

Magnetische Speicher

Alle Elemente, Materialien usw. besitzen **physikalische Eigenschaften**, wie Masse, Dichte, Leitfähigkeit usw. Der Magnetismus tritt dagegen makroskopisch nur bei sehr **wenigen Stoffen**, vor allem bei **Eisen, Nickel und Kobalt** auf. Die meist vorhandene **Hysterese** ermöglicht die Speicherung ohne externe Energiezufuhr. Außerdem ist die **Aufzeichnung beliebig oft ohne Materialschädigung** wiederholbar. Leider ist aber Magnetismus ein kompliziertes physikalisches Phänomen, das nur **quantenphysikalisch** erklärt werden kann. Bereits ein einzelner Wasserstoffatom besitzt entsprechend dem Bohrschen Komplementaritäts- bzw. Korrespondenzprinzip) **drei Spinvektoren**, der Rotation des Atomkerns und des Elektrons sowie der Bewegung des Elektrons auf der Bahn um den Atomkern.

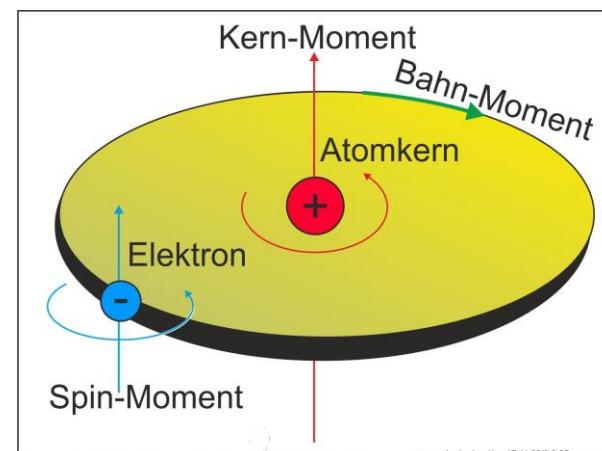
Beim Elektronenspin gibt es zusätzlich die zwei Varianten von **spin up** (\uparrow) und **spin down** (\downarrow). Sie sind auf den Kernspin bezogen und können gemäß dem Korrespondenzprinzip auch als links bzw. rechts rotierend betrachtet werden. Alle Spins bewirken magnetische Momente. Bei den chemischen Elementen mit der **Ordnungszahl Z** besteht der Atomkern aus **Z Protonen**. Ihre gegenseitige

Abstoßung wird durch einen „Kitt“ aus $X \geq Z$ Neutronen beseitigt. Gegenüber der Umwelt wird die positive Ladung der Protonen durch Z Elektronen aufgehoben. Sie bewegen sich dabei entsprechend der Hauptquantenzahl n in den Schalen K, L, M usw. In **jeder Schale kreisen Elektronen** auf Kreis- bzw. **Ellipsen-Bahnen** gemäß den **Nebenquantenzahlen l** , die auch Drehimpulsquantenzahl heißen:

1 = s (sharp); 2 = p (principal); 3 = d (diffuse) und 4 = f (fundamental) usw. Durch das Pauli-Verbot ist die Anzahl der Elektronen in jeder Schale gemäß der folgenden Tabelle so festgelegt, dass im Atom keine Elektronen mit gleichen Quantenzahlen vorkommen. Der Faktor $2 \times$ der Tabelle gilt infolge der beiden Elektronen-Varianten spin up (\uparrow) und spin down (\downarrow).

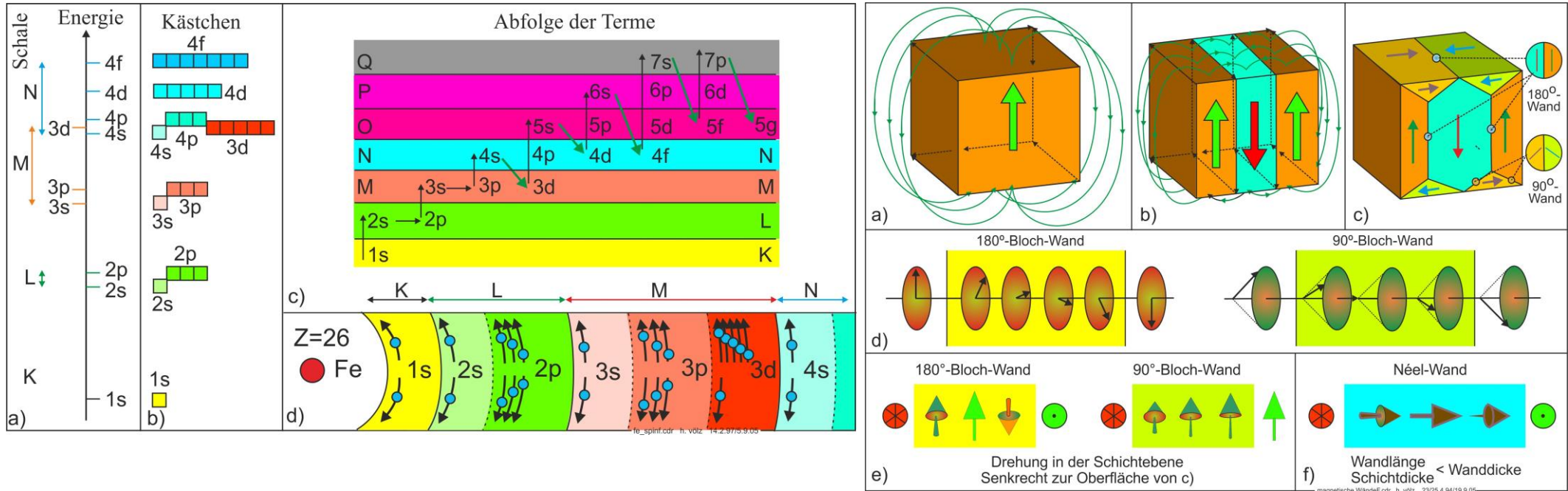
Hieraus folgt das System der Elemente nach Mendelejew. Die Erstbelegung einer Schale erfolgt immer bei den Alkalimetallen ${}^3\text{Li}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{19}\text{K}$, ${}^{37}\text{Rb}$, ${}^{55}\text{Cs}$ und ${}^{87}\text{Fr}$ (einwertige Elemente). Die Gesamtenergie eines Atoms wächst aber nicht nur mit den Hauptquantenzahlen Z . Daher wird in einigen Fällen mit der Elektronenbelegung einer Schale begonnen, bevor die darunter liegende voll aufgefüllt ist. Das ist erstmalig bei den Übergängen $3p \rightarrow 4s \rightarrow 3d$ der Fall (Bild 52a bis c). Diese „Unregelmäßigkeit“ wiederholt sich dann mehrfach und z. T sogar komplexer. Zunächst folgt

$4p \rightarrow 5s \rightarrow 4d$. Dann treten sogar teilweise „Rücksprünge“ um 2 Schalen auf $6s \rightarrow 4f \rightarrow 5p \rightarrow 6p$ und $7s \rightarrow 5f \rightarrow 6d \rightarrow 7p$. Wird so eine Schale mit Elektronen belegt bevor die darunter liegende voll aufgefüllt ist, so schirmt sie dadurch die darunter liegenden Elektronen gegenüber äußeren Einflüssen ab. In den voll gefüllten Schalen müssen immer gleichviel Elektronen mit spin up und down auftreten. Das ist dann nicht mehr notwendig. So treten dort dann Elektronen mit einem bevorzugten spin up oder spin down auf. Meist kompensieren sich alle Spins des Atoms nach außen weitgehend kompensieren,



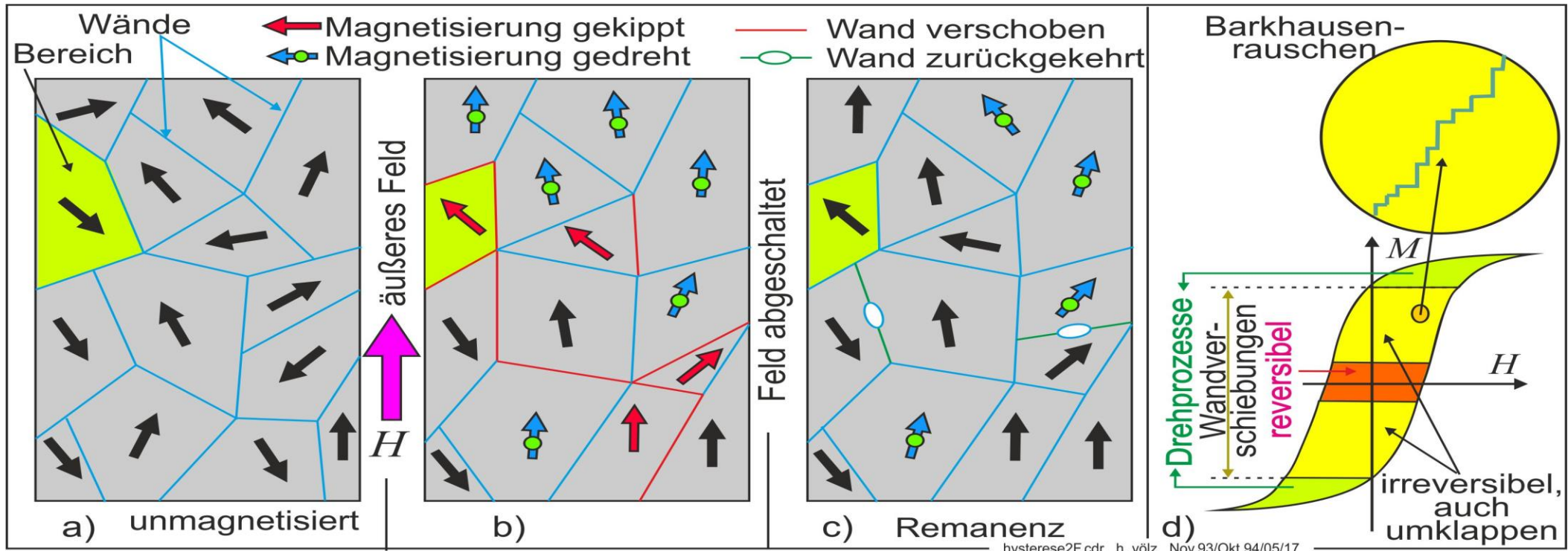
| n | Schale | maximale Elektronenzahl | Zustände |
|---|--------|---|----------------------|
| 1 | K | $2 = 2 \times 1s$ | 1s2 |
| 2 | L | $8 = 2 \times 2s + 6 \times 2p$ | 2s2, 2p6 |
| 3 | M | $18 = 2 \times 3s + 6 \times 3p + 10 \times 3d$ | 3s2, 3p6, 3d10 |
| 4 | N | $32 = \dots + 14 \times 4f$ | 4s2, 4p6, 4d10, 4f14 |
| 5 | O | $50 = \dots + 18 \times 5g$ | ... 5g18 |
| 6 | P | $72 = \dots + 22 \times 6h$ | ... 6h22 |

Magnetische Speicher



Die magnetischen Momente der Atome in einem Kristall **richten sich gemeinsam** aus. Dabei entstehen **makroskopisch große Magnetfelder** gemäß Bild a. das bewirkt auch ein beachtliches Magnetfeld in der **Umgebung**, das gesamt-energetisch ungünstig ist. Daher bilden sich im Kristall mehrere magnetisch unterschiedlich ausgerichtete Bereiche (b). Sie sind durch dünne Wände getrennt, in denen der Richtungswechsel von Atomsschicht zu Atomsschicht erfolgt. Dadurch werden die externen Magnetfelder reduziert. Das erfolgt noch verstärkt, wenn sich zusätzlich Wände ausbilden, in denen nur eine 90°-Drehung erfolgt c). Insgesamt sind daher die Wandtypen von d) bis f) möglich.

Material-Störstellen



Störstellen im Kristall fixieren die Wände und magnetische Bereiche recht unterschiedlich. An der Kristall-Oberfläche sind sie gut mit magnetischen Flüssigkeiten sichtbar zu machen (Bild a). Hier sind die magnetischen Bereiche, die **weißchen Bezirke**, so orientiert, dass sich in einiger Entfernung die Gesamt-Magnetisierung kompensiert. Ein **äußeres Magnetfeld H** bewirkt aber Kräfte. Dabei treten drei **Effekte** auf (b):

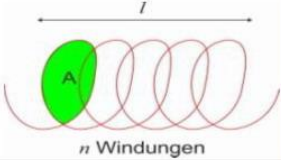

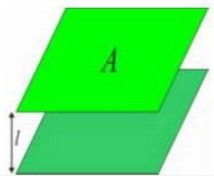
1. Das Feld eines Bereiches **dreht** sich mehr oder weniger stark in die Richtung des äußeren Feldes.
2. Eine Wand **verschiebt** sich so, dass sich ein benachbarter günstig orientierter Bereich vergrößert.
3. Der Vektor der Magnetisierung **kippt** in die entgegengesetzte Richtung.

Die Effekte (a bis c) erzeugen eine **Hysterese-Kurve** d).

Die drei Effekte treten unterschiedlich stark auf. Insbesondere in den gelb gezeigten Abschnitten überwiegen die Klappprozesse. Sie lassen sich gut hörbar machen. Elektronisch verstärkten Impulse erzeugt das Barkhausen-Rauschen.

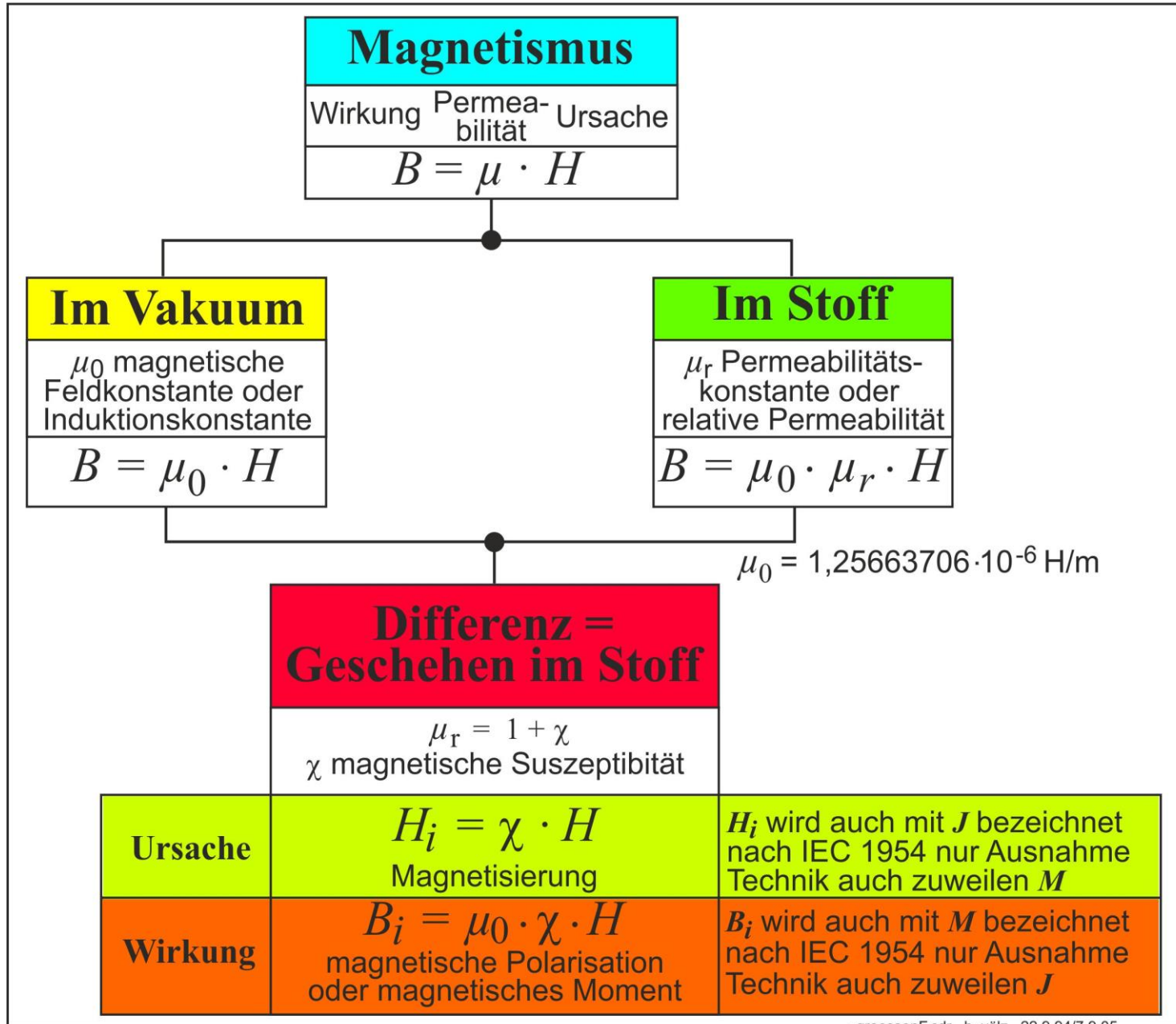
Maßeinheiten zur Hysterese

Genauere Betrachtungen verlangen magnetischen **Maßeinheiten**, die aber leider nicht im SI (System International) magnetische Basiseinheit besitzen und daher **umständlich** von der Elektrotechnik **abgeleitet** werden und daher recht unanschaulich sind: Die magnetische **Feldstärke** H in A/m kann daher bestenfalls indirekt als **Stromstärke** in einer *Spule* verstanden werden. Deshalb wird zuweilen in der Fachliteratur oft noch das alte, nicht mehr zugelassene **Örsted** benutzt. Das Verständnis wird weiter dadurch erschwert, dass es im **Magnetismus keine Quellen**, nämlich getrennte Nord- und Südpole gibt. Alle magnetischen Felder besitzen *geschlossene Feldlinien* ohne Ursprung. Sie gehen dabei sowohl durch das Material als auch die umgebende Luft. Die magnetische Leitfähigkeit des Magnetmaterials (**Permeabilität μ**) besitzen so unterschiedliche Intensität. Zum besseren Verständnis der magnetischen Maßeinheiten für die magnetische Speicherung ist es vorteilhaft, sie tabellarisch mit den Maßeinheiten des stationären (fließenden) Stromes und der Elektrostatik (elektrische Ladungen und Feld) zu vergleichen.

| | Magnetismus | Ergänzungen | Statischer Strom | Elektrostatik |
|------------------------------------|--|--|--|--|
| Ursache Wirkung Gesetz | Feldstärke H in A/m Flussdichte = Induktion B in T $B = \mu \cdot H$ mit $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ | Alt: Örsted 1 Oe = 79,6 A/m Alt: Gauß 1 G = $10^{-4} \cdot \text{T}$ Suszeptibilität $\kappa = \mu - 1$ | Feldstärke E in V/m Stromdichte i in A/m ² $i = E/\rho$ ρ spez. Widerstand | Feldstärke E in V/m Verschiebung D in C/m ² $D = \epsilon \cdot E$ mit $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/(V}\cdot\text{m)}$ |
| Fläche A Länge l | $\Phi = B \cdot A$ Fluss in Wb = V·s $V (= \Theta) = H \cdot l$ Durchflutung in A | Alt: Maxwell 1 Mx = $10^{-8} \cdot \text{Wb}$ Alt: Θ in Gilbert 1 Gb = 0,796 A | $I = i \cdot A$ Stromstärke in A $U = E \cdot l$ Spannung in V | $Q = D \cdot A$ Ladung in C $U = E \cdot l$ Spannung in V |
| Energie Energiedichte diff. Gesetz | $N = L \cdot I^2 / 2$ $w = B \cdot H / 2$ $U = d\Phi / dt$ | in J = W·s in J/m ³ | $N = U \cdot I \cdot t$ $w = i \cdot E \cdot t / 2$ $I = dQ / dt$ | $N = C \cdot U^2 / 2$ $w = D \cdot E / 2$ $I = dQ / dt$ |
| Bauelement | $L = n^2 \cdot \mu \cdot A / l$  n Windungen | $n = \text{Windungen}$ $P = \frac{l}{\mu \cdot A}$ | $R = \rho \cdot l / A$  | $C = \epsilon \cdot A / l$  |

Ein elektrisches Feld E im Material bewirkt eine Stromdichte i in A/m², ein magnetische Feldstärke H eine magnetische Flussdichte B in T (Tesla). Der Stromstärke $I = i \cdot A$ ($i \times$ Fläche A) in Ampere entspricht den magnetischen Fluss $\Phi = B \cdot A$ (Flussdichte $B \times$ Fläche A) in Weber = V·s. Beim Magnetismus existiert *kein Pendant zum Draht und Kondensator*, sondern nur ein räumliches Gebilde, die **Spule**. So wird bevorzugt die Flussdichte B (entspricht i) und nicht der Fluss Φ (entspricht I) benutzt. Im **Material bzw. Vakuum** gibt es die magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ (Induktionskonstante = absolute Permeabilität). Das alles erfordert beachtliches Umdenken. Außerdem ist es beim Magnetismus üblich, bevorzugt die Erscheinungen

