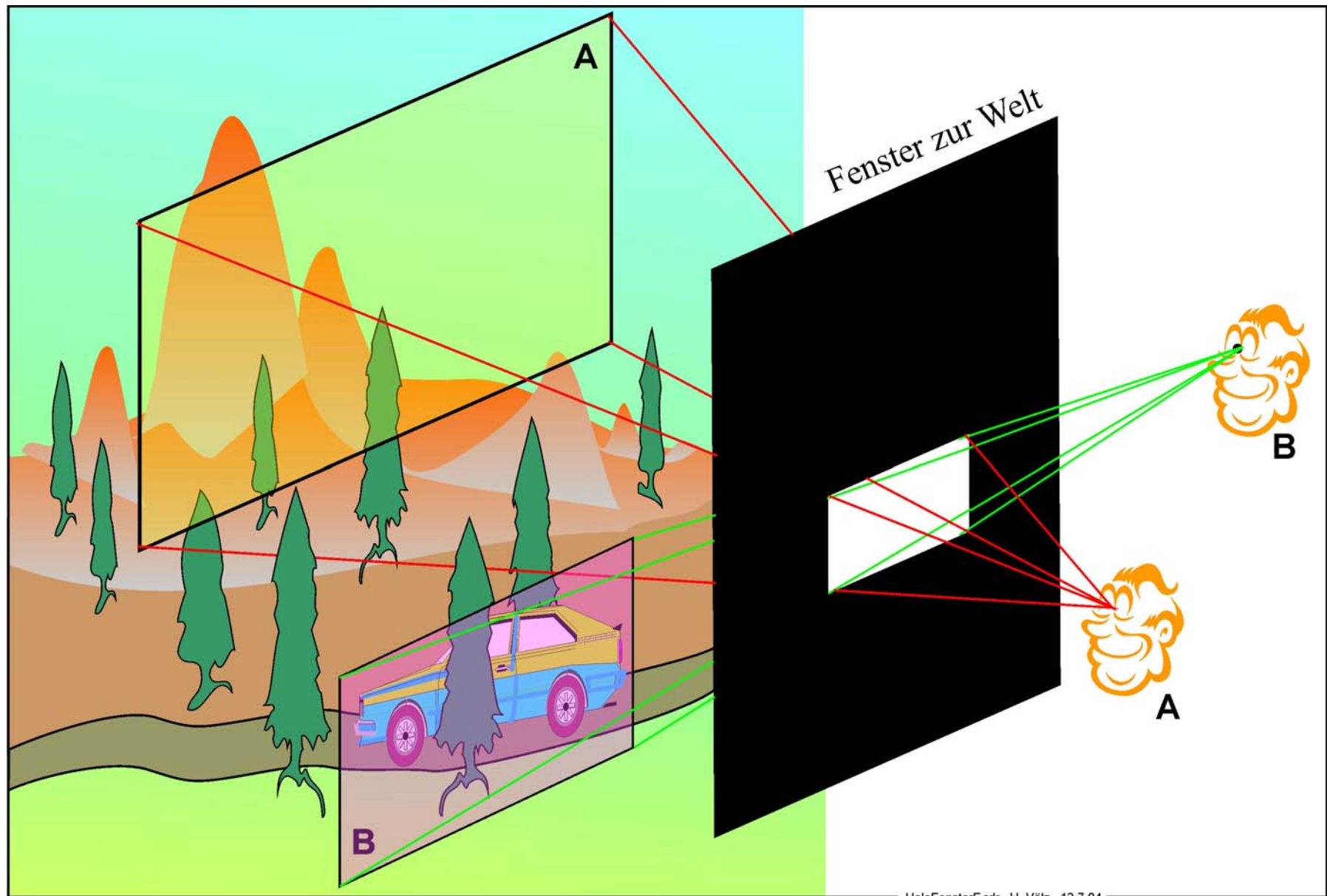
Sichtbare Ausschnitte unterschiedlich; wie dicht am Fenster, in welche Richtung hindurchschauen

Günstig **Wellenmodell** (Kugelwellen von jedem Punkt) nach CHRISTIAAN HUYGENS (1629 - 1695):