Zusammenhang der magnetischen Größen



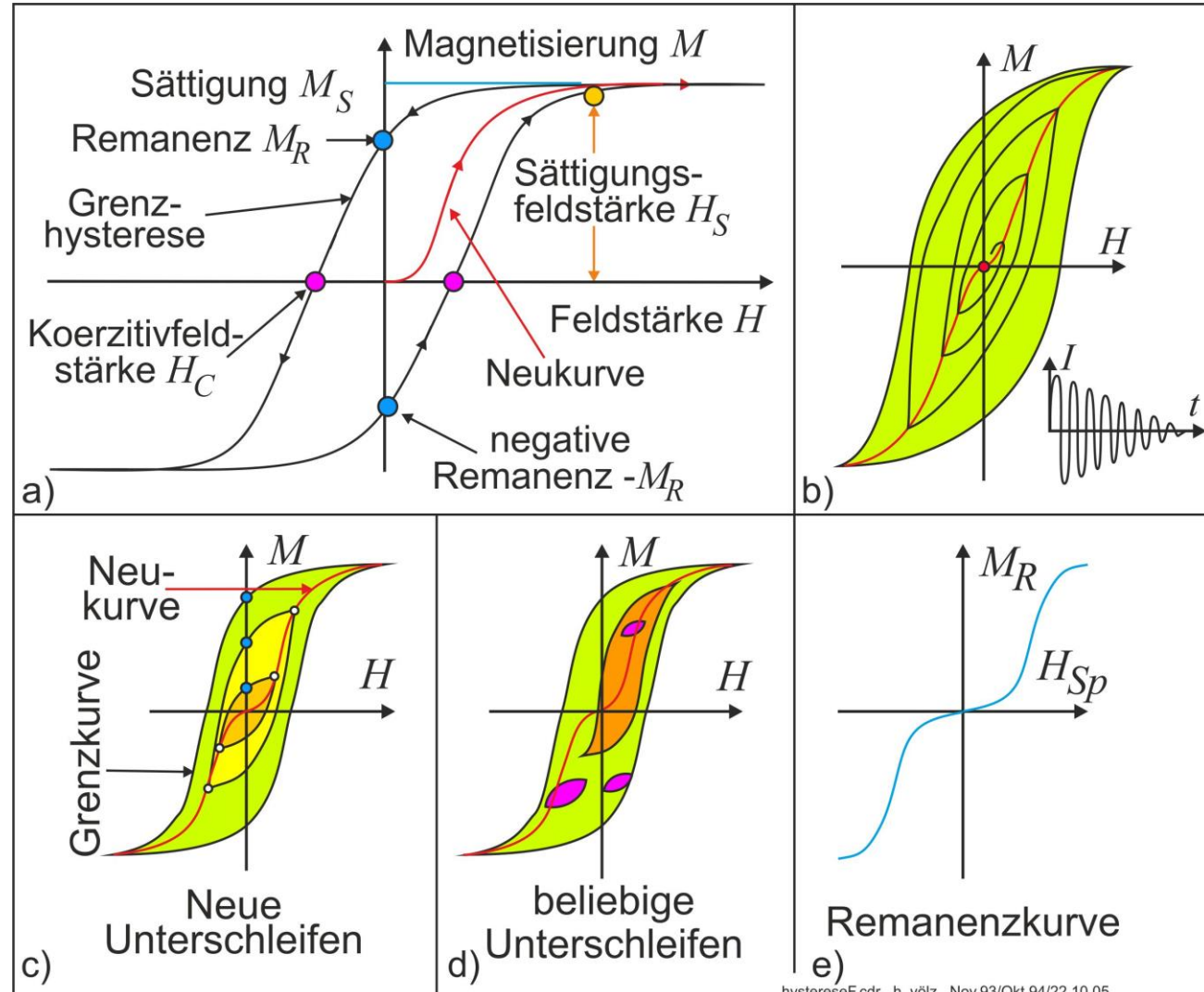
Hysteresekurve

Die typisch magnetischen Materialeigenschaften werden optimal an einem geschlossenen **Ringkern** gemessen. Da dann keine Feldlinien aus dem Material heraus gelangen kann ist die Messung ist besonders übersichtlich. Neben dem wirksamen Magnetfeld H wird dabei meist die **Magnetisierung M** statt der **Induktion B** benutzt. Das hat den Vorteil, dass bei großen Feldstärken für M eine **Sättigung** eintritt, während B nicht weiter ansteigt. Bei einem etwa sinusförmigen Wechselstrom mit sehr großen Maximalfeldstärken entsteht die typische **Hysteresekurve** mit ihrer **Grenzkurve** um das grün dargestellte Feld. War zuvor das Material unmagnetisiert, so wird zu Anfang nur einmal die **Neukurve** durchlaufen. Ab der Feldstärke H_S wird die konstante Sättigungsmagnetisierung M_S erzeugt.

Bei Rückkehr aus der Sättigung zur Feldstärke $H \rightarrow 0$ verbleibt im Material die **Remanenz M_R** (Latein. *remanere* zurückbleiben). Sie ist fundamental für die magnetische **Speicherung** und tritt auch analog bei der Rückkehr aus der negativen Sättigung auf. Damit sie verschwindet, muss (zumindest kurzzeitig) ein Gegenfeld mit der **Koerzitivfeldstärke H_C** einwirken (Latein. *coercere* zusammenhalten, einschließen).

Ein Magnetmaterial und damit eine magnetische Speicherung lassen sich besonders zuverlässig durch ein abklingendes Wechselfeld löschen. Dabei werden abnehmende Schleifen innerhalb der Grenzhysterese erzeugt (b). Generell befinden sich sogar alle möglichen Magnetisierungen innerhalb der Grenzhysterese (d und e).

Für die Speicherung ist die Remanenzkurve Bild e besonders wichtig. Sie entsteht dann, wenn das Material bis zur Spitzenfeldstärke H_{Sp} magnetisiert und danach das Feld abgeschaltet wird. Die dann jeweils verbleibenden Remanenzwerte M_R bestimmen die Kurve. Sie ist sehr nichtlinear und muss daher für kontinuierliche Speicherungen kompliziert linearisiert werden.



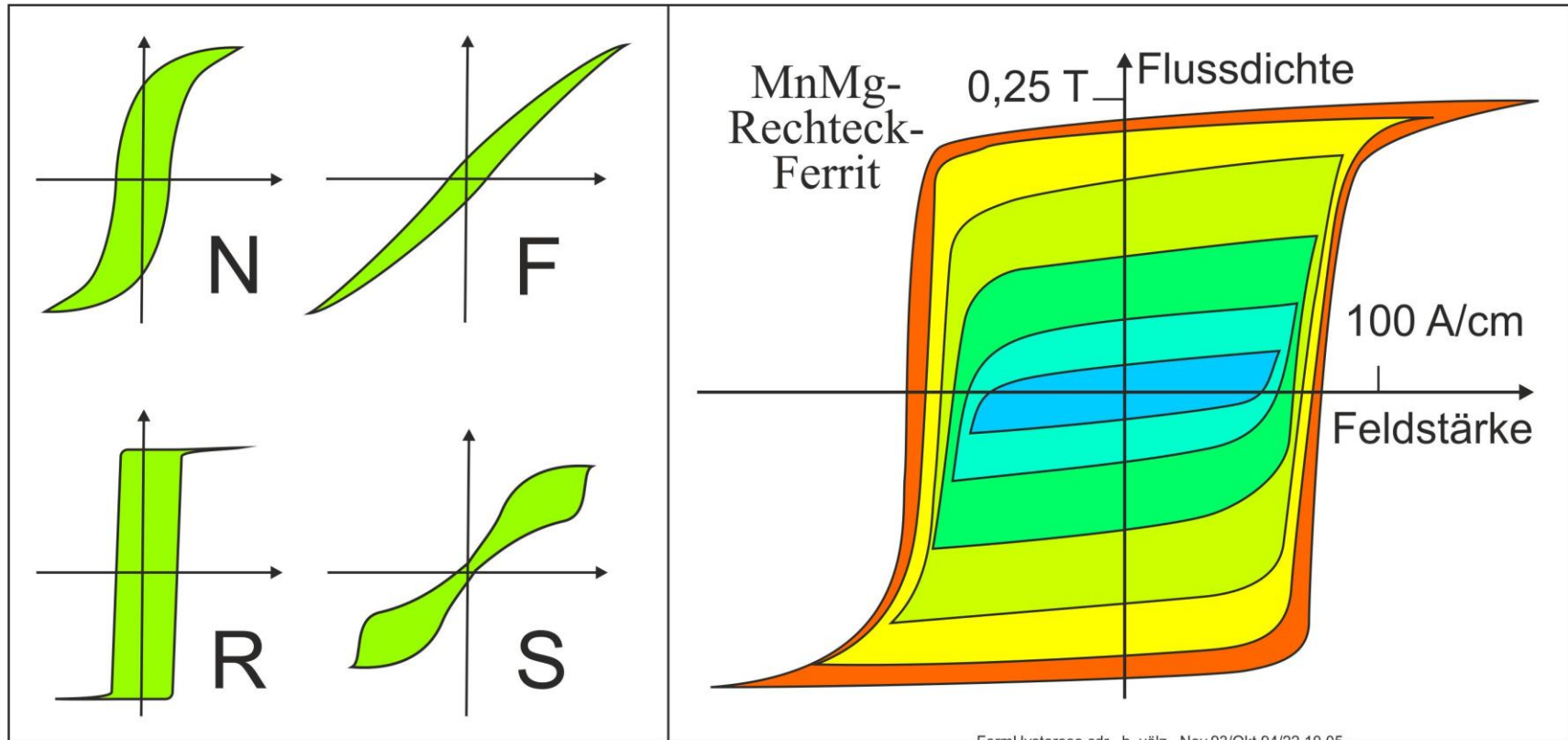
Verschiedene Hysteresekurven

Nicht alle Hysteresekurven sind der bisher betrachteten ähnlich. Vielmehr existiert ein großer Variantenreichtum. Einige typische Beispiele zeigt das Bild. Darin ist N der normale (häufigste) Fall mit recht großer **Koerzitivfeldstärke**.

Weichmagnetische Materialien besitzen dagegen eine möglichst kleine Koerzitivfeldstärke und zeigen dann ein Aussehen wie etwa F.

Die Rechteckschleife R war zumindest bei den **Magnetkernspeichern** notwendig. Daher stammt die rechts gezeigte Kurve mit ihren Unterschleifen. Sie wird oft auch bei aktuellem Speichermaterial angestrebt.

Schließlich gibt es viele Sonderformen. Ein Beispiel zeigt S. Magnetische Feldlinien verlaufen oft nur teilweise im magnetischen Material mit der relativen Permeabilität $\mu_r \gg 1$. Meist durchdringt der andere Teil die Luft mit $\mu_r \approx 1$



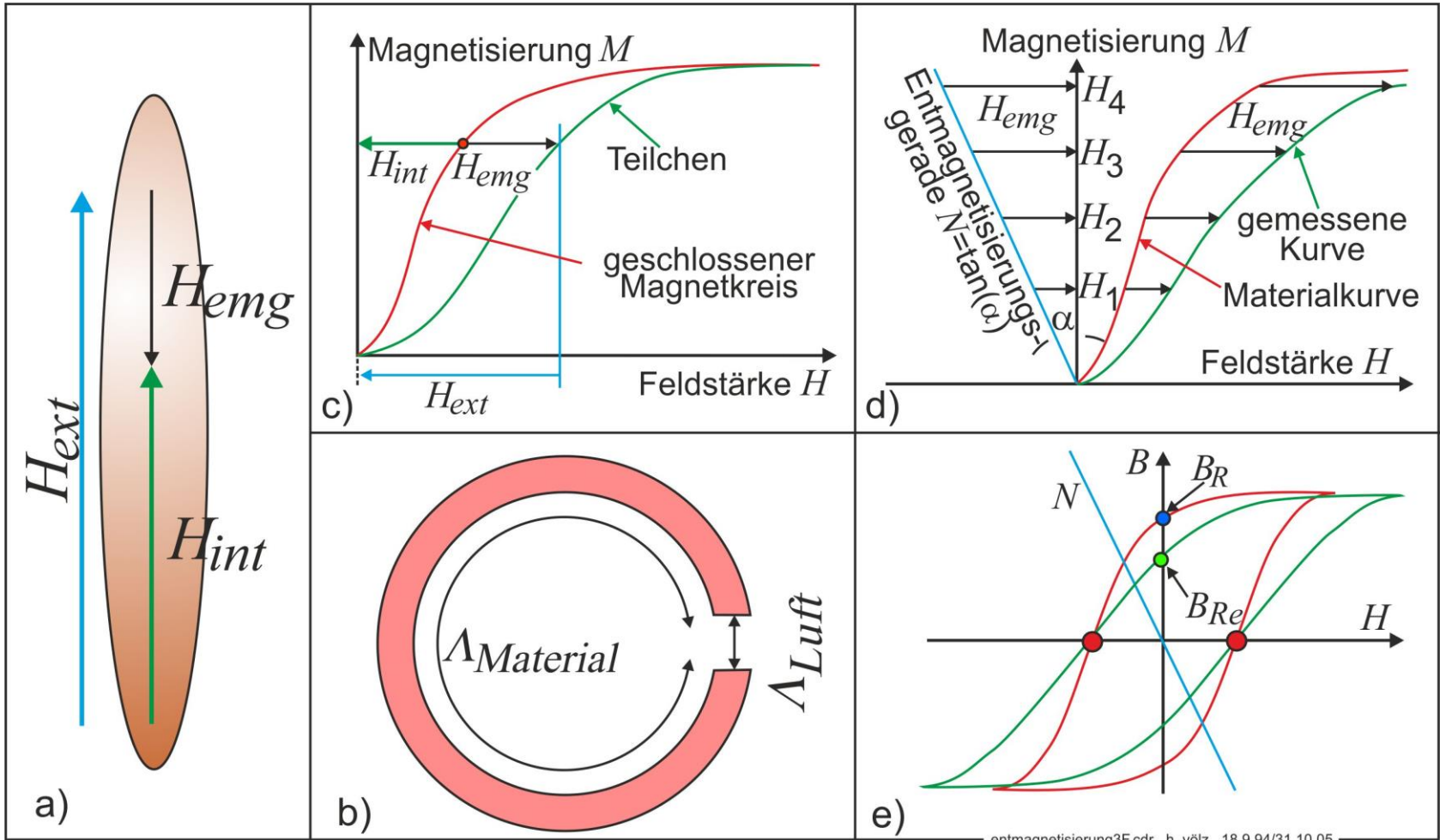
Entmagnetisierung und dem Entmagnetisierungsfaktor

Im Bild a ist das magnetische Material ein **Ellipsoid**. Durch ein äußeres Feld H_{ext} bilden sich an seinen Enden *Pole* aus, die ein dagegen gerichtetes Feld H_{emg} hervorrufen.

Für die Feldstärke **im Material** wird deshalb nur der Anteil $H_{int} = H_{ext} - H_{emg}$ wirksam. Das Geschehen wird etwas unglücklich als **Entmagnetisierung** (Engl demagnetization) bezeichnet.

Das **interne Feld** H_{int} kann nicht gemessen, muss es berechnet werden.

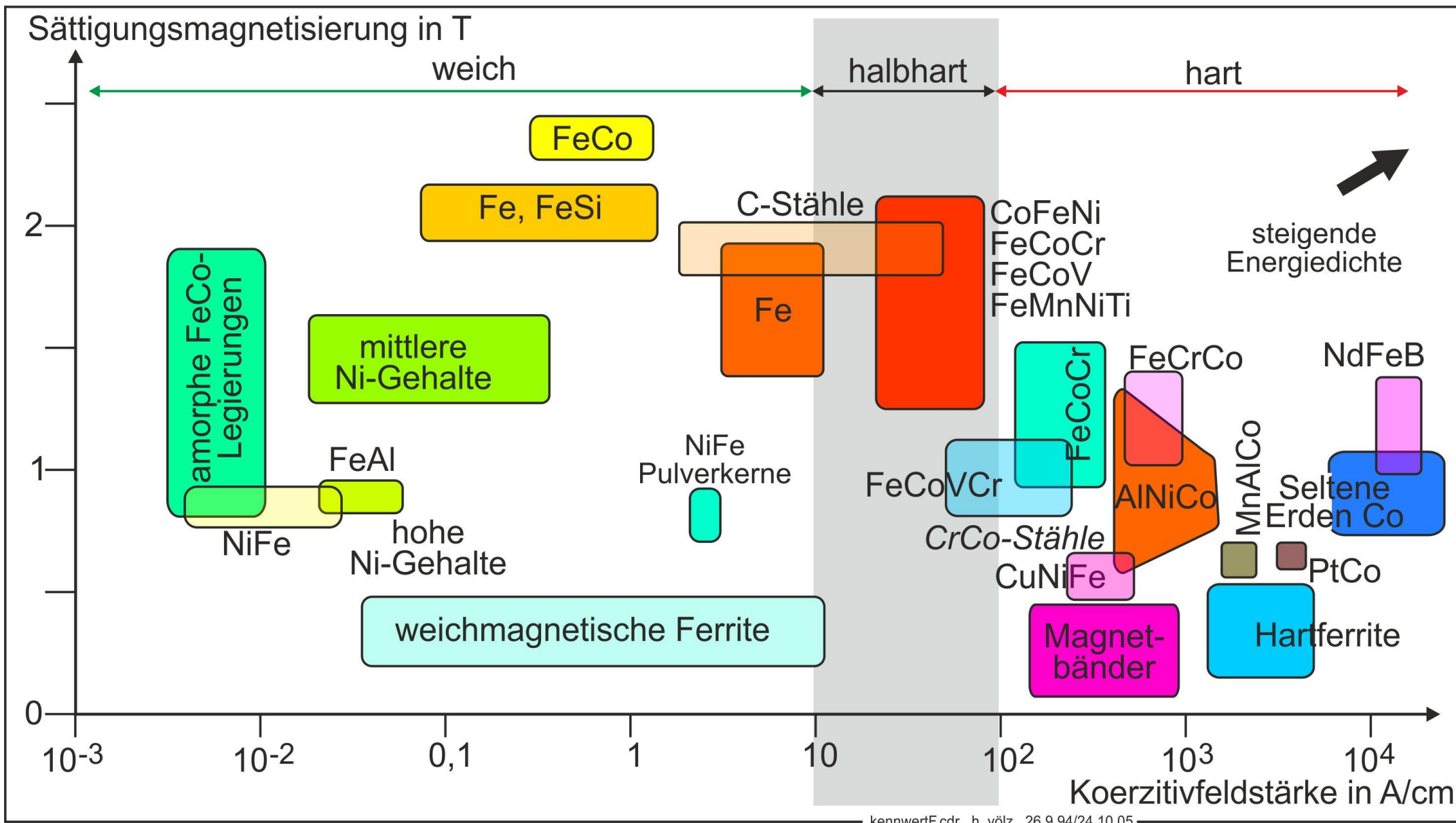
Für einen **geschlossenen Magnetkreis** möge sich durch Messung die **rote** Kurve ergeben haben (c). Durch die Entmagnetisierung entsteht die **grüne** Kurve. Dafür kann ein formabhängiger, **Entmagnetisierungsfaktor**



N berechnet werden. Er bestimmt den Verlauf der blauen Entmagnetisierungsgeraden (d und e).

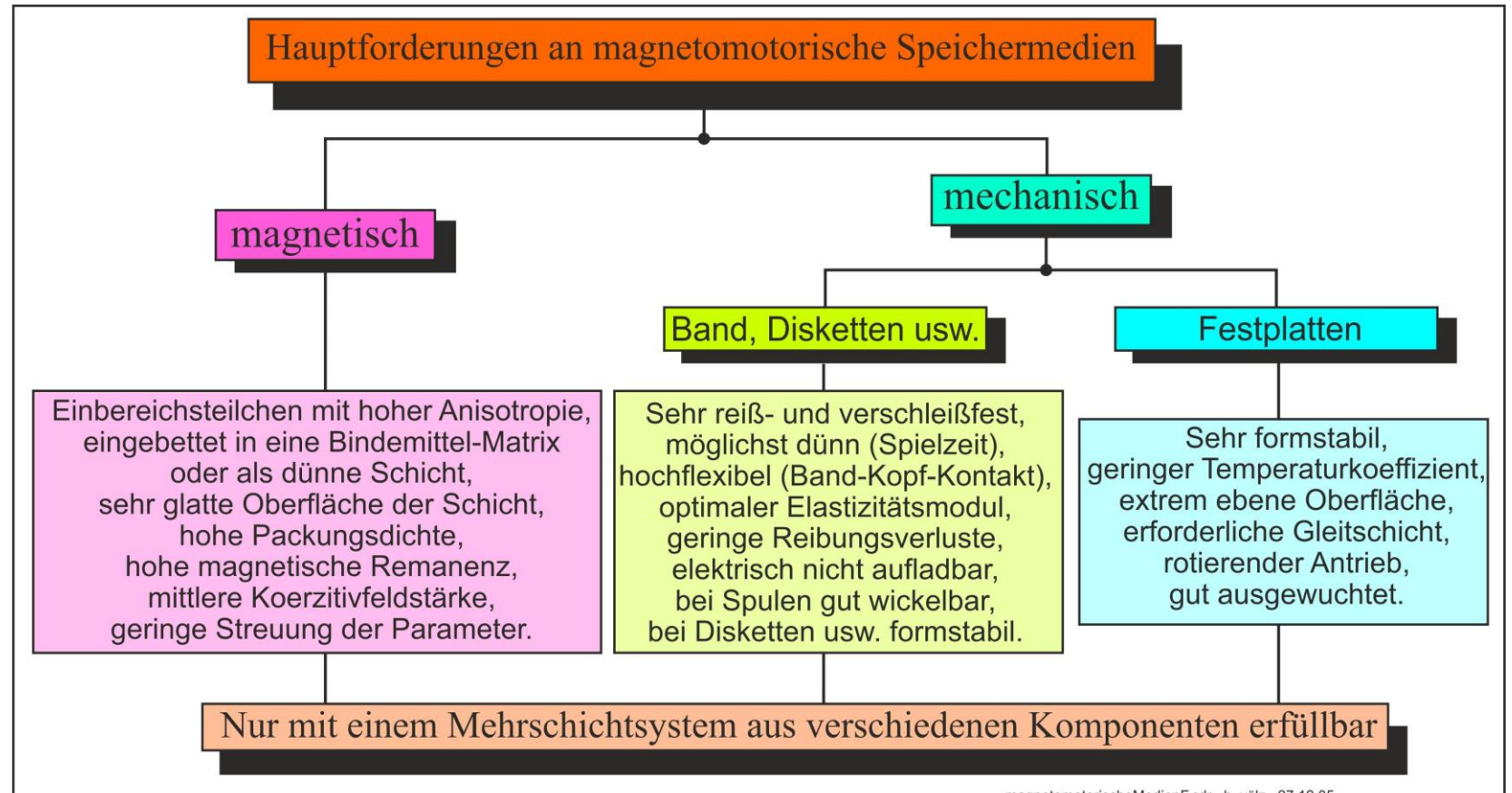
Ein deutlich anderer Fall liegt bei einem **fast geschlossenen Magnetkreis** vor, der nur durch einen recht engen Luftspalt unterbrochen ist b). Das ermöglicht die Berechnung gemäß in Reihe geschalteten magnetischen Widerständen (ihren reziproken Leitwerten $\Lambda_{Material}$ und Λ_{Luft}). Da der Luftspalt ein völlig lineares Feldverhalten besitzt, kann auch er durch die Gerade der Entmagnetisierung N dargestellt werden (e). Seine B -Werte werden von der roten Materialkurve abgezogen und es entsteht die grüne Kurve. Auffällig ist dabei, dass hierdurch die Koerzitivfeldstärke nicht verändert wird.

Magnetmaterial



Magnetbandaufzeichnungen

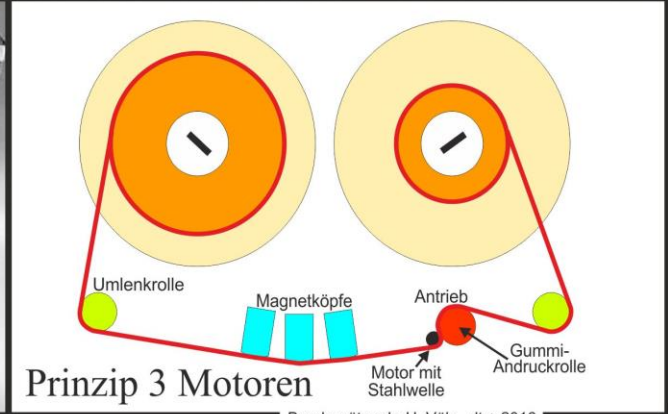
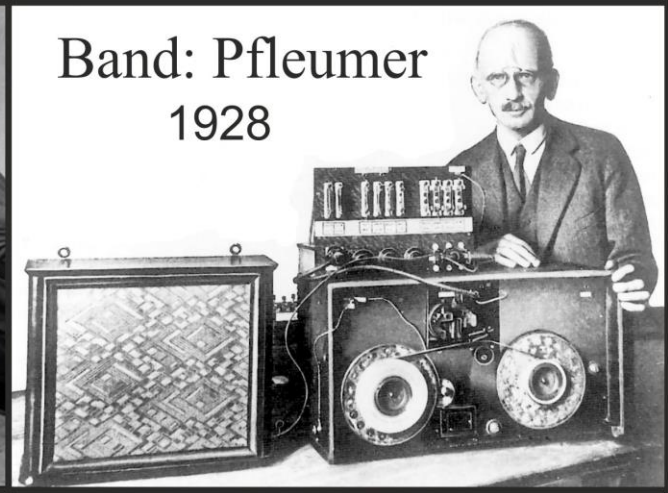
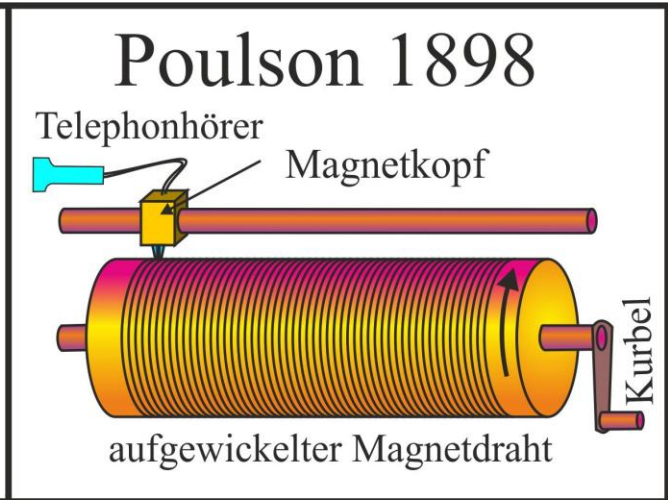
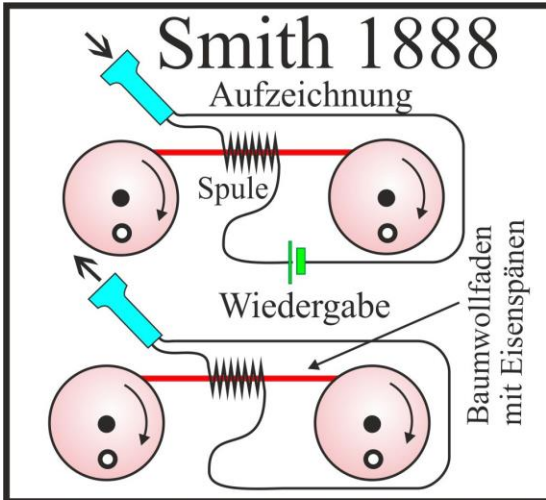
Magnetische Speicher hat es in sehr großer Vielfalt gegeben. Abgesehen von den frühen **Ferritkernspeichern** besitzen sie alle heute ein mehr oder weniger kompaktes magnetisches Speichermedium, auf das mit einem **Magnetkopf geschrieben und dann auch gelesen werden kann**. Um ausgewählte Speicherzellen zu erreichen ist daher eine **mechanische Relativbewegung** zwischen Zelle und Magnetkopf erforderlich. Dabei werden heute nur noch die lineare **Bewegung eines Magnetbandes** oder die **Rotation von Festplatten** benutzt. In einigen Sonderfällen existieren immer noch **Magnetkarten**



(Gesundheits-, Kontokarte, für Rechner usw.). Bis vor reichlichen zehn Jahren gab es im beachtlich großen Umfang noch rotierende flexible **Disketten**. Sie sind durch elektronische Karten und **USB-Sticks** völlig abgelöst.

Alle **magnetomotorischen** Speicher verlangen **3 Komponenten**, die nur im Zusammenhang für ein Gerät bestimmte Eigenschaften besitzen müssen.

- Ein *Magnetmaterial*: Band, Festplatte oder Karte,
- dazu passende (induktive) *Magnetköpfe* und
- mechanische (Motor-) *Antriebe*.



Historische magnetomotorische Speicher.

„The Electrical World“ beschreibt 1888 Smith einen „elektrischen Phonographen“: In einem **Baumwollfaden sind Eisenfeilspäne bzw. Stahlpulver** eingearbeitet. Dieser Faden wird mittels zwei Aufwickelspulen durch eine elektrische Spule bewegt. Leider war das nur eine Idee, die nie erprobt wurde.

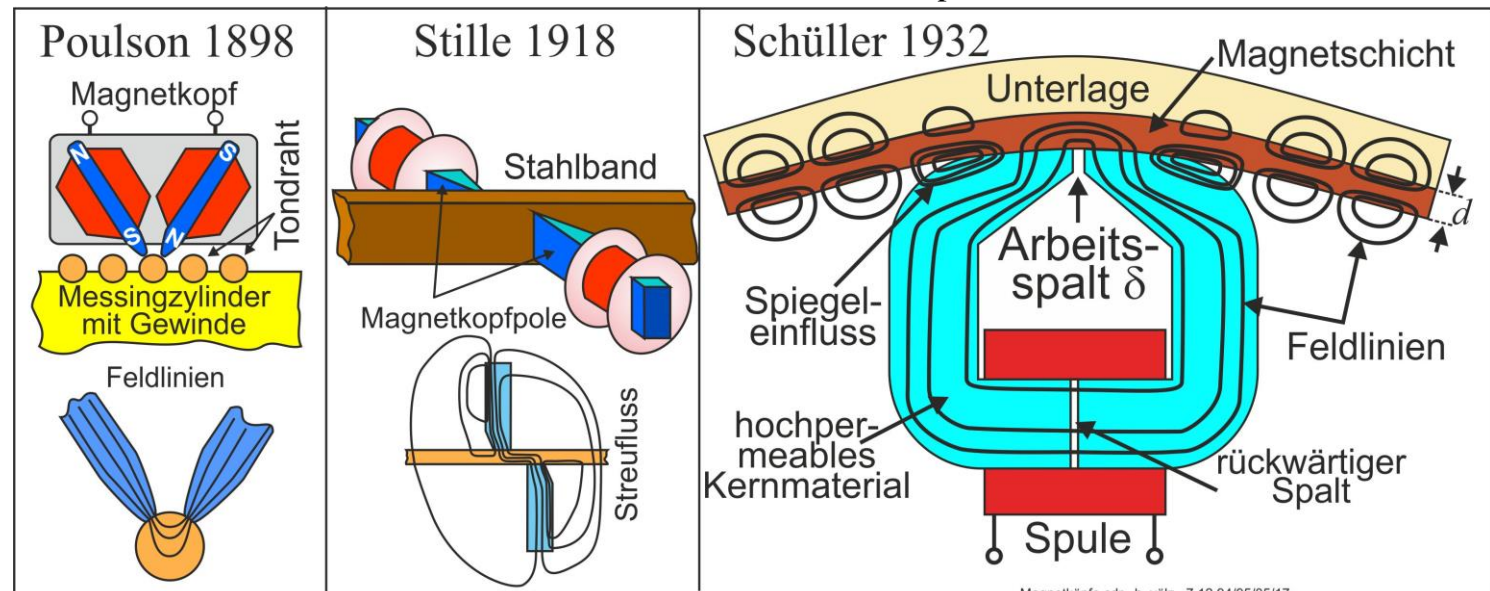
Das erste brauchbare Gerät schuf **Poulsen** (Patent 1898). auf der Pariser Weltausstellung 1900 vorgeführt, erhielt den ersten Preis: Die Messingwalze besitzt 12 cm Durchmesser und 38 cm Länge, vertiefte Spiralspur eingefräst, Stahldraht von 1 mm Durchmesser und 150 m Länge ist das Speichermaterial und führt zugleich den Kopf. Drehen der Kurbel bewirkt eine Draht-Geschwindigkeit um 20 m/s. ca. 1 Minute Aufzeichnung. Erst Ende der 1970er Jahre wurde eine Walze mit Kaiser Franz Joseph I. entdeckt, die er am 20.9.1900 besprochen hatte: „Diese Erfindung hat mich sehr interessiert, und ich danke für die Vorführung derselben.“ 1900 wird ein Gerät in der Schweiz als Telefonbeantworter eingesetzt. 1902 ersetzt Poulsen den Messingzylinder durch zwei Spulen mit aufgewickeltem Draht. Ab 1906 werden solche Geräte in Deutschland für die Diktiertechnik eingesetzt.

1918 entwickelte Stille das **flache Stahlband** und vermeidet so den Drall-Effekt des Drahtes. Das Stille-Patent wurde von E. Blattner erworben und der entwickelte daraus die großen Blattnerphone für die BBC, die ab 1929 bis in die 1940er Jahre im Einsatz waren.

Die drei grundlegenden Entwicklungen der magnetomotorischen Studioteknik (des Rundfunks) erfolgten 1928 mit dem Magnetband durch **Pfleumer**, 1932 mit dem Ringmagnetkopf von **Schüller** sowie 1936 bei AEG und Telefunken durch **Volk** mit dem **Dreimotoren-Laufwerk**. Qualitätssteigerung bewirkt der Synchronmotor für unmagnetische Stahlwelle (Capstan) exakt antreibt. Großen Vorteile waren Mithören, sofortige Wiedergabe, Cuttern und Löschen.

Großer Sprung für höchstmöglichen Audioqualität 1940 **Braunmühl und Walter Weber** mit der Hochfrequenzvormagnetisierung, die Braunmühl nur zufällig entdeckt hatte. Nach dem Krieg wurden alle deutschen Patente frei und so setzte sich diese Technik als Spitzenstandard für akustische

Ursprünglich Papierstreifen, auf die feines Eisenpulver geklebt wurde. 1928 der Presse vorgeführt, war stolz, wenn das Band zerriss und es wieder mühelos und augenblicklich wieder zusammenklebt werden konnte. Die Klebestelle war praktisch unhörbar Auf Vorschlag der AEG übernahm die Badische Anilin- und Sodafabrik die Entwicklung. 1932 standen die ersten Versuchsbänder mit Eisenpulver auf Acetylcellulose zur Verfügung. 1935 wurde statt des Eisenpulvers der schwarze Magnetit Fe_3O_4 , später das braune $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ benutzt usw. Bereits vor 1945 bestritten die Deutschen Rundfunkanstalten 90 % der Sendezeit mit Bandaufnahmen



Magnetband

Nach dem Kriege wurde eine alte Anlage in Gendorf (Marke Geneton) wieder in Betrieb genommen und das 1943 nach Wolfen ausgelagerte Werk produzierte eine beachtliche Menge.

Nur kurzzeitig gab es schlechtere Massebänder, bei denen der Magnetit gleichmäßig in die Schicht eingebracht war.

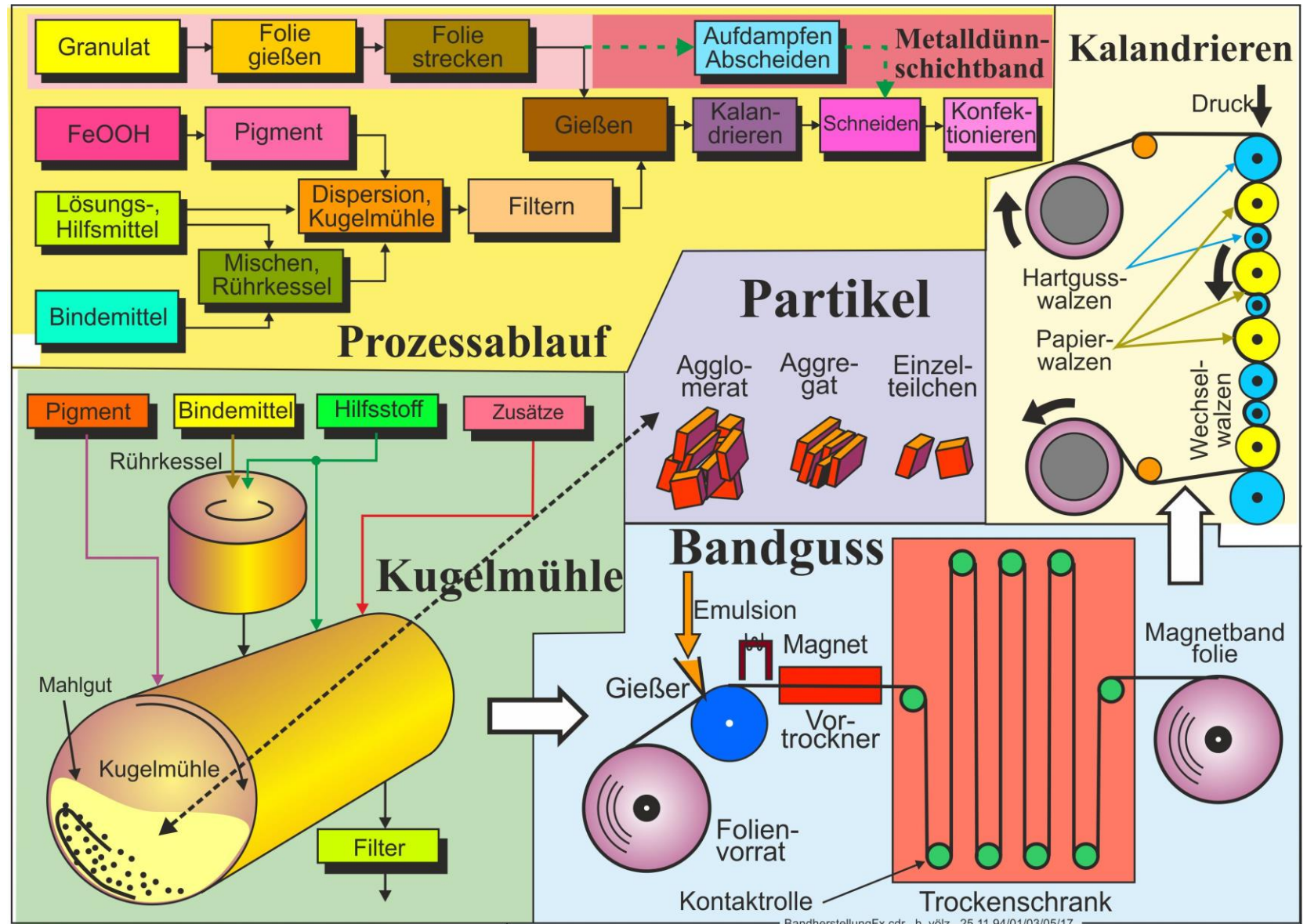
Unterlage speziell verstreckt werden

Für die Magnetschicht werden μm -große Magnetit-Kristallite hergestellt, die dann fein und möglichst gleichmäßig verteilt in ein Bindemittel mittels einer Kugelmühle emulgiert werden.

Die Emulsion wird dann gefiltert und schließlich auf die Unterlage als Schicht unter dem Einfluss eines Magnetfeldes gegossen.

Nach einer schnellen Vortrocknung erfolgt in einem mehrere Meter langen Trockenschrank die Festigung der Schicht auf der Unterlage.

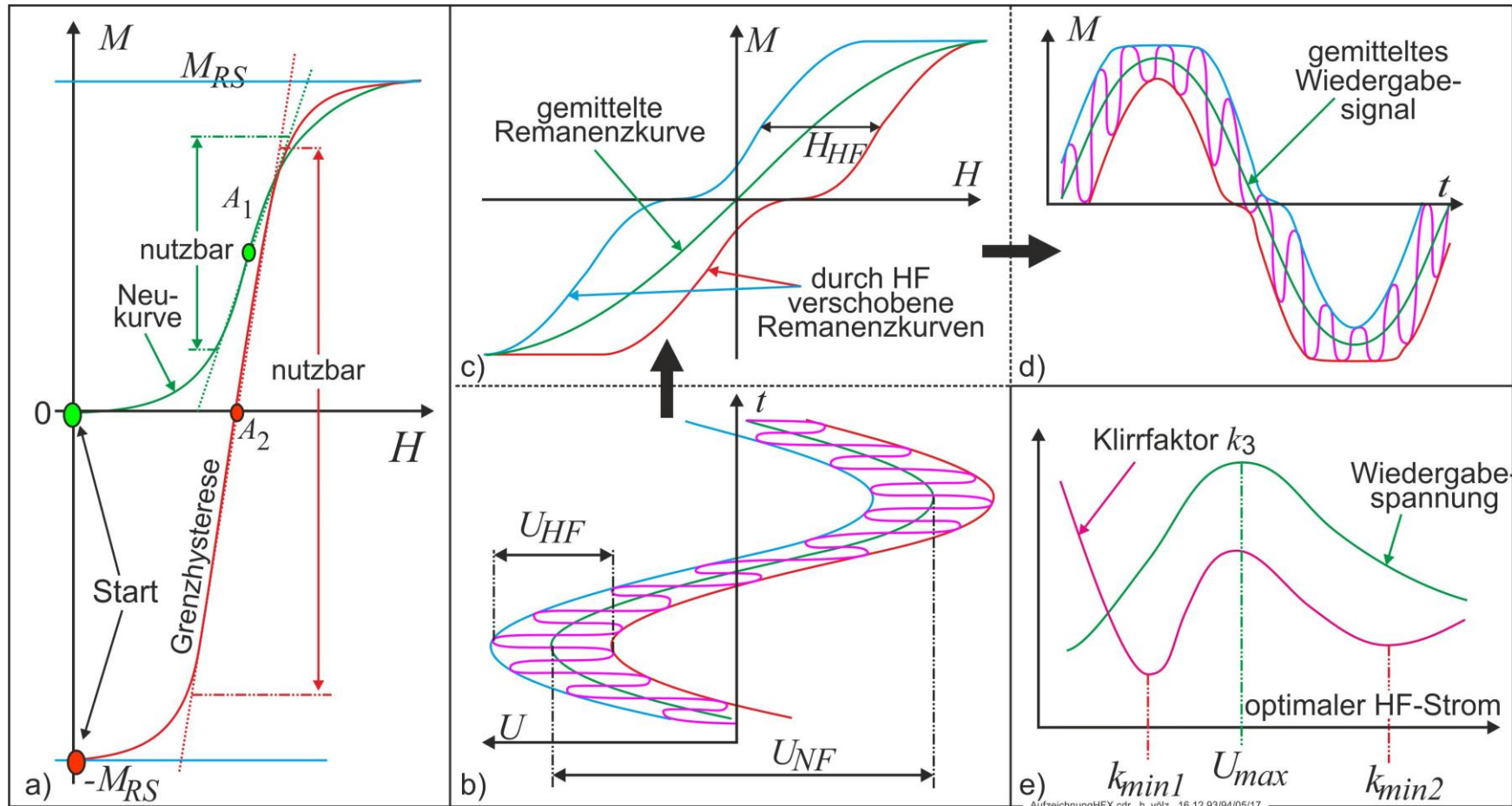
Anschließend wird mit einem Kalandrierer die Bandoberfläche verdichtet und geglättet.



Schallaufzeichnung

Für die Schallaufzeichnung war es notwendig, von der stark nichtlinearen Remanenzkurve (e) nur den geradlinigen Teil zu benutzen. Entsprechend (a) zwei Möglichkeiten, bereits von Pulsen benutzt. a.