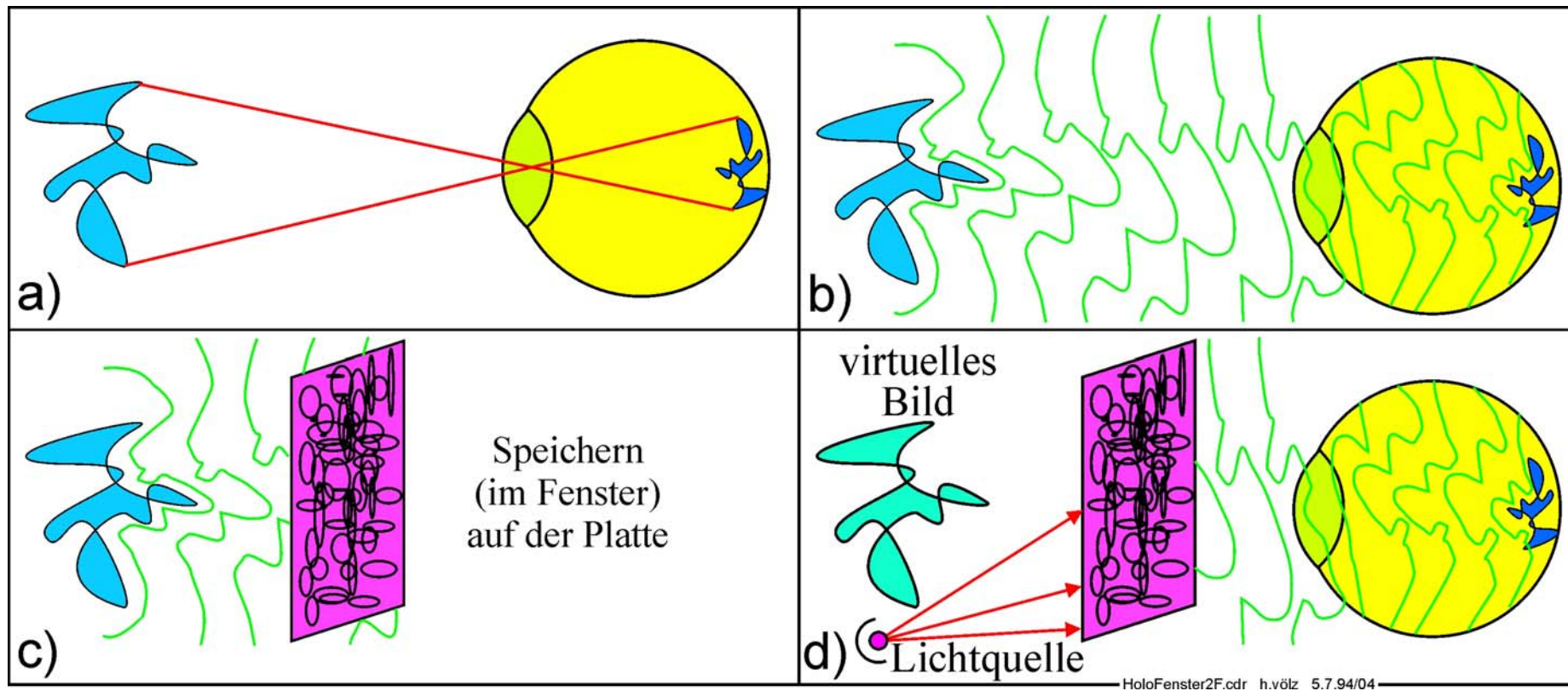
Aufzeichnung: Wellenfronten mit Phasen im Fenster einfrieren
= **Hologramm** $\Rightarrow$ **keine Ähnlichkeit** mit gesehenem Bild

Typische Frequenz jedoch 10^{15} Hz $\rightarrow$ Speicherzeit $< 10^{-15}$ s

Wiedergabe durch eine entsprechende Lichtquelle **Wellenfronten** erneut erzeugen
Ermöglicht wieder unterschiedliche Bildausschnitte durch **Blicke aus verschiedenen Richtungen**



HoloFensterF.cdr H. Völz 13.7.04



Statt der üblichen optische Abbildung (a) ist auch Modell der Wellenfront (HUYGENS) möglich
 Dann müsste bei **Aufzeichnung** Wellenbild im Speicher „eingefroren“ werden
 Für Wiedergabe genügt dann einfach Licht hinter der Wellenaufzeichnung

Leider zwei Probleme

1. Speichervorgang schneller als in 10^{-10} s, sonst Änderung der „Phase“
2. Speichermedium mit Auflösung besser als Wellenlänge $>10\,000$ Linien/mm $\approx$ wenige nm

Geschichte der Holografie

Die Geschichte der Holografie ist wesentlich durch die Entwicklung des Lasers bestimmt

Daher dauerte es ca. 15 Jahre, bis die Ideen von Gábor praktisch nutzbar wurden

Bis zur ersten Massenherstellung vergingen sogar fast 40 Jahre

Zur ersten Nutzung in der elektronischen Speichertechnik vergingen weitere 30 Jahre

1948 Ungar DENNIS GÁBOR (1900 - 1979) entwickelt in den USA die Idee der Holografie

1954 NH₃-Laser von BASOV und PROCHOROV

1960 Rubinlaser von THEODORE H. MAIMAN

1961 YURI DENISYUK experimentiert mit Weißlicht-Reflex-Volumenhologrammen

1962 GaAs-Injection-Laser von R.N. HALL und unabhängig von M. I. NATHAN

1963 PIETER J. VAN HEERDEN schlägt dreidimensionalen holographischen Speicher vor

1963 erste öffentliche Hologrammvorführung von E. N. LEITH und J. UPATNIEKS

1969 STEVE BENTON erfindet das Regenbogen-Hologramm

1970 ca. erste Versuche zur digital-holografischen Speicherung

1973 JAN RAJCHMANN demonstriert einen holographischen Speicher für Rechner

1984 11·10⁶ Exemplare, Märzheft der „Geographic“, Hologramm vom Adler von 11 × 11 cm²