1. vom Ursprung der Neukurve (grün) eine Gleichfeldvormagnetisierung nach A_1 . Nutzbarer Aussteuerungsbereich recht klein und erheblich störendes Rauschen.
2. bei negativer Sättigung $-M_{RS}$ und führt auf der Grenzhysterese zum Arbeitspunkt A_2 . sehr großer Aussteuerungsbereich auf. Dennoch großes Rauschen



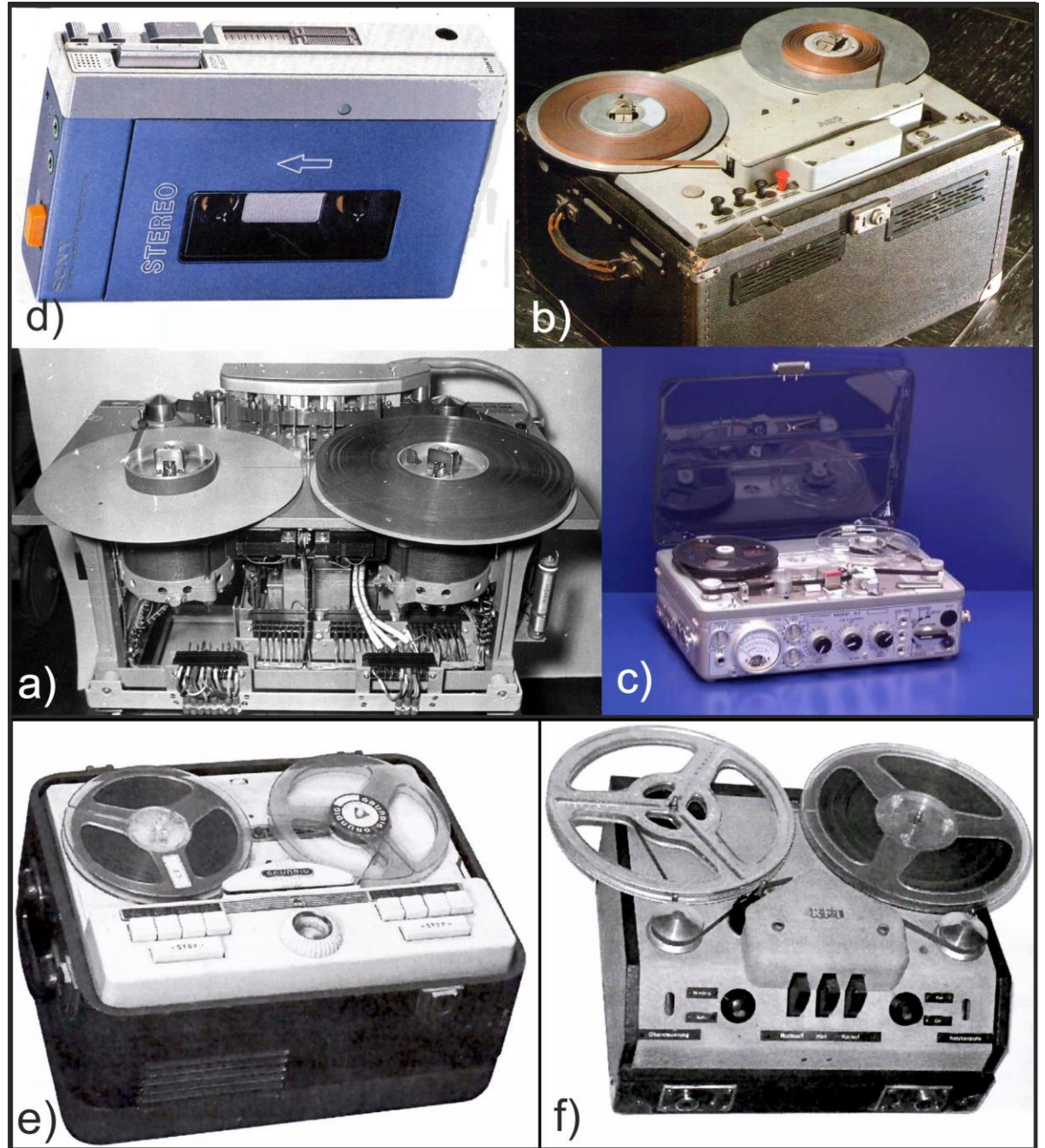
3. 1940 Braunmühl 1940 mit Gegenkopplung. Zufällig Hochfrequenzschwingung entstanden. Theorie dafür ist unklar. Beschreibung durch Camras (b)

Magnettongeräte

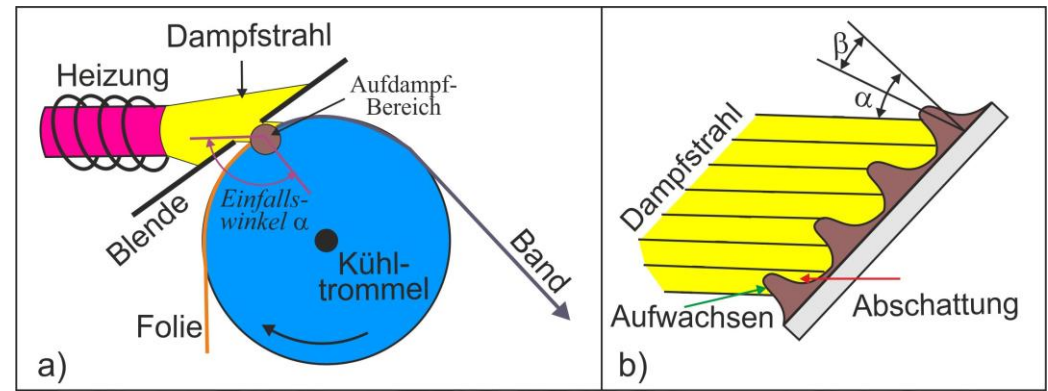
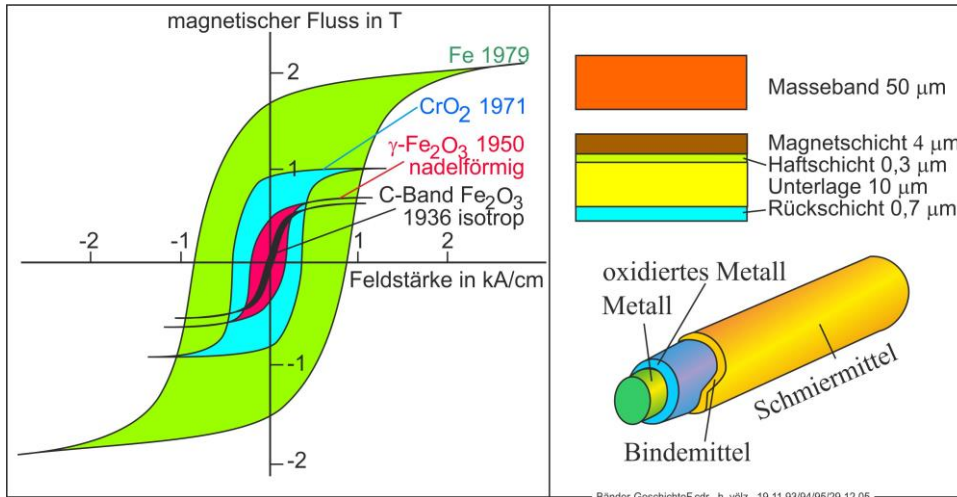
Mit leidlich transportablen Geräten gab es sogar Frontberichterstattung.

Ab 1950 (b) entstanden transportablen Studiogeräten K6, Heimtongeräte 1950 z. B. BG19“ DDR, und Grundig „Reporter 500 L, 1977 der meistverkaufte Walkman von Sony

Es war ein Glück, dass die sowjetische Armee hunderte wertvolle Aufnahmen mit nach Russland nahm und sie dort lagerte. Dr. Klaus Lang konnte sie in den 1980er Jahren nach Deutschland zurückholen und der Öffentlichkeit zugänglich machen.



Fortschritt bei Magnetpartikeln für das Magnetband



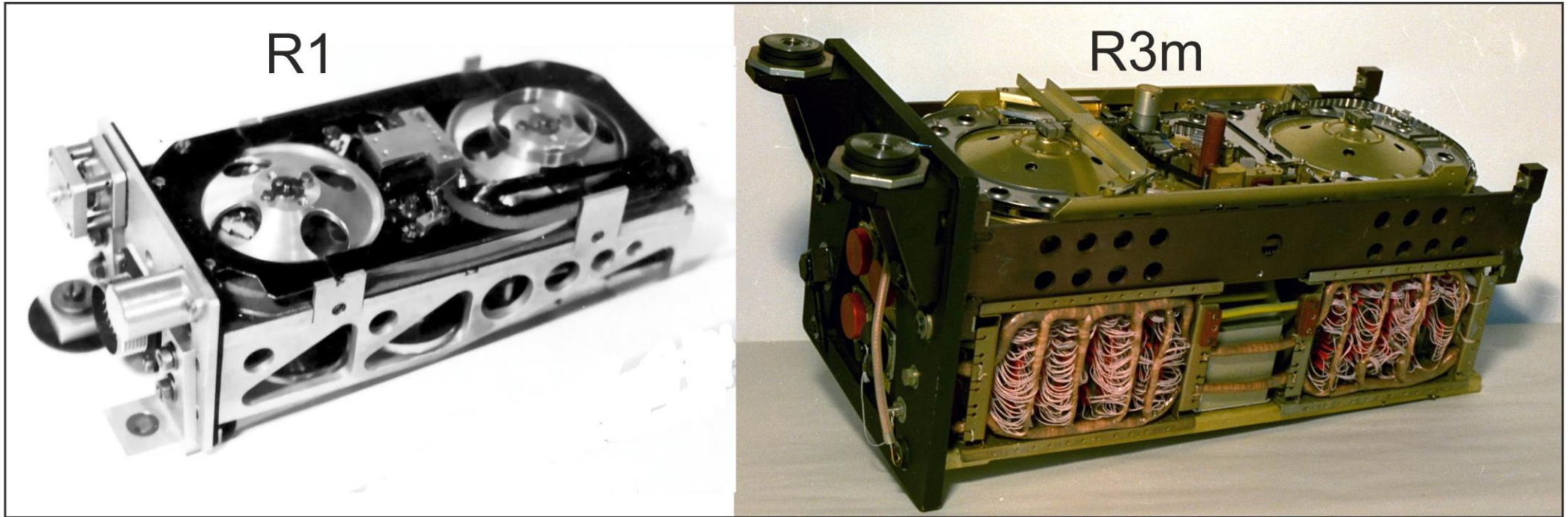
Erste Weiterentwicklungen betrafen die Partikel oben

bis zu vier und Studioteknik auf Halbzollband bis zu 24 Spuren

In der DDR gab es bei der Bandherstellung immer wieder deutliche Engpässe. Deshalb organisierte Prof. Reichard von der TU Dresden um 1962 ein Dreiergespräch mit Ardenne und mir (H. Vözl). Dabei entstand die Idee eines völlig neuartigen Metaldünnschichtbandes mit Schrägbedampfung. Auf eine Polyesterfolie wurde eine nm-dünne Metallschicht (Fe, Ni, und/oder Co) aufgedampft. Mit der Vakuumtechnologie von Ardenne und der Forschung der Arbeitsgruppe Magnetische Signalspeicher (AMS) in der Akademie der Wissenschaften konnten die ersten Ergebnisse bereits 1966 auf der

Intermag vorgestellt werden und ab 1975 dieses Band dann bei rund 30 Interkosmosspeichern, die in der AMS für die UdSSR entwickelt und hergestellt wurden, äußerst erfolgreich eingesetzt werden. Leider konnte das Verfahren in keine Großproduktion der DDR überführt werden. So verkaufte Ardenne die Technologie mit den Vakuumanlagen nach Japan zu Matsushita, wo erst nach 1980 eine leicht abgewandelte Variante für Videorecorder als ME-Band (metal evaporated) erschien.

Beispiele für DDR-Kosmospeicher

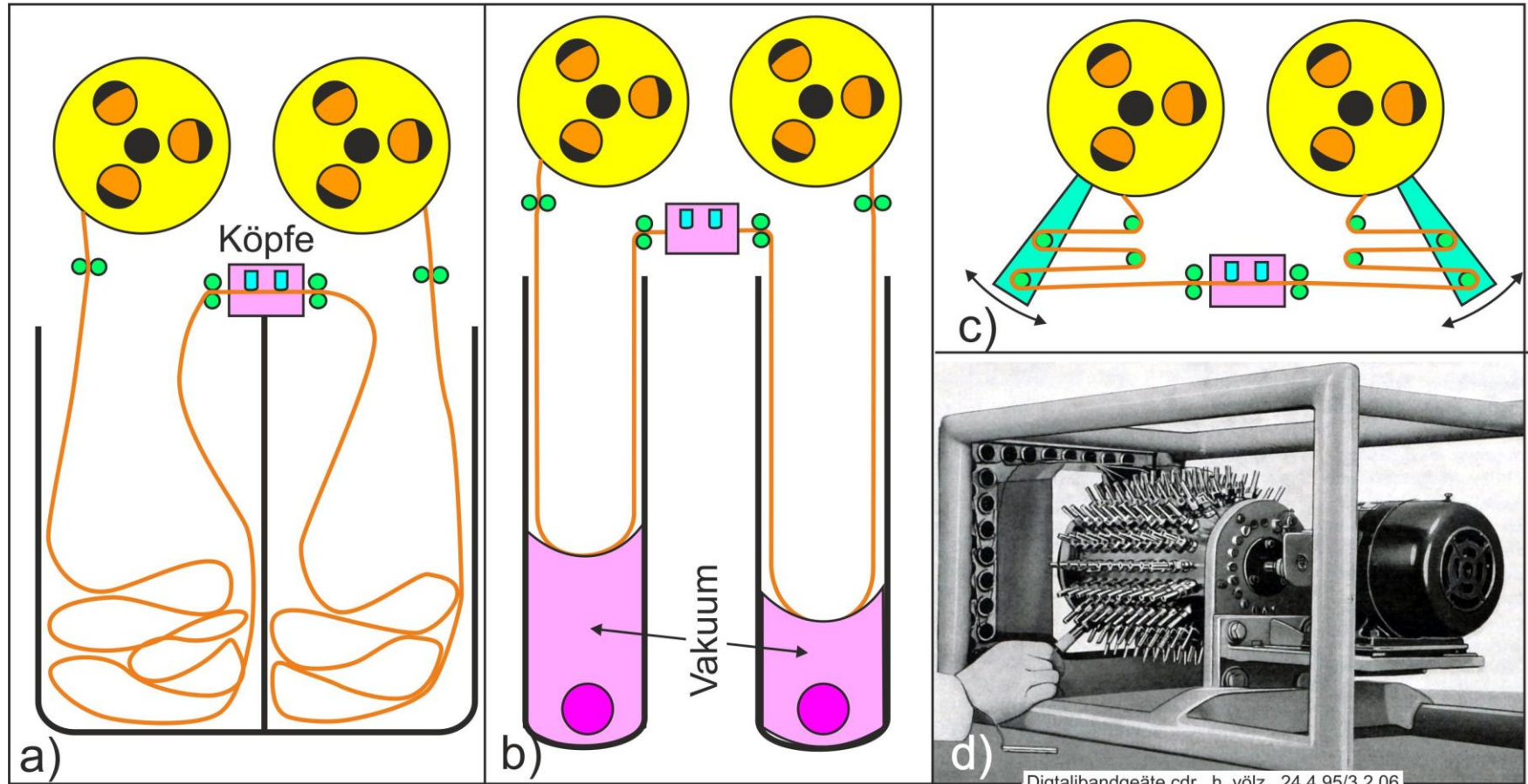


Kosmospeicher **R1** für die UdSSR aus der DDR (AMS) mit $6 \cdot 10^6$ Bit, 115 Bit/mm) und $280 \times 110 \times 85$ mm³. Geschwindigkeiten u.a. 1:4 (links)

Der **R3m** für die internationale Phobos-Mission von der DDR-Arbeitsgruppe Magnetbandspeicherung (AMS) mit 200 MByte, 860 Bit/mm, Transponierung Aufzeichnung/Wiedergabe: 2 MBit/s : 4096 Bit/s, $250 \times 230 \times 594$ mm³ (rechts) und getrennter Elektronik

Speicher für Sonderanwendungen

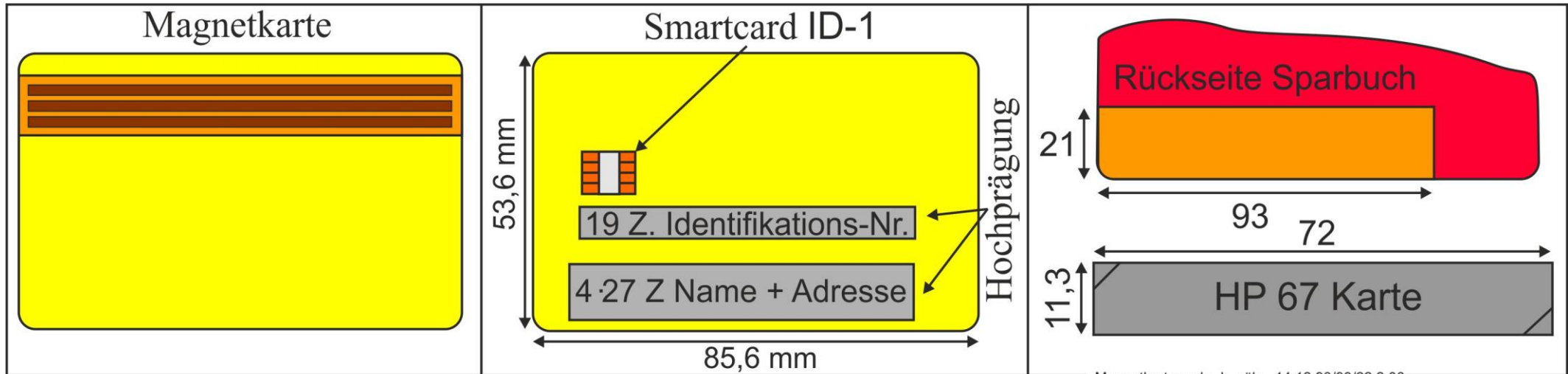
Es entstanden dann viele **Sondergeräte** für die *Diktier- und Videotechnik, Geheimdienste, Forschung, Digitaltechnik usw.* Insbesondere erlangte die Magnetbandtechnik auch für die entstehenden **Groß-Computer** beachtliche Bedeutung. In den 1940er Jahren standen zunächst als Speicher nur **Ferritkerne** und teilweise **Trommelspeicher** zur Verfügung. Mit der Magnetbandtechnik konnte die Speicherkapazität auf das Vielfache



vergrößert werden. Wegen der **digitalen Daten** war die Linearisierung der Remanenzkennlinie **unwichtig**. Das vereinfachte einiges, jedoch die Zugriffszeiten auf auszuwählende Daten war leider sehr groß. So entstanden bald **meterhohe Geräte mit mechanischen Bandpuffern vor den Spulen**. Dadurch konnten die **trägen Massen** der Spulen verzögert nachgesteuert werden, während das Band dazwischen mit je einem **vor- und rückwärts laufenden Capstan** ruckartig schnell beliebig bewegt wurde. Typische Beispiele hierzu zeigt Bild. In den 1980er entstand dann die relativ schnelle (**Fest-**) **Plattentechnik** (folgender Abschnitt). Die großen Bandgeräte verschwanden wieder. Zusätzlich entstanden die wesentlich einfacheren Bandspeicher für sehr große Datenmengen.

Weitere Speicher

Heute ist die Magnetbandtechnik bei fast allen Anwendungen durch die **komprimierten Dateien (mp3 usw.)**, *Festplatten* und elektronischen Speicher (**Flash-Karten, USB-Sticks usw.**) **ersetzt**. Eine beachtliche Anwendung besitzen lediglich noch die vom Magnetband abgeleiteten **Magnetkarten** u.a. bei den Konto-, Gesundheits- und Schlüsselkarten für Hotels, auf Schiffen usw.



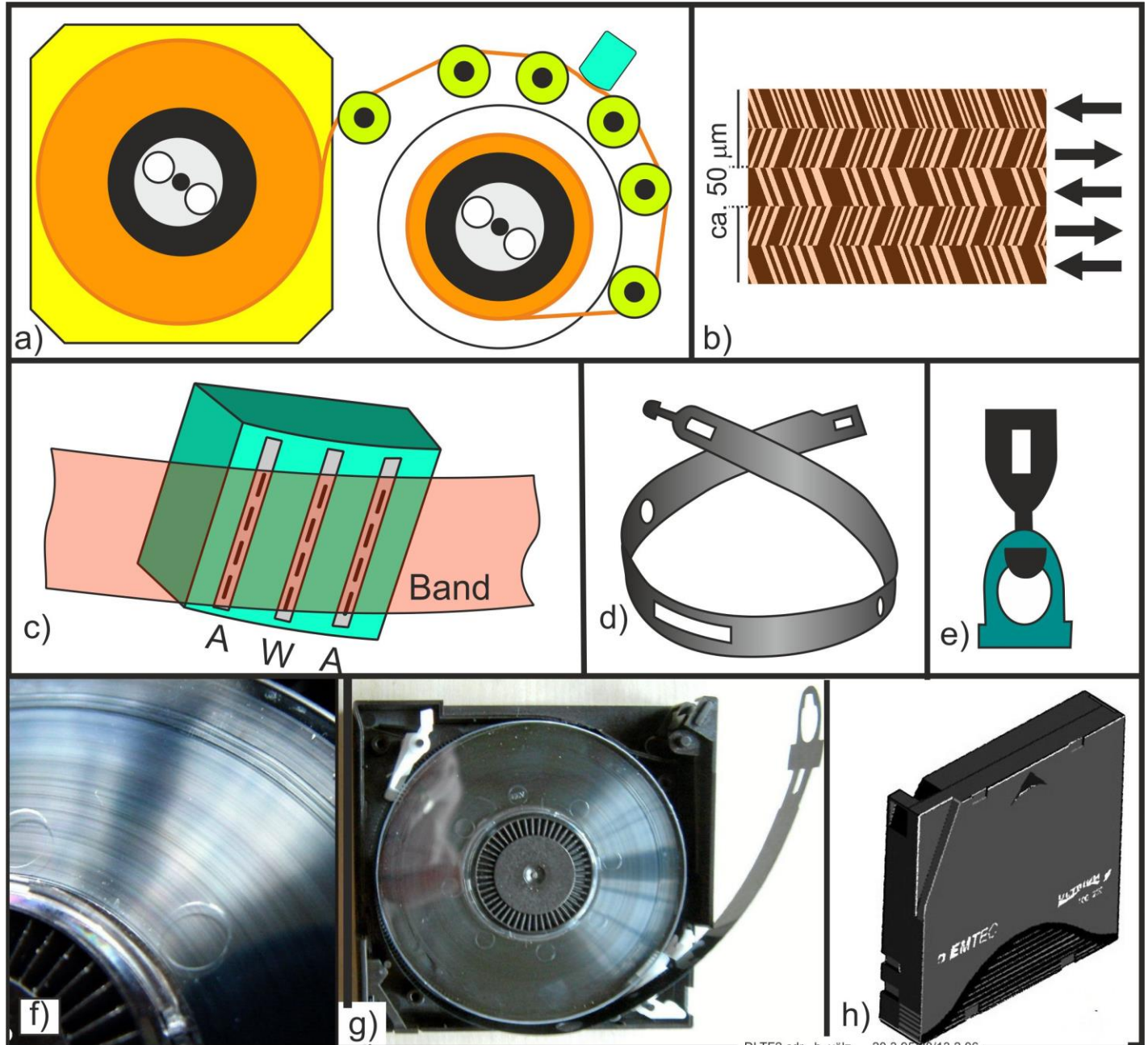
Neuere Bandspeicher

Immer noch wird die Magnetbandtechnik für die digitale Langzeitspeicherung sehr großer Datenmengen eingesetzt.