1992 Softwarepiraten benutzen das Hologramm von Microsoft

2006 Beginn der HVD (**h**olographic **v**ersatile **d**isc) durch InPhase mit Bayer-Medium

Zonenlinse

= Basis der Holografie

Einzelner Lichtpunkt (=Kugelwelle) + ebenen Wellenfront gleicher Frequenz

Beide Wellen verstärken, **interferieren zeitlich anhaltend** in jedem Raumpunkt je nach ihrer Phase

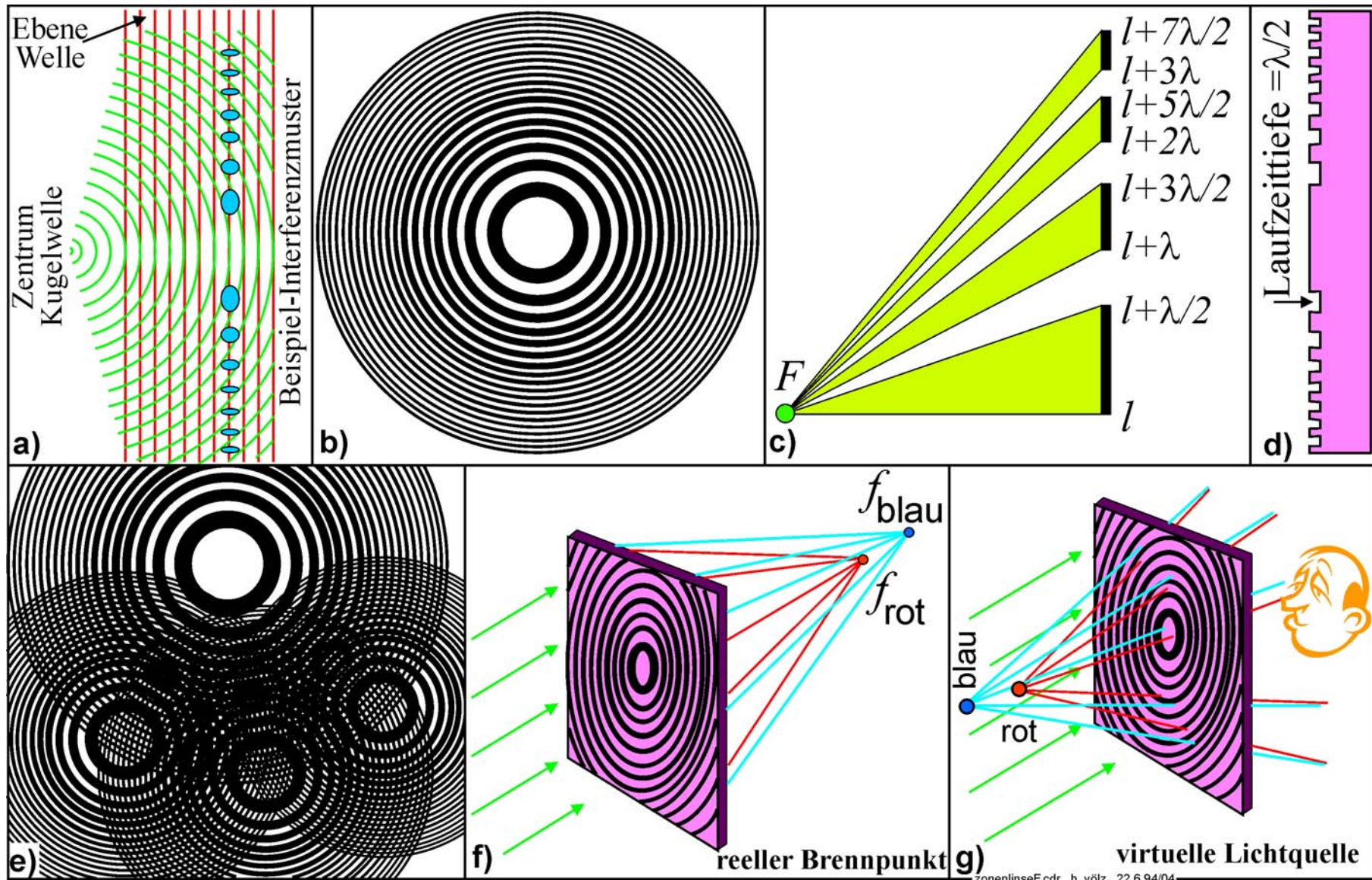
Es entsteht **FRESNELschen Zonenlinse** (AUGUSTIN JEAN FRESNEL; 1788 - 1827)

Sie kann auf einer hochauflösenden Fotoplatte aufgezeichnet werden

Bei mehreren Punktquellen überlagern sich die einzelnen Zonenlinsen

Ähnliches gilt für strahlende Oberflächen $\Rightarrow$ Hologramm

- Hinter Zonenlinse entstehen unterschiedliche Brennpunkte für verschiedenen λ entspricht **Sammellinse** mit chromatischem Fehler
- Für Beobachter hinter der Linse wirkt sie wie eine **Zerstreuungslinse**
- Konstanter Abstand der Kreise bewirkt starke chromatische Fehler
- Vorteil: für alle elektromagnetischen Wellen, auch RÖNTGENstrahlen geeignet
- Sind mechanisch **schwer herzustellen**, Ringe durch radiale Streben verbinden
- Nachteil nur die Hälfte des Lichtes genutzt werden kann
- Später **lichtdurchlässiges Material** (z. B. Fotolack) mit $\lambda/2$ **Tiefe** $\rightarrow$ Durchtritt Interferenz ermöglicht Pressung wie bei CD, DVD (**Phasen-Hologramm**) mit Lichtgewinn



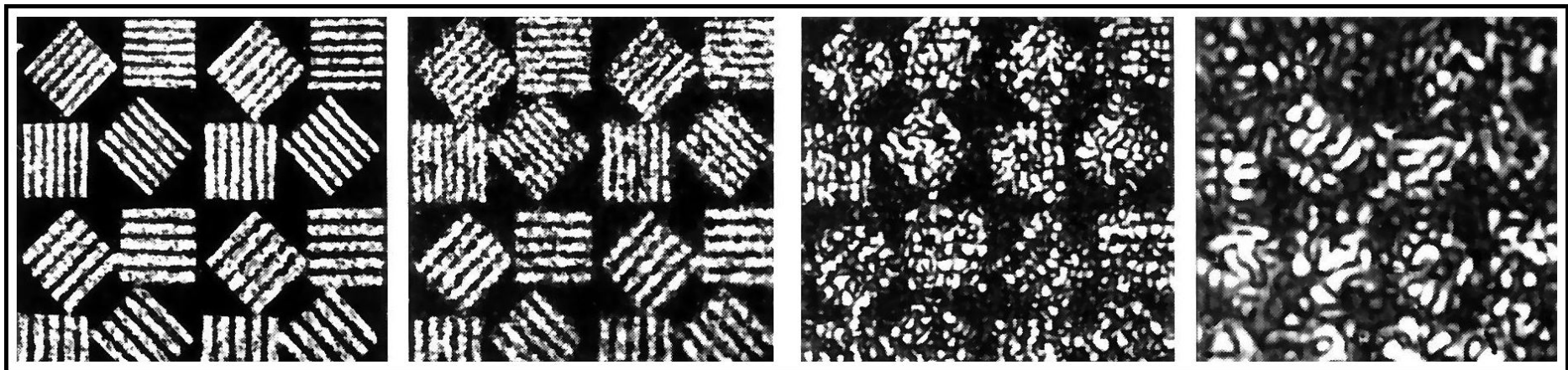
Teilbarkeit von Hologrammen

Eigentlich sind *Zonenlinsen bis ins Unendliche* ausgedehnt

Für ihre Wirkung genügen jedoch bereits die *etwa zehn* ersten Ringe und Teile weiterer

Doch je weniger Ringe vorhanden sind, desto *unschärfer* wird das Hologramm

Jedes Bruchstück eines Hologramms enthält zwar das nahezu vollständige Bild, jedoch unschärfer



Von links nach rechts verkleinert sich die Fläche auf $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{16}$ und $\frac{1}{100}$ des linken Bildes

Erste Hologramme

Ab 1948 DENNIS GÁBOR (1900 - 1979) *Geradeaus-* = *In-Line-Holografie* für durchsichtige Objekte

Der Betrachter durch die ihm gegenüberliegende helle Laserbeleuchtung geblendet

Später *schräge Beleuchtung*, die bald den BREWSTER-Winkel mit Totalreflexion nutzt
= *Off-Axis-*, *Off-Line-*, *Seitenband-* oder *Trägerfrequenz-Holografie*.

Weil Licht durch Fotoplatte = Transmission (*lateinisch **transmissio*** Übersendung, Übertragung)