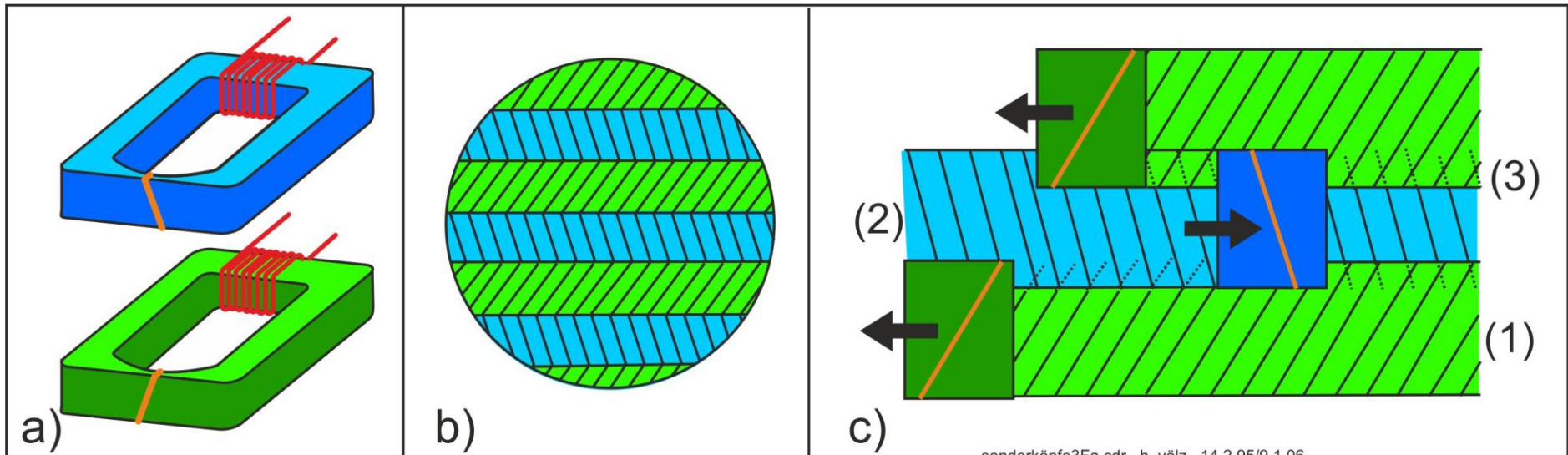
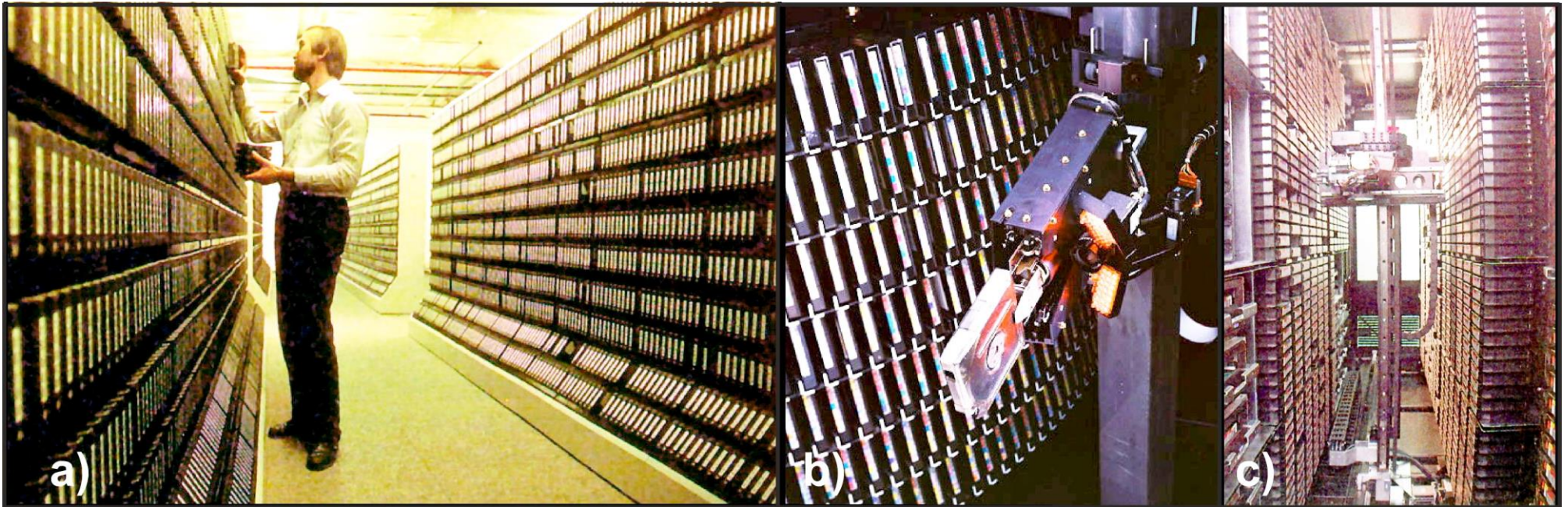
Nach beachtlich vielen abgelösten Varianten existieren nur noch *DLT-Varianten* (DEC linear tape).

Wegen der **Lizenzkosten** gibt es noch den wenig abgewandelten, sehr ähnlichen aber firmenoffenen Standard **LTO** (linear tape open) geschieht in sehr großen, mit Robotern automatisierten Bandbibliotheken (tape library) mit Tausenden von Magnetbändern
 Das spezielle 1/2-Zoll-Band (8 µm dick) ist auf einer Spule im staubdichten Kunststoffgehäuse von 101,6 × 101,6 × 25,4 mm³ untergebracht

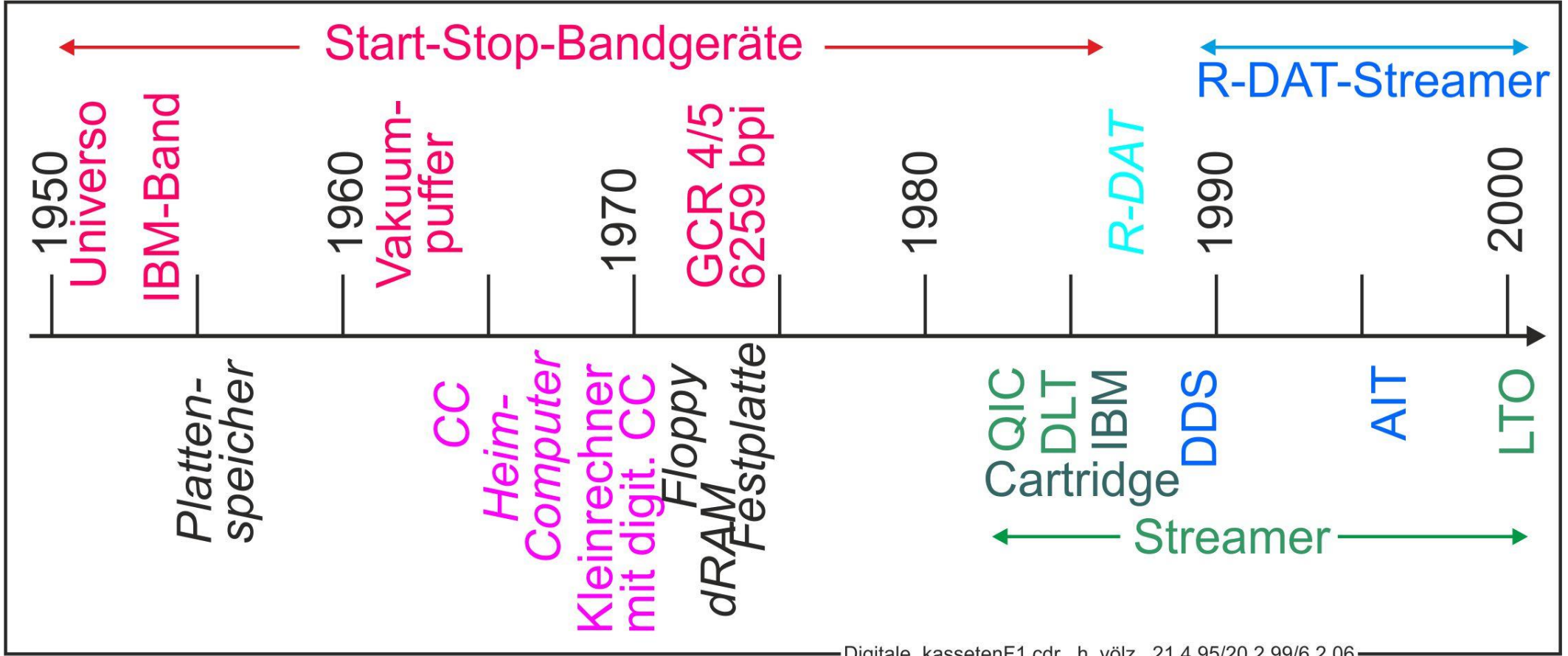
Im Betrieb holt einer von mehreren Robotern das gewünschte Band aus dem Lager und übergibt es einem Laufwerk. Es wird mit einer „Schleife“ aus der Kassette ins Laufwerk gezogen und dann zum Lesen oder Schreiben über mehrere Rollen am Kopf vorbeigeführt.
 Es gibt auch eine „rasenfreie“ Aufzeichnung extrem hoher Speicherdichte möglich.
 Seit 2005 (DLT-S4) werden mindestens 448 Spuren benutzt. Kapazität liegt bei einigen TByte, die Datenrate ≥120 MByte/s.



Bandbibliotheken und überlappende Speicherung



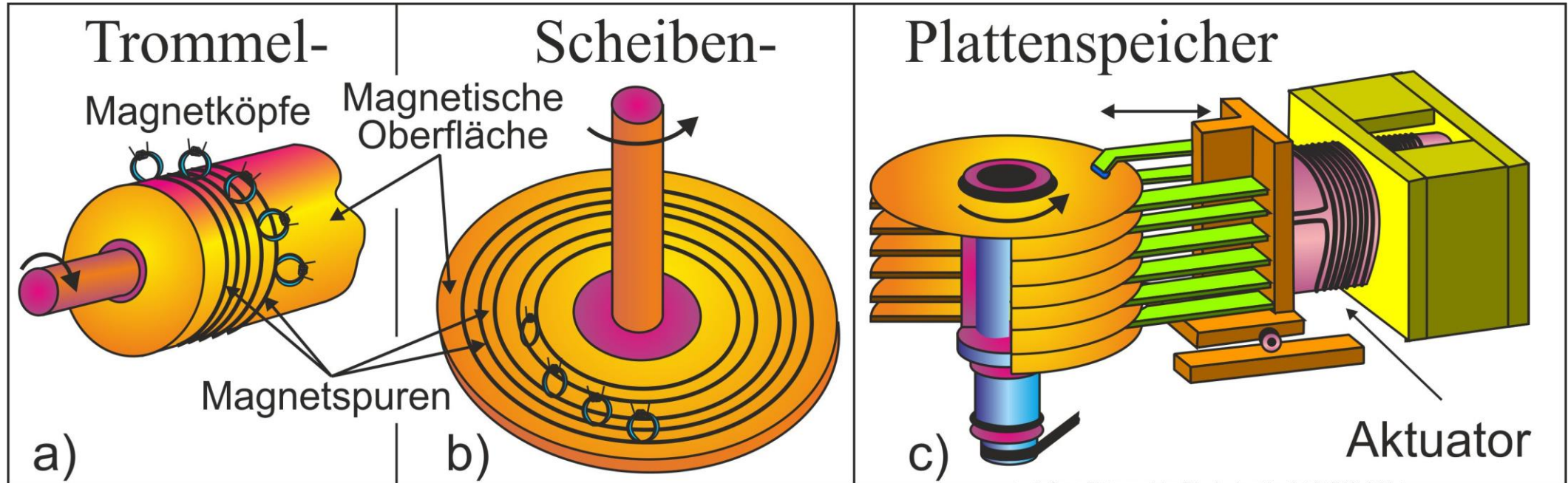
Die geschichtliche Entwicklung



Rotierende Magnetspeicher

Mit rotierenden Speichern ergeben sich deutlich andere Techniken. Das Prinzip wurde schon sehr früh bei akustischen Wasserspielen, Orgelwerken, Spieluhren, Musikautomaten usw. verwendet. Bereits 1929 besaß Tauschek mehrere Patente für Schrift lesende Maschinen und Trommelspeicher.

Ab 1947 waren derartige Massenspeicher bei Rechnern im Einsatz. Das Deutsche Patentamt erteilte erst Juni 1957 das Patent für eine Anmeldung von Dirks vom 17.6.1943.



Bei ihnen wird kein Kopfkontakt benutzt. Die Spuren liegen recht dicht nebeneinander, daher sind die Köpfe rundherum angebracht (a). Jeder Kopf besitzt seinen eigenen Aufzeichnungs- und Wiedergabeverstärker. Daher sehr schneller Zugriff auf alle Daten. Maximal muss eine Trommelumdrehung gewartet werden. Geräte waren 1947 bis in die 1970er Jahre umfangreich eingesetzt

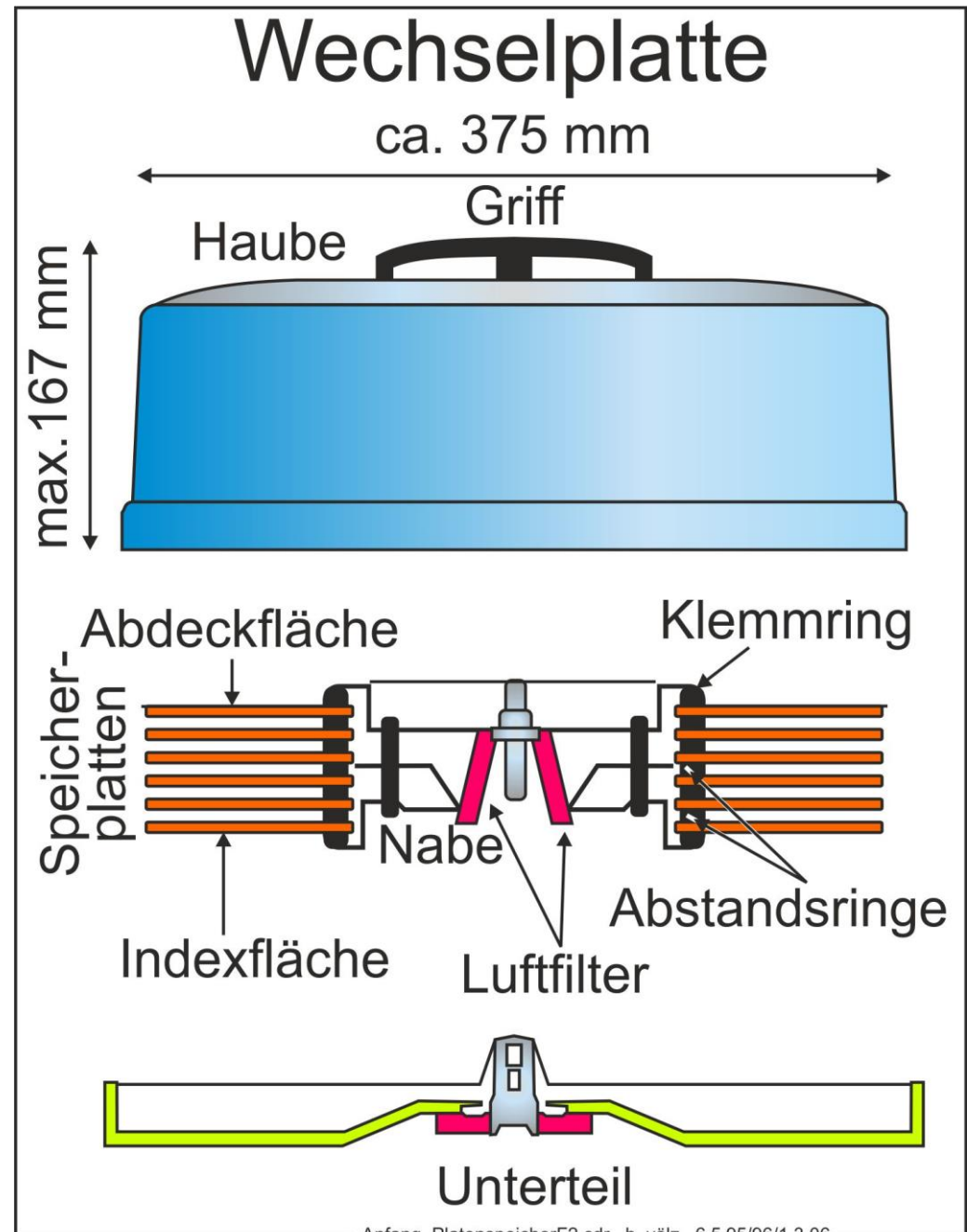
Um 1964 schuf dann Burroughs den deutlich anderen Scheibenspeicher (b)

Der **Plattenspeicher** (c) besitzt mehrere Platten, Je Plattenseite existiert nur ein Kopf, der mittels eines Antriebes (actuator) auf die gewünschte Spur bewegt wird. Der erste leistungsfähige Plattenspeicher wurde 1956 als RAMAC (random access method of accounting and control) von Reynold B. Johnson in San Jose entwickelt und für den Rechner IBM 350 eingesetzt. 50 Platten, 24 Zoll (61 cm) Durchmesser, Kapazität ca. 0,1 Mbyte, Flughöhe der Köpfe 30 µm. Je Plattenseite gab es 100 Spuren mit je 50 Zeichen.

Wechselplatten-Speicher

Große Verbreitung erlangte der Wechselplattenspeicher. Bei ihm sind die Speicherplatten zu einer Spindel (Stapel) zusammengefasst. Sie kann auf einem Unterteil gelagert und durch die Haube geschützt als Einheit transportiert werden. Im Betrieb wird sie in den Speichermodul eingesetzt. Wenn sie dort die Soll Drehzahl (1 500, 2 400 oder 3 600 UpM) erreicht hat, werden die Köpfe mittels einer Tauchspule (voice-coil) zwischen die Platten geschoben und anschließend gegen das entstehende Luftpolster möglichst nahe an die Plattenoberfläche gepresst. Die Abstandsregelung bewirkt dabei ein Gleiter, ähnlich wie bei der Festplatte beschrieben (s. u.). Der mittlere Flugabstand beträgt $\approx 5 \mu\text{m}$.

Die Anwendung begann 1961 mit der IBM 1311. Auf 6 Platten zu 14 Zoll wurden 3,65 MByte erreicht. Bereits 1965 erschien der IBM 2314 als 10-Plattenspeicher mit 29 MByte. Solche Systeme waren bis Mitte der 1980er Jahre in Rechenzentren im Einsatz.



Winchester-Technologie = Festplatte bzw. hard disc

Eine neue Qualität der Plattenspeichertechnik erfolgte 1973 mit der Winchester-Technologie, später Festplatten genannt.

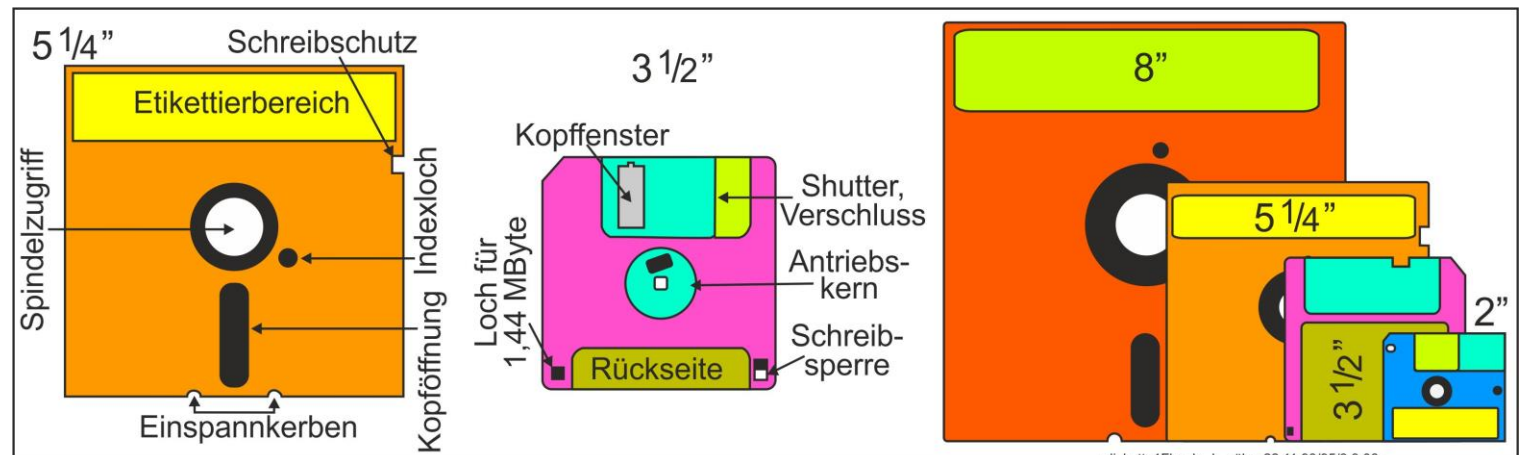
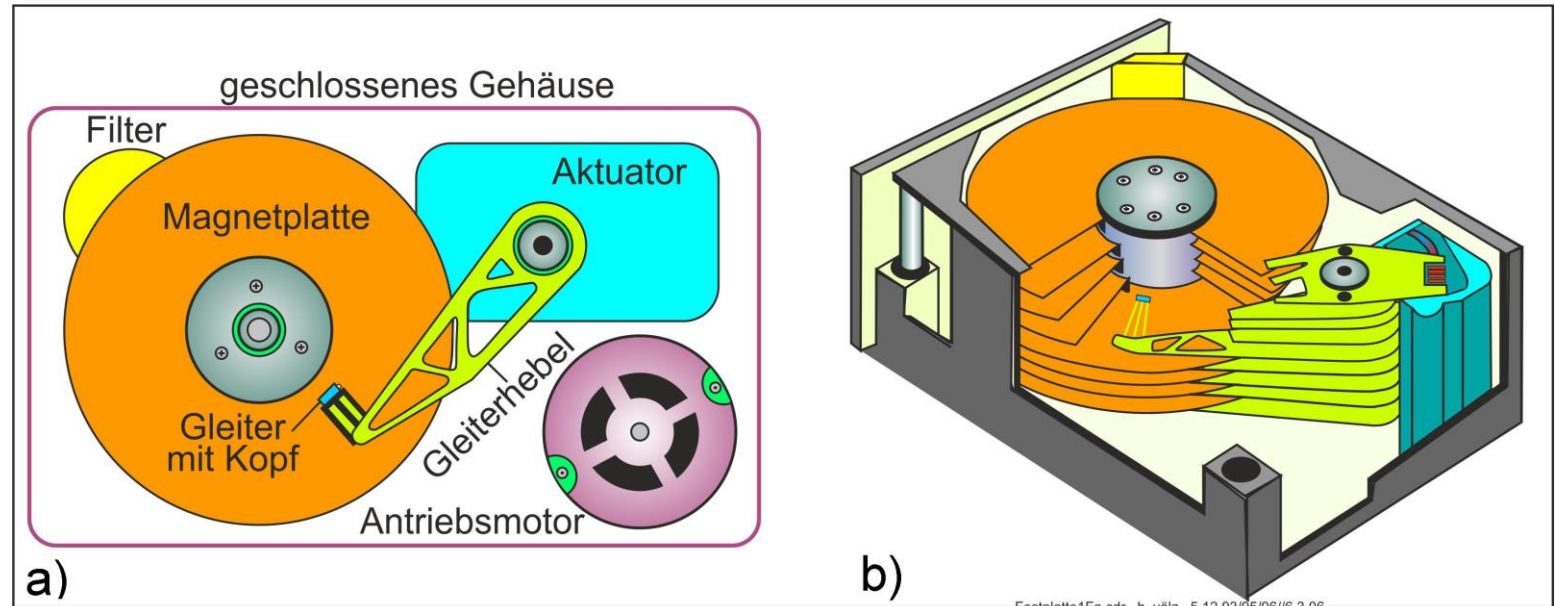
Zu Beginn sollten in einem hermetisch abgeschlossenen Gehäuse zwei Plattenstapel mit je 30 MByte enthalten sein.

Daher die geheime Entwicklungs-Bezeichnung 30-30, die zufällig mit der Nummer der berühmten Winchester-Gewehre übereinstimmt Ziel war u.a. den recht häufigen **Kopf-Crash** der Plattenspeicher durch Staub usw. mittels gründlich gefilterten Luftzutritts zu unterbinden.

Dadurch entfiel der Austausch des Plattenstapels. Es konnten nur noch komplette Geräte ausgewechselt werden.

Das war damals erträglich, weil 1969 Floppy (Disketten) mit 8 Zoll Durchmesser und 1972 bereits die 5¼-Disketten mit knapp 100 KByte entstanden waren. Sie wurden gewaltig weiterentwickelt und erreichten sogar TByte.

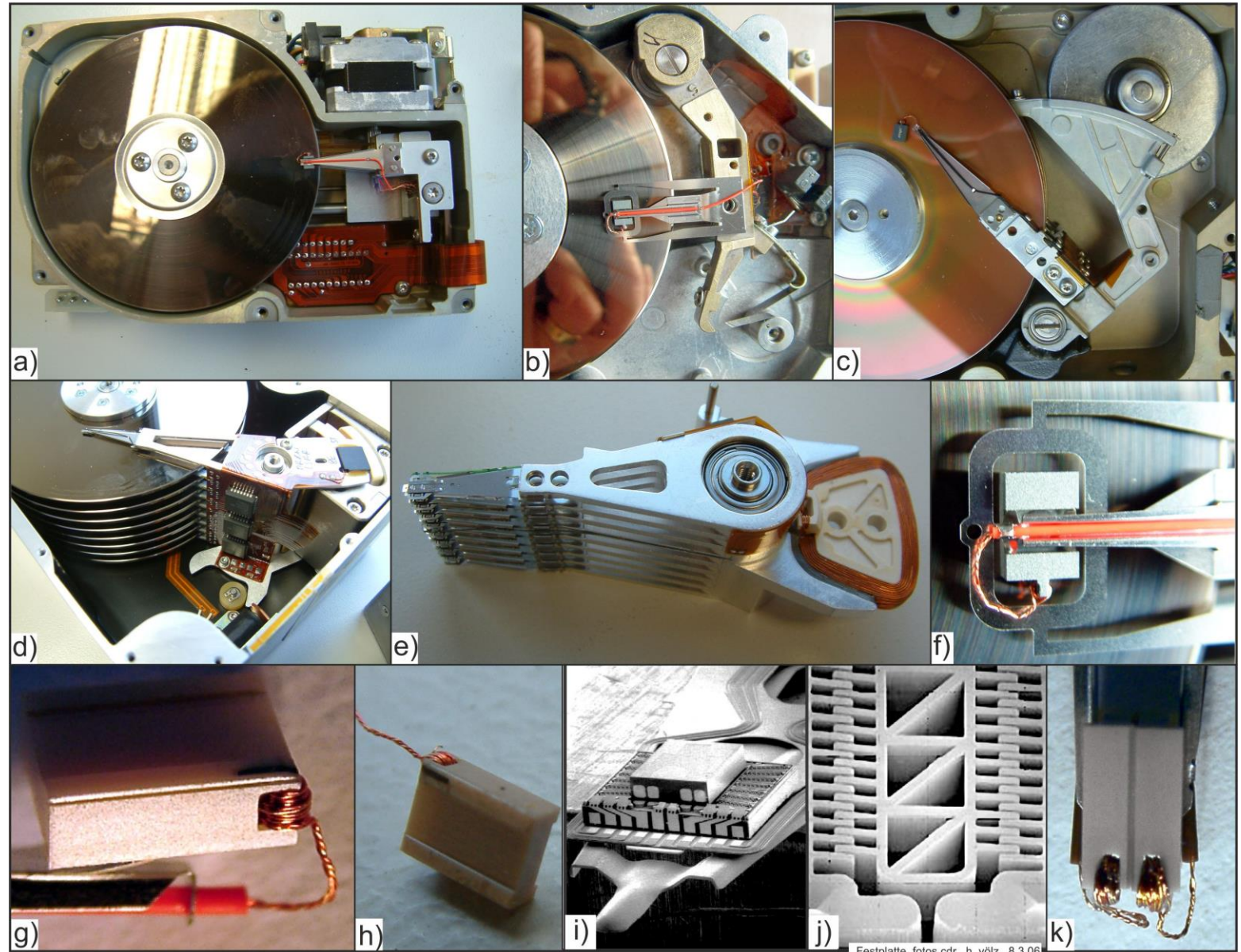
Sie waren lange die einzig übrig gebliebene Variante aller rotierenden Magnetspeicher, mit zwischenzeitlich großen Variantenreichtum.



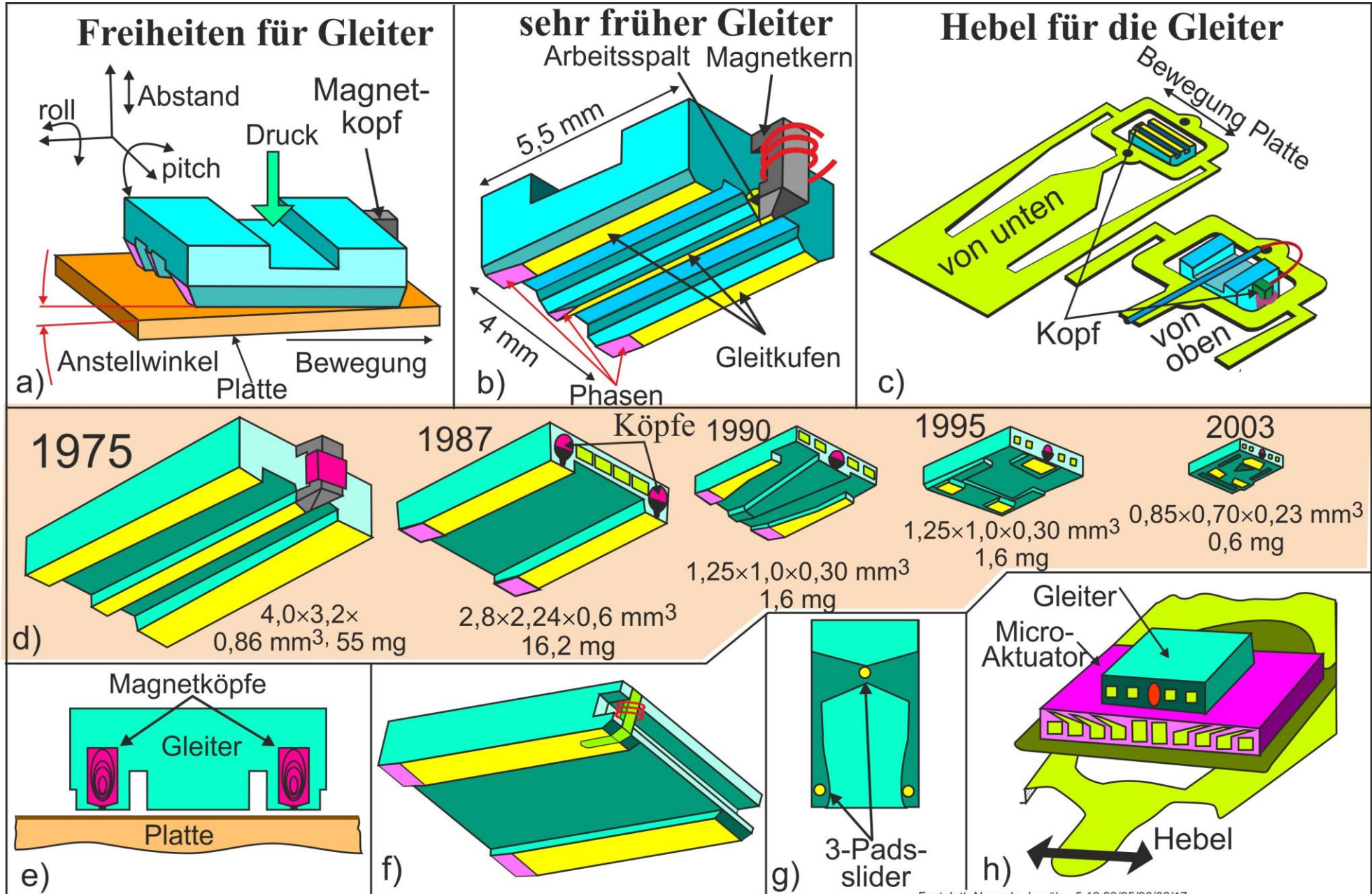
Die Antriebsmodi

Jeder Plattenspeicher benötigt 2 Antriebe: Antriebsmotor für die Rotation des **Plattenstapels** und des **Aktuators** (Schrittmotor, voice-coil) zur Bewegung der Magnetköpfe auf die jeweilige Spur. Beide Systeme sind immer magnetisch, dennoch dürfen ihre Streufelder nicht den speichernden Plattenstapel beeinflussen. Deshalb befanden sie sich anfangs möglichst weit entfernt.

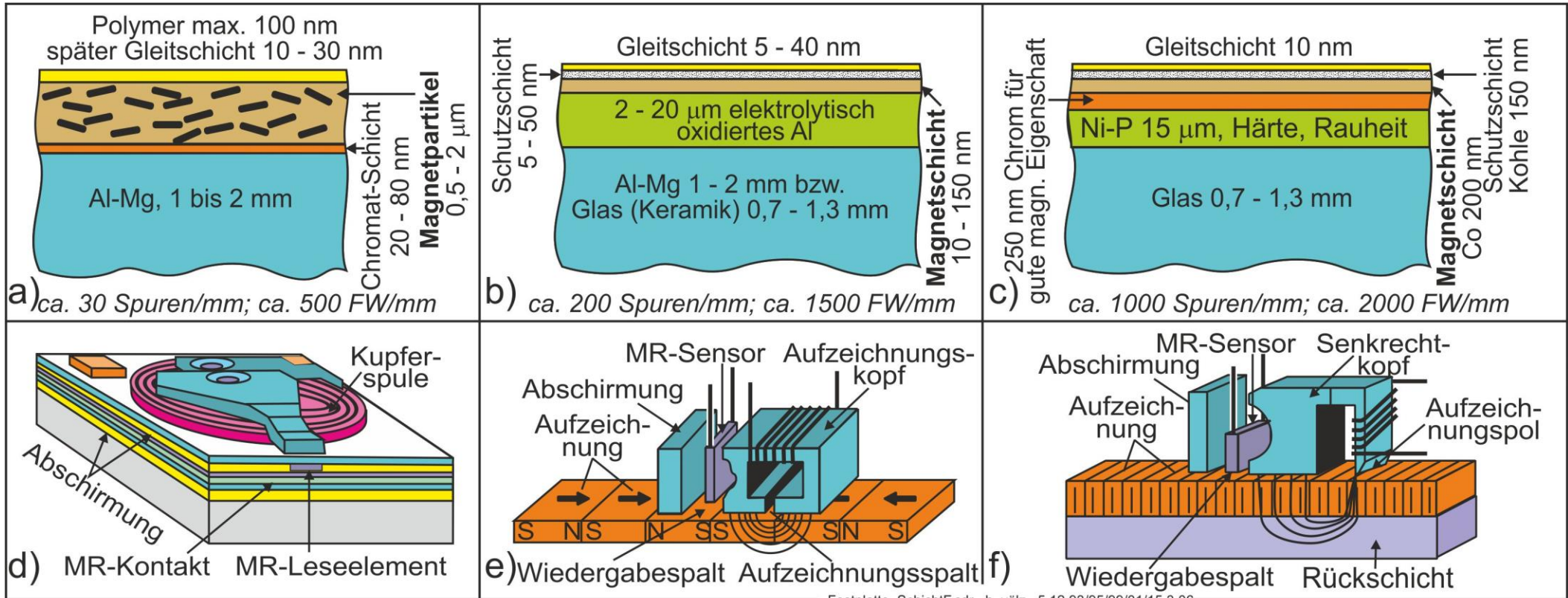
Komplexe Sonderkonstruktionen fügten den Motor in das Innere des Plattenstapels. Zur Kopfsteuerung entstanden mehrere Varianten: einige Beispiele zeigen Fotos. In a) bewegt ein Schrittmotor (rechts oben) den Kopf in guter Parallelführung über die Plattenstapel. Bei b) treibt der Schrittmotor (unten rechts) den Hebel für den Kopf über ein Stahlband an, leicht abgewandelt c). In d) ist der heute übliche, relativ einfache, tauchspulen-ähnliche Antrieb mit nur einer Drehachse für den Hebel zu sehen. Das Hebelsystem mit der angetriebenen Spule zeigt e). Zusätzlich sind im Bild noch einige Beispiele für die Gleiter f) bis h) und k) vorhanden. Bei ihnen sind recht gut die Spulen der noch klassischen Magnetköpfe zu sehen. 2006 kam von Hitachi noch Mikroaktuater TFC (thermal fly height control) zur Höhenregelung des Kopfes (i und j) hinzu.



Überblick zur Gleiter-Entwicklung



Schicht- und Kopfentwicklung



Innerhalb von etwa 50 Jahren stieg die Speicherkapazität auf das 10^8 -fache. auch die Speicherdichte nahm stark zu, Abmessungen ständig geinger Für eine Flughöhe bis zu 10 nm und weniger stark bei den Speicherschichten.

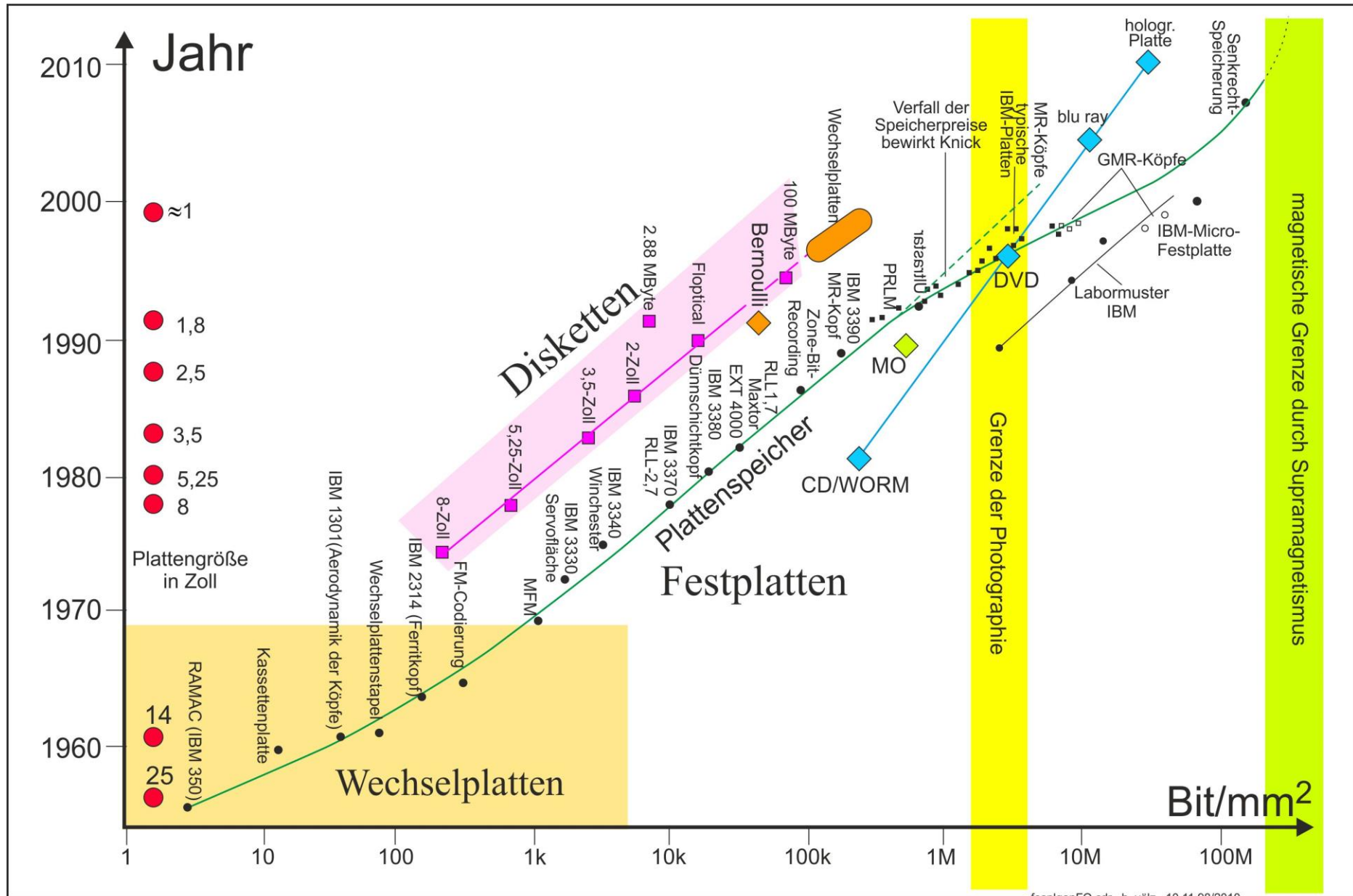
Ab 1980 entstanden **integrierte Köpfe**. Weitere Verbesserungen brachte die **magneto-resistive Wiedergabe (1992)** und ab **1997 stark verbessert als GMR (giant magneto-resistive)**.