Transmissions-Hologramme werden folglich von „hinten“ beleuchtet

Erst sehr viel später Reflex-Hologramme

Photoplatte wegen sehr hoher Auflösung sehr unempfindlich

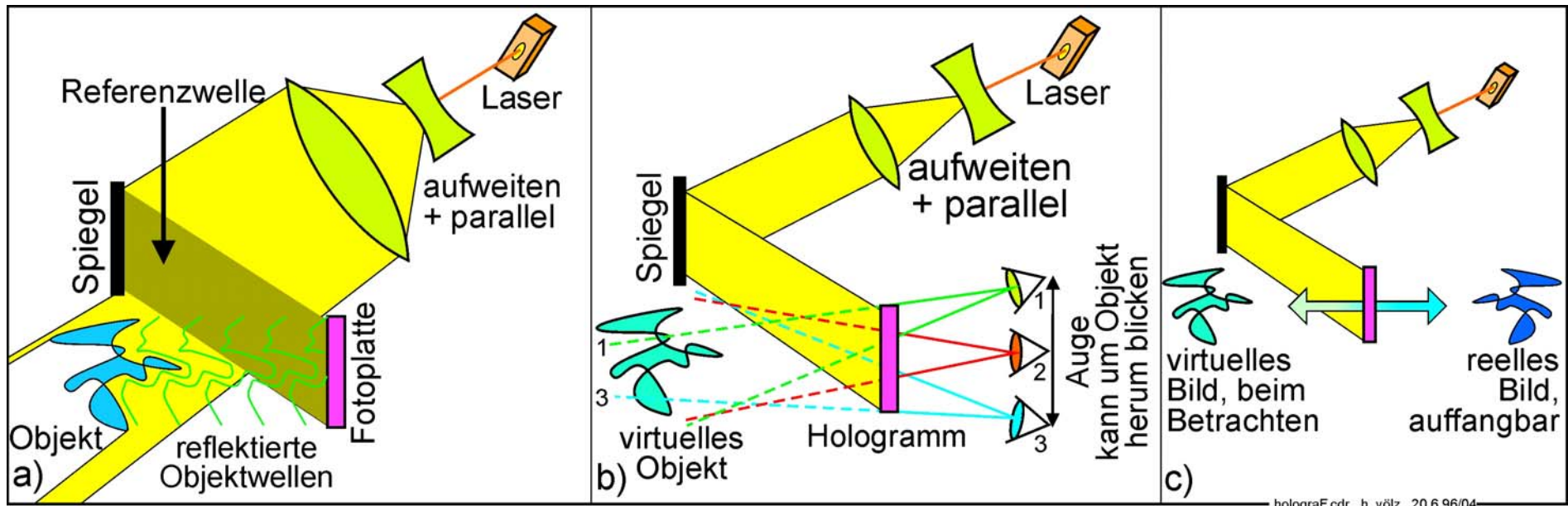
Belichtung dauert **Stunden**, erfordert extrem hohe **mechanische, thermische**, Feuchte-Stabilität

Vorteil des reellen Bildes für die Herstellung von Kopien

$\lambda/4$ -Tiefe (bei Reflex-Hologramm) ermöglicht zusätzlich Massenkopien per Stempel

Nachteil dann besonders stark genaue Einhaltung der Wellenlänge

Vorteil aller Holografie alles scharf abgebildet: **Schärfentiefe** $\rightarrow \infty \Rightarrow$ Hologramm-Mikroskopie



Die sind nur die Grundprinzipien, es entstehen sehr viele Varianten, u. a.:

- Mehrere virtuelle **Lichtquellen** (teiltransparente Spiegel) von dem einen Laser
- Überlagerte **Mehrfachbilder**, z. T. aus verschiedenen Richtungen
- Reflex-Hologramme** durch Umkehrung der Beleuchtung, Referenzstrahl von hinten
- Räumliche Hologramme** = Fotoplatte um Objekt herum
- Mehrfarbige** Hologramme mehrerer Laser unterschiedlicher Farbe
- Viele **technische Anwendungen**

Regenbogen-Hologramm

1969 entstand durch STEVE BENTON eine **künstlerisch nutzbare Display-Holografie**
Vom vollständigen Hologramm nur ein **schmaler horizontaler Streifen**, durch Spalt ausgewählt
Von ihm wird jedoch eine „**ganzflächige**“ **Kopie** angefertigt

Das sichtbare virtuelle Bild entspricht dann auch nur diesem schmalen Streifen
Es kann also nur **unterschiedlich seitlich**, aber **nicht in unterschiedlicher Höhe** betrachtet werden

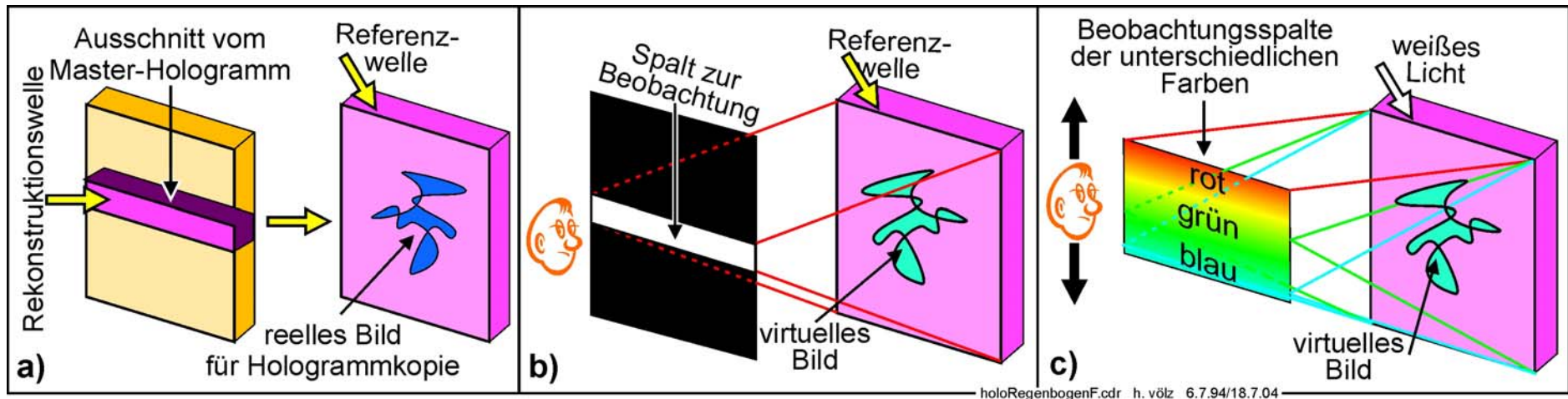
Nachteil: vom Objekt räumliche „**Höhen**“-**Informationen verloren**