2003 erfolgte die Senkrechtspeicherung,

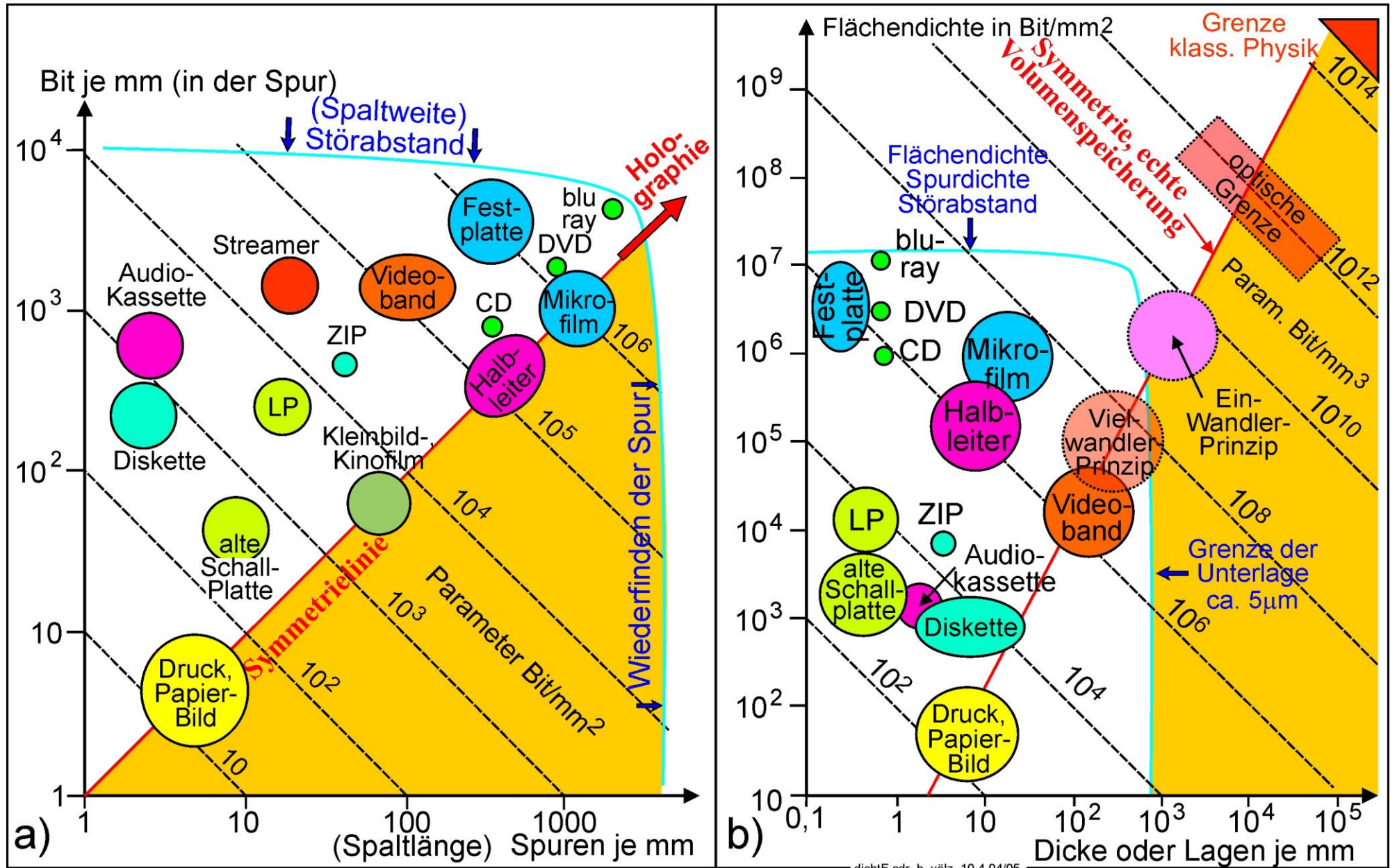
2013 shingled magnetic recording (Kopfspalt schräg, kein Rasen),

2017 die HAMR (heat assisted magnetic recording) mit Laser-Erhitzung, wirksame Spalllänge verkürzt und höhere Datensicherheit

Entwicklung der Daten



Speicherdaten und -grenzen



Zu den Grenzen

Energie der Speicherzelle $E_{min} \geq k \cdot T \cdot \ln(2)$, Kantenlänge ≥ 25 nm des kleinstmöglichen würfelförmigen Volumens. Folgt Speicherdichte $\leq 10^{22}$ Bit/m³
 Grenzwerte technisch kaum zu erfüllen, daher Redundanzen unumgängliche. Zudem noch auf Oberfläche begrenzt. Möglich Holografie im Volumen
 (später) zugriff aber üblich längs eines Weges. Neue Variante überlappende Schrägspuren (s. o.),
 Spurbreite viel größer als die Längsspeicherdichte. In Spurrichtung (Längsspeicherdichte) verlangt Störabstandes der Signale etwa 10^4 Bit/mm.
 Grenze quer zu den Spuren in einigen Sonderfällen (z. B. bei Mikrofilm und DVD) etwa 1000 Spuren je mm möglich
 In der Tiefe erforderliche „Unterlage“ (nm) zur notwendigen Dicke des Halbleitermaterials (mm). Die erreichte Flächenspeicherdichte ca. 10^7 Bit/mm²

Grenzen und Varianten der Speicherdichte; a) Flächen- und b) Volumenredundanz.

| Online-Medien | Offline-Medien |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • besitzen die komplette Technik zum Aufzeichnen und Wiedergeben z. B. Halbleiterspeicher und Festsplatten, • werden direkt, ohne zusätzliche Technik betrieben, • besitzen meist schnellen Zugriff, • verlangen größeres (redundantes) Volumen/Bit | <ul style="list-style-type: none"> • benötigen ein zusätzliches Gerät zum Speichern und Wiedergeben, z. B. Magnetbänder, Disketten, CD, DVD, • benutzen das Volumen vorteilhaft zur Speicherung aus und sind daher wichtig zur Archivierung, vergrößern gewaltig die Speicherkapazität (Datenbanken) • durch die Trennung vom Gerät sind sie sehr gut für den Datenschutz geeignet (wegschließen!), • sie haben längere Zugriffszeiten, zumindest bezüglich des Auswechselns des Mediums, • es besteht die Gefahr des moralischen Verschleißes der Geräte. |

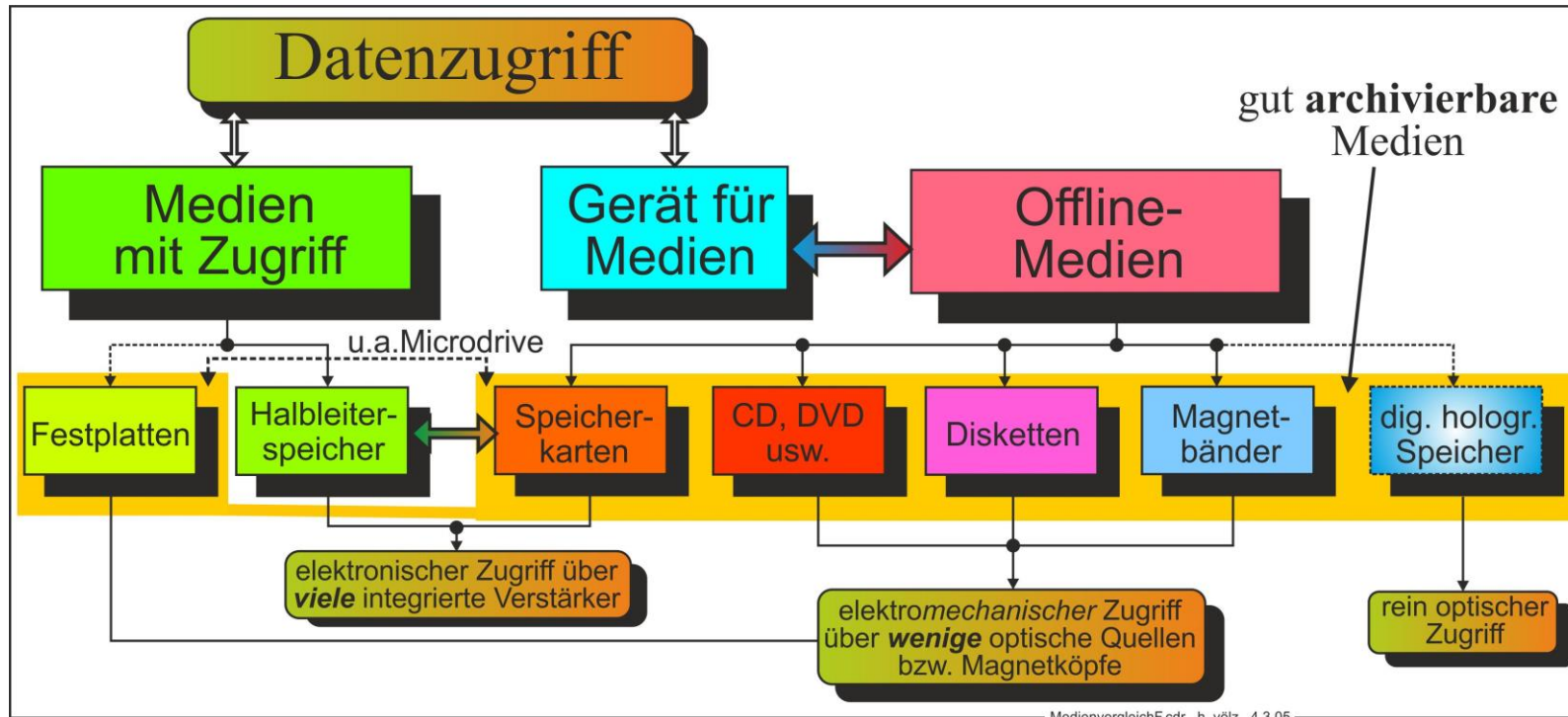


Bild 83. Die verschiedenen Speicherverfahren aus Sicht von On- und Offline Medien.

Für Speicherdichte sind die Unterschiede von **Trommel, Platte und Band** zu analysieren.

Beachten „eigentlich“ Archiv-Volumen mit Verpackung (Quader) usw.

Für Speicherung nutzbarer Oberfläche zum Volumen des Speichers wichtig: Zylinder und Trommel sind Länge l und ihr Radius r

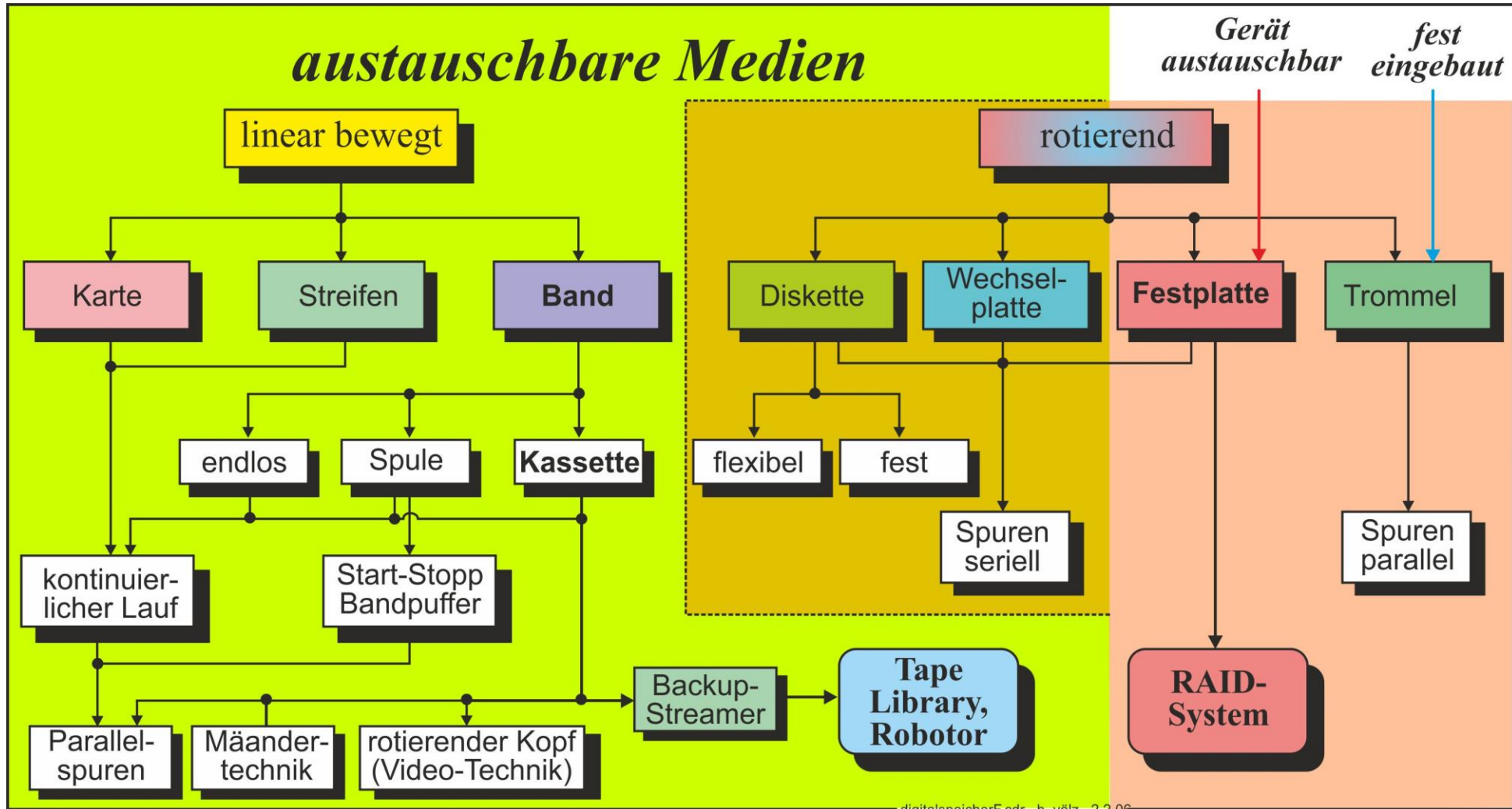
Bei der Platte und dem Band Dicke d der Platte bzw. des Bandes und b die Breite des Bandes. Ferner benutzter Außenradius r_a und Innenradius r_i

Übliche Werte sind etwa $r_i \approx 0,3 \cdot r_a$, also $(r_i/r_a)^2; \approx 0,1$. So ergibt sich für Tabelle und Band etwa der gleiche Wert.

| | Zylinder | Platte | Band |
|-----------------------|-----------------------------------|---|---|
| Volumen (ohne Archiv) | $V = \pi \cdot r^2 \cdot l$ | $V = \pi \cdot r_a^2 \cdot d$ | $V = \pi \cdot r_a^2 \cdot b$ |
| Oberfläche | $O = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ | $O = \pi \cdot (r_a^2 - r_i^2)$ | $O = \frac{\pi \cdot b}{d} \cdot (r_a^2 - r_i^2)$ |
| Oberfläche/Volumen | $\frac{O}{V} = \frac{2}{r}$ | $\frac{O}{V} = \frac{1}{d} \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2\right) \approx \frac{0,9}{d}$ | |

Austauschbare Medien

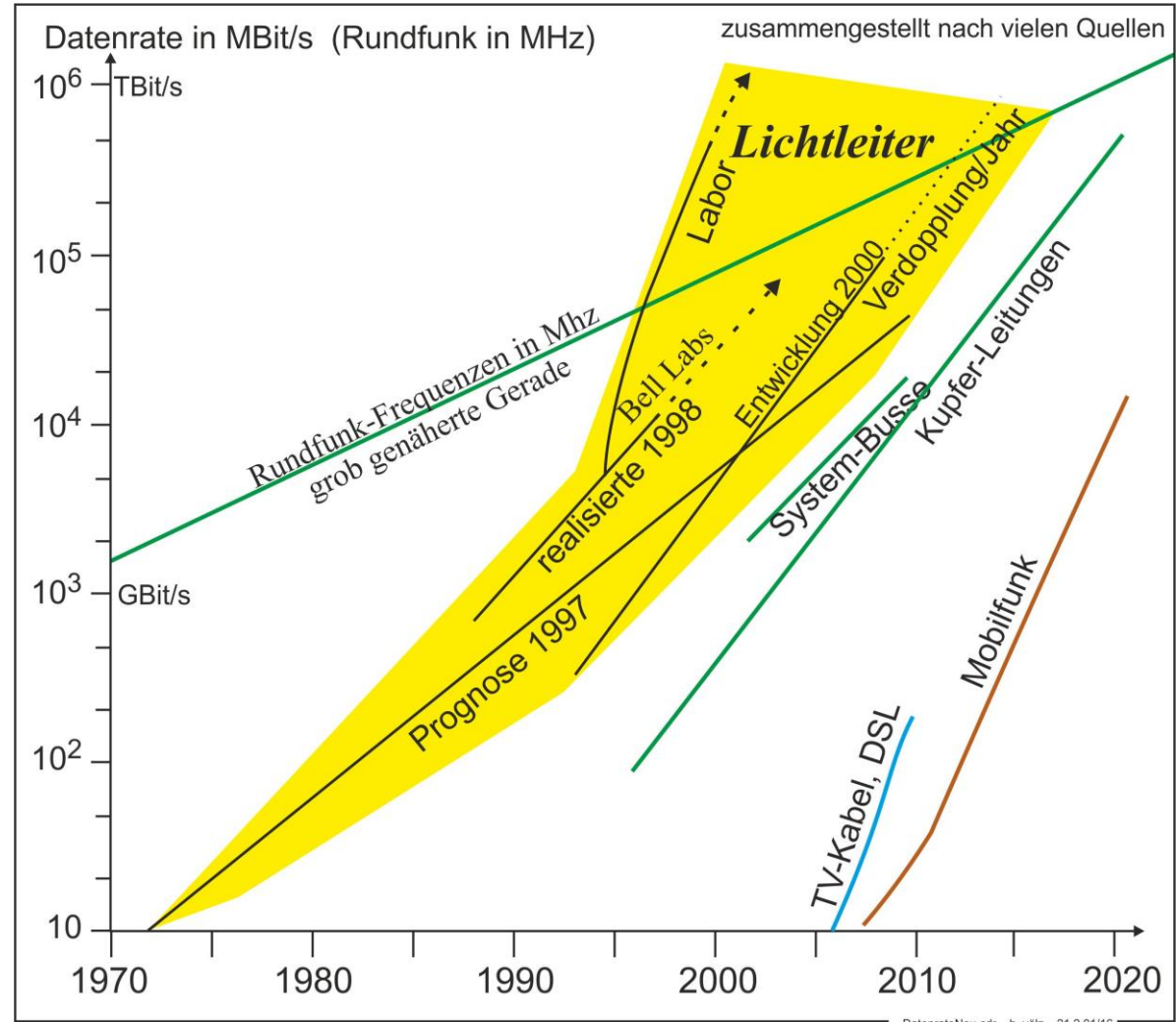
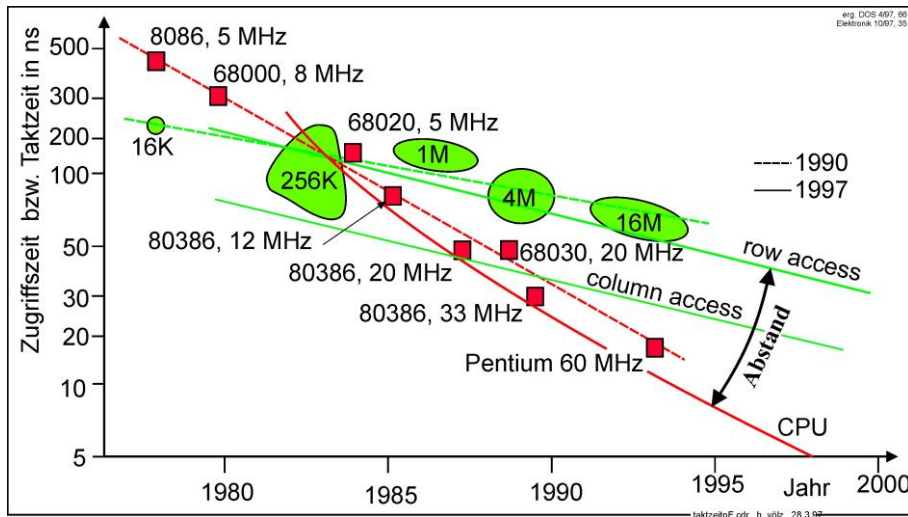
Mathematische Ableitungen des Verhältnisses für die Platte und das Band zeigen im Gegensatz zur intuitiven Anschauung keinen Unterschied. Der ergibt sich erst aus einer genaueren Analyse. Die **Mindestdicke** d der Platte wird auf ihre hinreichende Stabilität festgelegt: etwa $d \geq 1 \text{ mm}$ Band ist dagegen die Dicke nur durch die maximale Windungszahl des Wickels und somit die Länge des Bandes begrenzt. $d \leq 50 \text{ }\mu\text{m}$



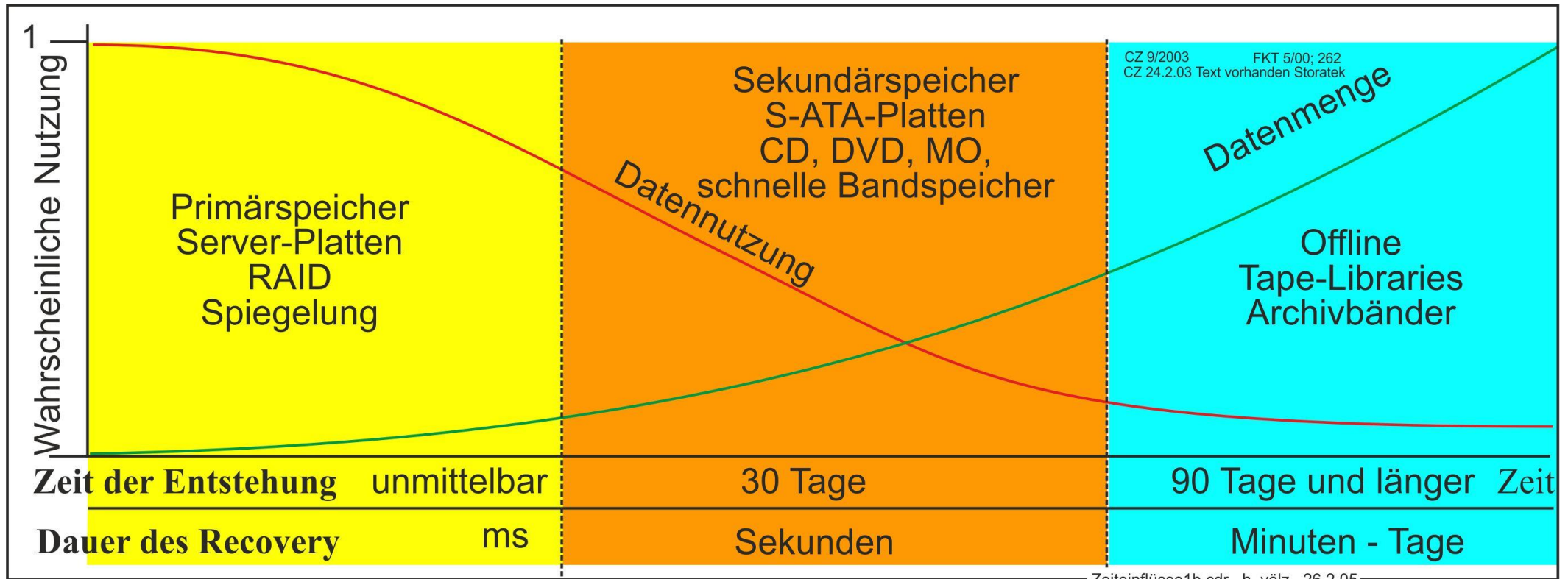
digitalspeicherF.cdr h. völz 2.2.06

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

Zugriffe



Backup - Archiv



Für den Umgang mit den Daten (backup) sind mehrere Bezeichnungen üblich, z. B. Hierarchisches Speicher-Management, Highend Storage Management (HSM), Information-Lifecycle-Management (ILM), Direct Attached Storage (DAS), Hierarchical One Volume Manager (OVM-H) und Storage Area Networks (SAN).