Vorteil: Hologrammkopie kann **mit weißem Licht** beleuchtet werden

Aber: virtuelles Bild erscheint in verschiedenen „Höhen“ unterschiedlich **farbig (Regenbogen)**

Optimale Streifenbreite für Masterhologramm = mittlerer Pupillenöffnung, ≈ 4 mm

Mehrfachhologramme sind weiterhin möglich



Vom Master-Holgramm wird nur ein schmaler horizontaler Streifen kopiert

Für Hologramm bleibt dadurch nur die seitliche Bewegungsfreiheit erhalten

Bei der Wiedergabe mit weißem Licht entstehen so in unterschiedlicher Höhe eingefärbte Bilder

Daher der Name Regenbogen-Hologramm

Zusätzliche Anwendungen

Messtechnik: durch *Mehrfachbelichtungen* u.a. **Nachweis** von μm -Änderungen:
Abnutzung, Druck-Zug Belastungen usw. = *Hologramm-Interferometrie*

Zeichenerkennung: Auf Kleinst-Hologramm sei z. B. Buchstabe **E** gespeichert,
Text wird abgebildet und mit Kleinst-Hologramm als Filter betrachte
Es werden dann alle Orte deutlich hervorgehoben, wo ein **E** steht
Größe oder Drehung des jeweiligen **E** sind unwesentlich
Schriftfont geht ein: ähnliche Zeichen, wie **E**, **E**, **E**, **E**, **E**, usw. werden etwas weniger hervorgehoben
Teilweise werden auch **F**, **L**, **Σ** , **Γ** , **Z**, **[**, **T**, **$\perp$** usw. etwas sichtbar
Großer Vorteil bei ***Suche nach komplexen Strukturen und Gebilden***

Schallanalyse: bei Ultraschall überlagert sich Referenzwelle mit Reflexion vom Objekt
Entstehenden Schalldruckknoten werden mit einem bewegten Mikrophon gescannt, aufgezeichnet
Es ergibt sich ein „Hologramm“, das optisch betrachtet werden kann, Aussagen über Schallquellen

Synthetische Hologramme z. B. für Röntgenstrahlen, Mikrowellen usw.

Holografisch-optische Elemente (HOE) sind keine eigentlichen Hologramme
Beeinflussen Lichtstrahlen auf ungewöhnliche Weise, z. B. Linsen mit chromatischer Korrektur

Holografische Datenspeicher

Seit den 60er Jahren bekannt, etwa 3 Forschungsinstitute entwickeln Technik weiter
Erlauben extrem hohe Speicherdichte, -kapazität und Datenrate
Wichtig sind diskrete Lichtablenkungen, Problem vor allem passendes Speichermaterial

Lichtablenkung durch ***Drehung der Polarisationsebene*** und ***anisotrope Prismen***

1875 **KERR-Zelle** von JOHN KERR (1824 – 1907) elektrisches Feld dreht Polarisations-Ebene

Anisotropes Prisma lenkt Strahl je nach Polarisation in unterschiedliche Richtung ab

= Unterschied von ***ordentlichem*** $\Leftrightarrow$ ***außerordentlichem Strahl***

Durch Kombination von ***n KERR-Zellen*** und ***n Prismen*** lassen sich so ***2ⁿ Positionen*** ansteuern

Im Labor mit 2×10 Baugruppen $2^{20} = 1\,048\,576$ ***diskrete Positionen*** (x-, y-Richtung)

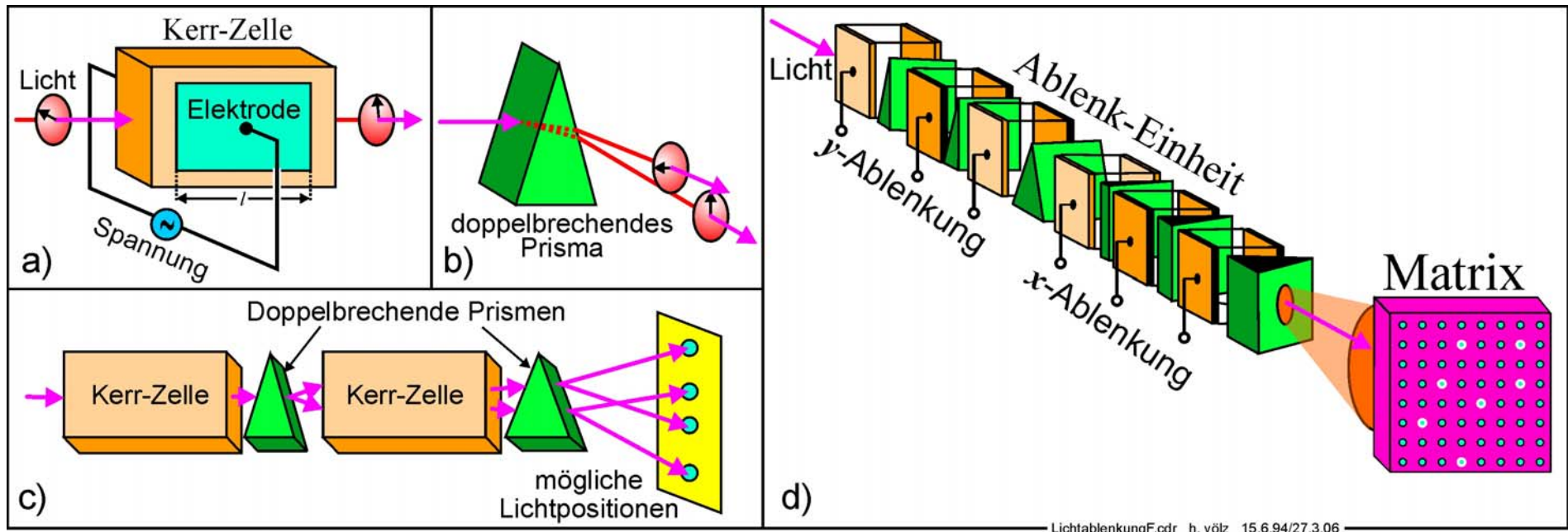
An jedem Ort sind mehrere Hologramm aufzuzeichnen, Richtung und Wellenlänge

Typische Labordaten:

10^6 Speicherorte, 10^6 Pixel, 10^3 Winkel $\approx 10^{15}$ Bit ≈ 100 TByte auf etwa 1 cm^3 auswechselbar

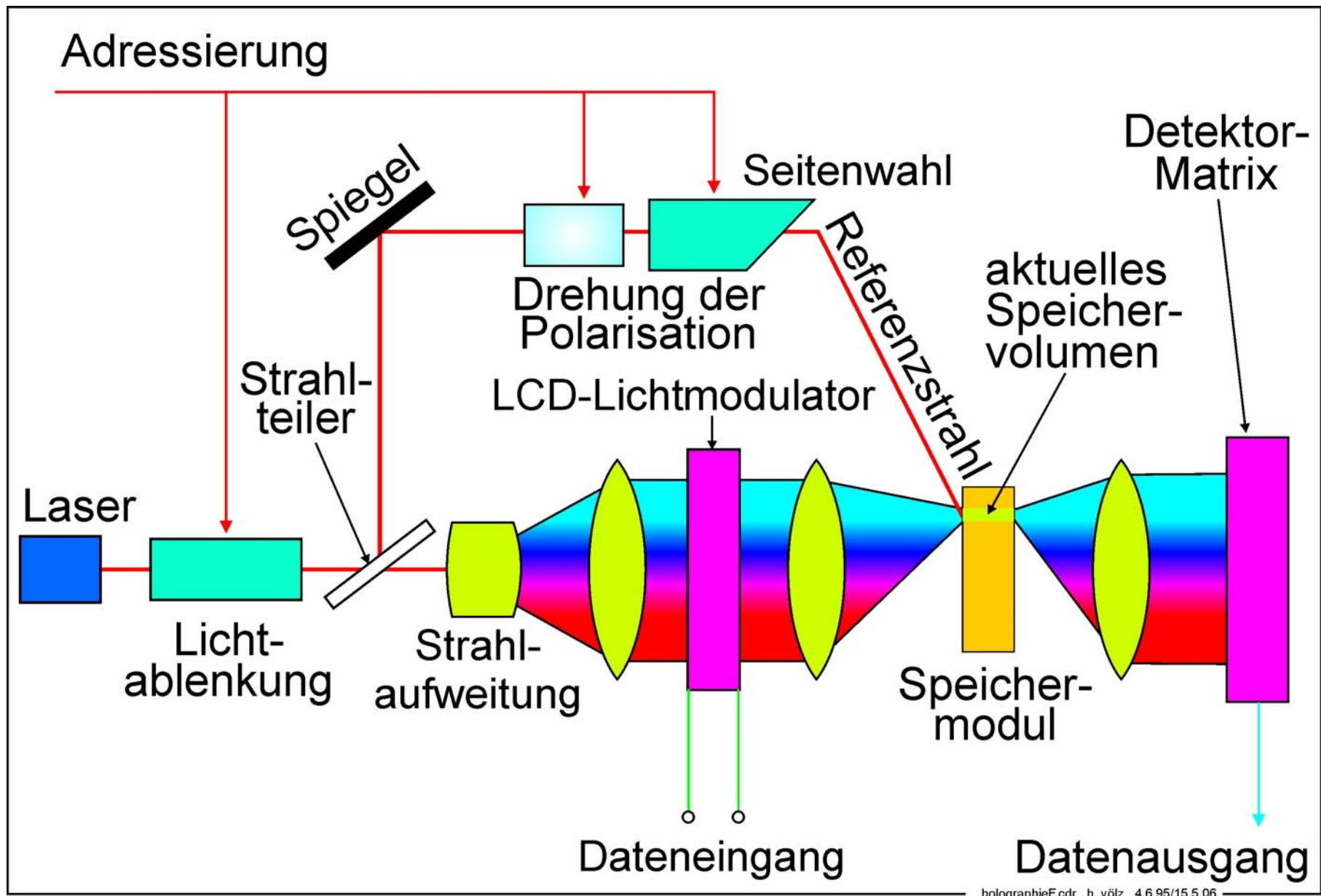
Datenrate liegt bei 10^{12} Bit/s = 1 TBit/s

Probleme bestehen hauptsächlich immer noch im geeigneten Speichermaterial



LichtablenkungF.cdr h. vözl 15.6.94/27.3.06

Die KERR-Zelle dreht proportional zur Spannung die Richtung der Polarisierung
 Das doppelbrechende Prisma lenkt den Lichtstrahl je nach Polarisierung unterschiedlich ab
 Durch Reihenschaltung beider Bauteile werden verschiedene diskrete Orte erreicht
 $3 + 3$ Einheiten ermöglichen $2^3 \times 2^3 = 8 \times 8 = 64$ diskrete Orte anzusteuern



HVD (holographic versatile disc)

Erste Spezifikationen 2004. weitere Firmen schlossen sich 2005 an
Wegen vieler holographischer Aktivitäten 2004 Industrievereinigung **ECMA- Komitee** gegründet
U. a. Canon, Fujitsu, IBM, Intel, Microsoft, Panasonic, Sony und Toshiba.

Speichermaterial

(wahrscheinlich) **Kunststoff** der **Bayer-Material-Science AG**, liegt seit Ende der 90er Jahre vor
Er besteht aus zigarren-artigen Molekülen, die durch „Bänder“ verbunden sind

Gelöscht sind alle „Zigarren“ gleich ausgerichtet

Aufzeichnung: Laser-Erwärmung, Moleküle nehmen immer stärker statistische Ausrichtungen an

Wiedergabe: je nach Molekülrichtungen, linear polarisiertes Licht absorbiert ≥ 64 Graustufen

Platte $\varnothing = 120$ mm, Kapazität ≈ 4 TByte, Transferrate ≈ 1 GBit/s, schrittschaltend

Blau-grüner Schreib-Lese-Laser (532 nm) + **roter** Positionierungs- = Adressierungs-Laser (650 nm)

Blau-grüner Strahl für Hologramm aus gleicher Richtung auf die Polymer-Schicht

Darunter liegende **dichroitische Schicht** reflektiert gut blau-grünes Licht, lässt rotes passieren

Rotes Licht gelangt zu den **tiefer liegende Pits** (Al) mit Sektor-, Kopf- und Segment-Informationen

Organisation $\approx$ Festsplatte, ermöglicht schnelle Adressierung

Information mit **Digital Mirror Device** (DMD), ähnlich den DLP-Projektoren aufzeichnen

Technik sollte 2007 marktreif sein, Recorder $\approx 10\,000$ \$, Leselaufwerke $\approx 2\,000$ \$. Platten ≈ 150 \$

Literatur

- Ernst, B.: Holografie - Zaubern mit Licht. Wittig-Fachbuch, Hückelhoven 1986/7
- Heiß, P.: Die neue Holografie-Fibel. 4. Aufl. Wittig-Fachbuch, Hückehofen 1995
- Hiebel, H. H.: Kleine Medienchronik. C. H. Beck'scher Verlagsbuchhandlung. München 1997
- Hilberg, W.: Assoziative Gedächtnisstrukturen - Funktionale Komplexität. R. Oldenbourg München 1984
- Hilberg, W.: Die texturale Sprachmaschine als Gegenpol zum Computer. Verlag Sprache und Technik, Groß - Biebrau, 1990
- Hoagland, A. S.: Trends and projections in magnetic recording storage on particulate media IEEE Trans Mag. 16, No. 1 Januar 1980 S. 26 - 29
- Leon Chua: Memristor, the Missing Circuit Element, IEEE Transactions on Circuit Theory 1971, CT-18 (5) S.507 - 519
- Lerner, A.: Grundzüge der Kybernetik. Verlag Technik, Berlin 1970
- McLuhan, M.: Die Gutenberg-Galaxis. Econ, Düsseldorf - Wien 1968
- Ostrowski, J. I.: Holografie - Grundlagen, Experimente und Anwendungen. Harri Deutsch, Thun - Frankfurt/M. 1989
- Völz, H.: Betrachtungen zum Zusammenhang von Speicherdichte und Zugriffszeit. Wiss. Zeitschrift f. Elektrotechnik 9 (1967) 2, 95 - 107
- Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information
Bd. 1 Grundlagen und Anwendung in Natur, Leben und Gesellschaft. Shaker Verlag, Aachen 2003
Bd. 2 Technik und Geschichte vorelektronischer Medien. Shaker Verlag, Aachen 2005
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
- * Letzten 4 auf CD: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007
- Wersig, G.: Informations- und Kommunikationstechnologien. UVK - Medien. Konstanz 2000
- Viele Details, Ergänzungen enthalten PDF meiner Speichervorlesungen TU-Berlin ⇒ Liste: aes.cs.tu-berlin.de/voelz/PDF