Den typischen dreistufigen Ablauf zeigt das Bild.

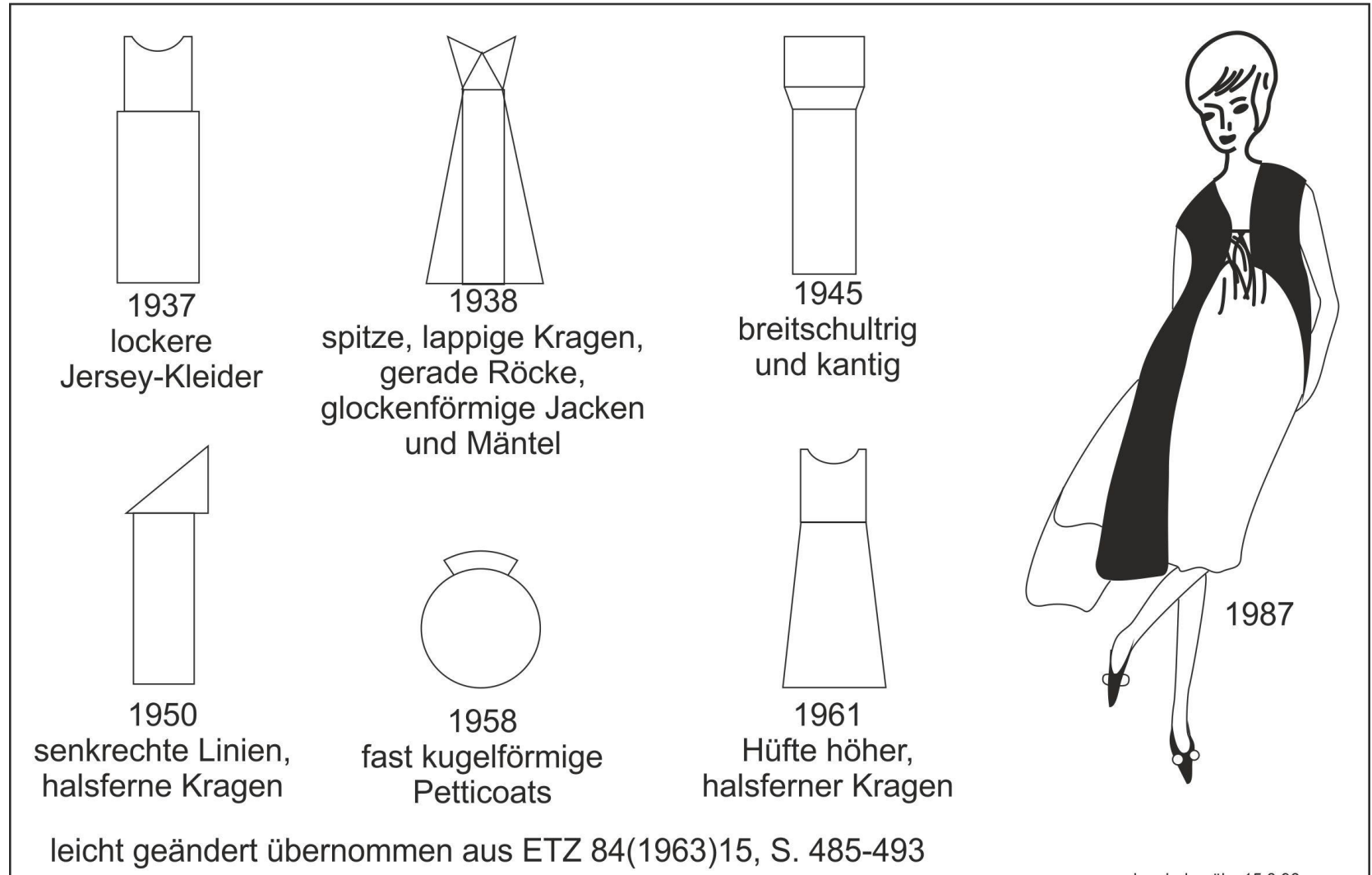
Die Aktualität und Art der Daten bestimmen ihre Einordnung in drei Stufen.

1. Solange an einem Projekt gearbeitet wird, muss es möglich sein, sehr schnell auf alle notwendigen Daten zuzugreifen. Deshalb werden sie im ersten (gelb gezeichneten) RAID-Bereich gehalten.
2. Wenn noch zuweilen Änderungen erfolgen, z. B. zu einer nachträglichen Korrektur, dann genügt der langsamere (braun gezeichnete) Zugriff.
3. Ist die Produktion beendet, dann bedeutet z. B. die für Rückfragen recht lange Zugriffszeit keine Schwierigkeit.

Eventuell zukünftige Speicher

Die Vielfalt der Speicher nahm seit den 1970er Jahren ständig ab. Dennoch könnten für die Zukunft neue Speicherarten wirksam werden. Sie dürften vor allem zur Ergänzung und sogar Ablösung der sRAM und dRAM als neuartige rRAM (remanent) entstehen. Vor allem gegenüber dem Datenverlust beim Abschalten des Rechners oder einem Stromausfall, es entfielen die zeitaufwändigen Starts. Erforderlich wären auch neuartige Lösungen gegen Fremdzugriffe.

Diese Aussagen sind so unsicher, wie alle Prognosen (Latein. prognosis, im Voraus erkennen und prognosticare ahnen, vorhersagen, erheben). Ein Beispiel gab dabei qualitative (inhaltliche) Voraussagen deutlich unsicherer als quantitative Extrapolationen. Dazu gab bereits 1963 Steinbuch ein Beispiel, das eventuell auch als „Witz“ gemeint sein könnte. Es geht von typischen Modekleidern der Jahre 1937, 1938, 1945, 1950, 1958 und 1961 aus und berechnet ein Kleid für 1987.



Mit der angebrachten Vorsicht können die wahrscheinlich künftigen Speicherentwicklungen ausgehend vom Bild 89 eingeschätzt werden. Trotz der mehr als genügend vorhandenen Speicherkapazität wird seit etwa 20 Jahren intensiv an neuen Speichern geforscht. Z.T. existieren bereits Muster mit vielen MBit Speicherkapazität. Dabei gibt es vorwiegend drei Schwerpunkte:

Bild 89. *Überblick und Geschichte zu Varianten und Anwendungen der verschiedenen Speicher.*

- ROM-Speicher mit sehr **großer Kapazität und über Jahrhunderte** zuverlässig unveränderlichen Daten (gegen digital lost), z. B. in Glas eingebrennte Pixel, angeordnete Atome usw.
- Speicher sehr **großer Kapazität mit kurzer Zugriffszeit**. Ein Ansatz hierfür ist die digitale Holografie (Abschnitt 6.61). Aber auch der mechanische „Tausendfüßler“ von IBM und magnetische Wandverschiebungen werden in Laboren erprobt.
- Besonders wichtig könnte der Ersatz für sRAM und dRAM mit Datenerhalt ohne Betriebsspannung bzw. Refresh als **rRAM** (remant) in mehreren Varianten werden. Nur für sie werden im Folgenden kurz die wichtigsten Möglichkeiten und Eigenschaften beschrieben. Ausführlichere Ergebnisse etwa bis 2005 enthält u.a. [Völ07].

Die Erfahrung zeigt, dass oft nicht das technisch und/oder ökonomisch Beste, sondern sogar das Gegenteil breit eingeführt wird. Wesentlicher sind dabei das verfügbare Kapital des Konzerns und/oder die Macht der Manager. Für eine mögliche Nutzung sind vor allem FRAM, MRAM und PCRAM weit fortgeschritten. Sie sind deshalb in den Speicherüberblick von Bild 90 eingeordnet und bezüglich besonders wichtiger Daten in der Tabelle den dRAM, sRAM und Flash gegenübergestellt. So werden ihre Besonderheiten deutlich. Für die Einführung neuer Speicher ist zu beachten, dass die Bit-Preise der gebräuchlichen Arbeitsspeicher weiter sehr stark sinken. Darüber hinaus sind auch bereits weitere rRAM-Varianten umfangreich erprobt und untersucht. Teilweise stehen auch schon Muster zur Erprobung zur Verfügung. Im Folgenden werden für die bekannten rRAM die wichtigsten Besonderheiten und Eigenschaften kurz beschrieben. Ergänzt sei, dass Die Zugriffszeit bei der Wiedergabe bei allen Varianten, mit Ausnahme des dRAMs, bei 10 ns liegt.

Elektronische Speichern und RAM.

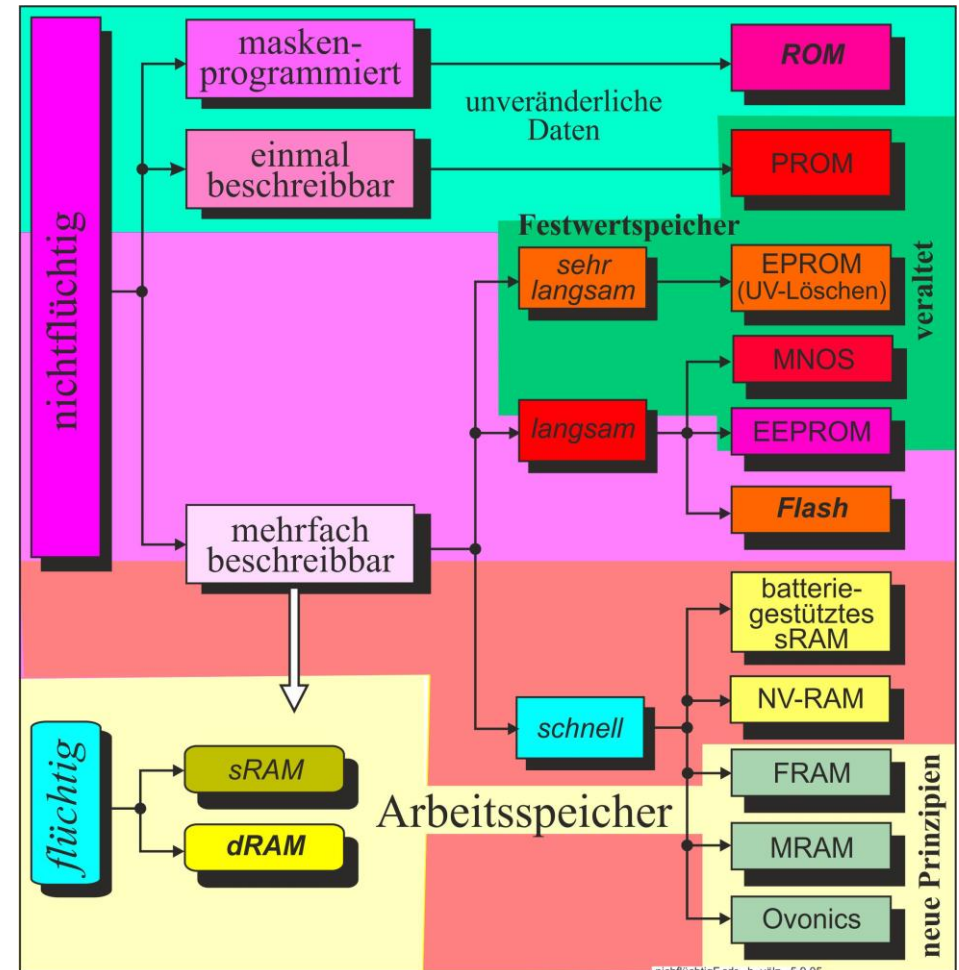
Ferroelektrische RAM

FRAM benutzen die remanente Ferroelektrizität bei Kondensatoren (Ladungsspeicherung)

teilweise durch Verschiebung der FET-Schwelle, bereits 1920 von J. Valasek beim Rosette-Salz nachgewiesen. 1955 wurden die ferroelektrischen Perovskit-Kristalle, u. a. PZT, entdeckt. Um 1970 begannen umfangreichere Forschungen, es waren >1 500 Ferroelektrika bekannt. Bald auch Folien (Kondensatormikrofon). Speicher ab 60er Jahren. Mit PZT (später SBT) 1993 erste 4 KBit-Speicher FRAM, **FeRAM**. 1999 256 kBit-Muster.

Zellgröße <1 μm^2 . Betriebsspannung $\leq 3\text{ V}$, Zugriffszeit $\leq 50\text{ ns}$

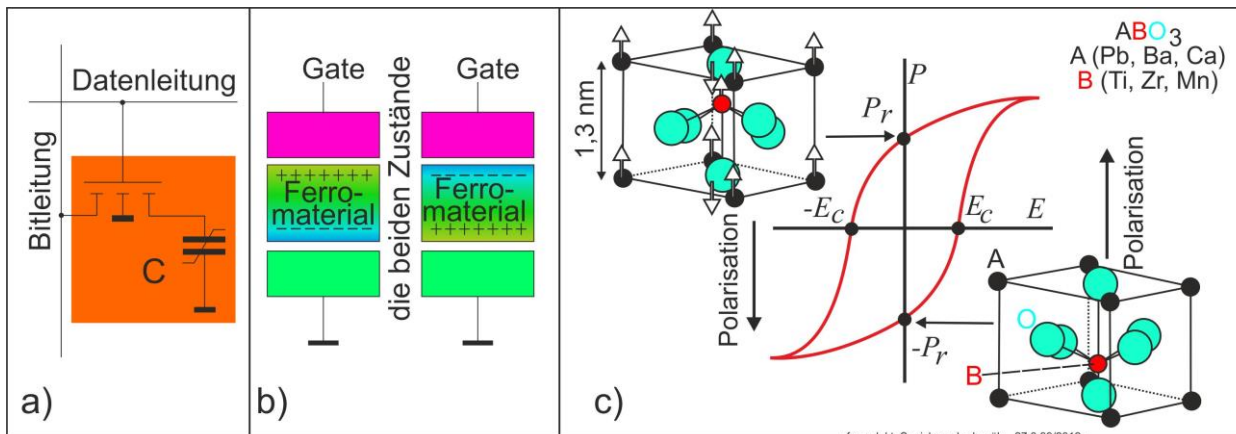
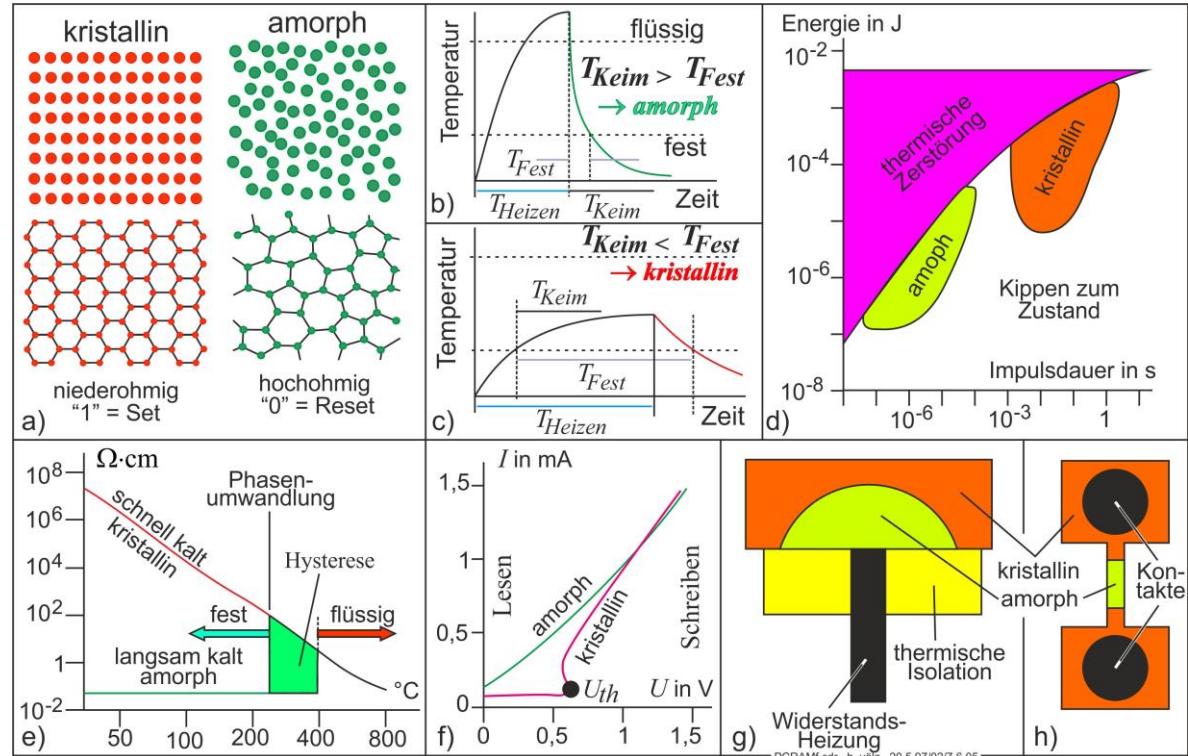
Es gab noch viele weitere Entwicklungen (s. das ist Information)



| | dRAM | sRAM | Flash | rRAM | | |
|---|----------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | FRAM | MRAM | PCRAM |
| Beständig ohne Energie | - | \pm | + | + | + | + |
| Aufzeichnung ohne Löschen | + | + | - | + | + | + |
| Zerstörungsfreies Auslesen | - | + | + | - | + | + |
| Oft 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 [$< \text{ns}$] | $< 0,1\ \mu\text{s}$ | $\approx 10\ \text{ns}$ | $> \mu\text{s}$ | $< 0,1\ \mu\text{s}$ | $< 0,1\ \mu\text{s}$ | $< 0,1\ \mu\text{s}$ |

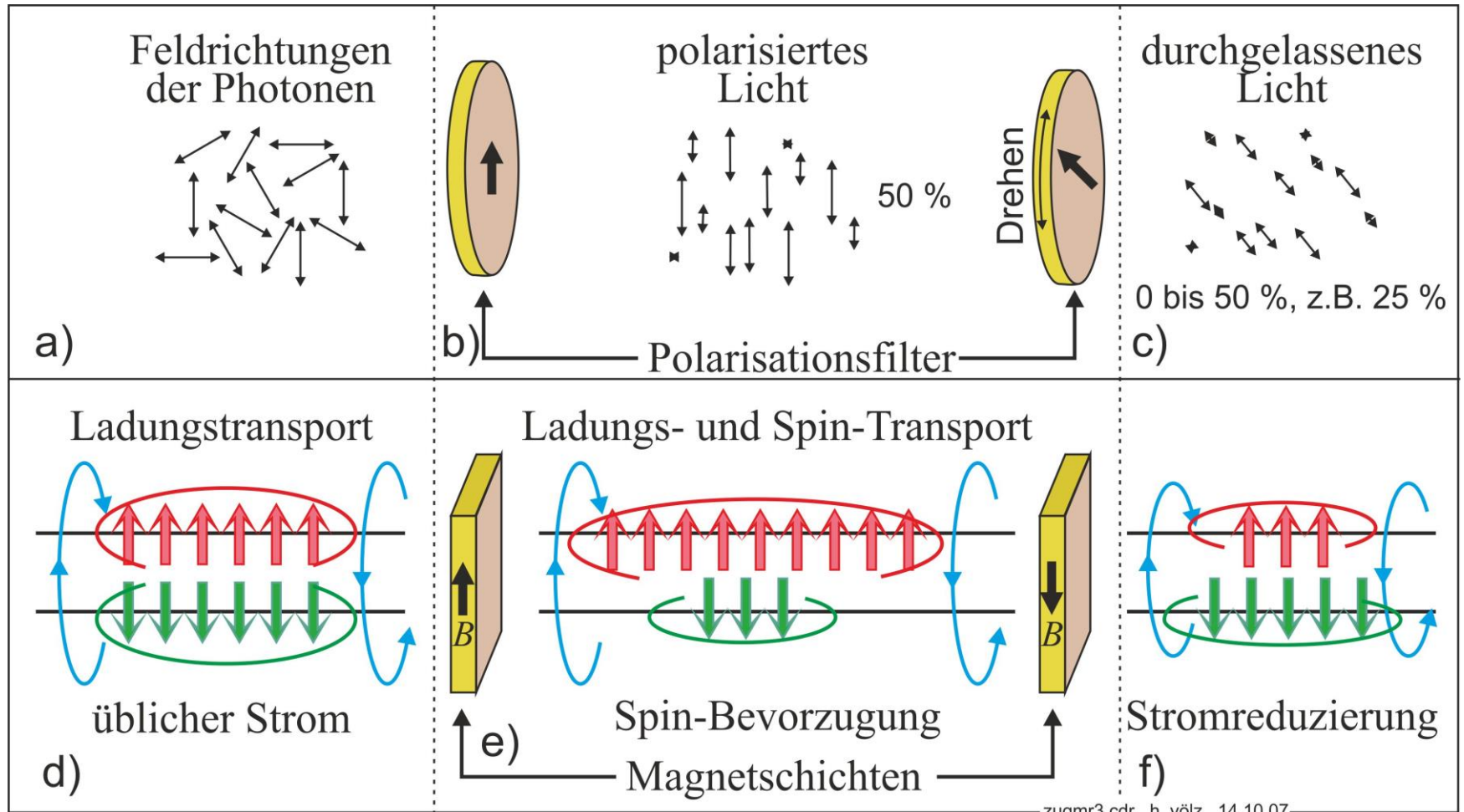
PCRAM, Ovonics usw.

Das **PCRAM** (phase change) benutzt den reversiblen Wechsel amorph \leftrightarrow kristallin. Dabei ändert sich der elektrische Widerstand der Bit-Zelle. Die Entwicklung begann um 1923, Ab 1965 erreichte Ovshinsky wesentliche neue Erkenntnisse. Selen-Verbindungen und organische Gläser. Heute werden Verbindungen und Gemische der Elemente Ge, Sb und Te bevorzugt. Eine erste nichtflüchtige chalcogenen Speicherzelle wurden 1970 von Gordon. E Moore, D. L. Nelson und R. G. Neal erfolgreich erprobt. Durch die wiederbeschreibbaren *optischen* Medien – CD-RW von Matsushita 1990 und deren Weiterentwicklung zur DVD-RW – wurden bessere Materialien gefunden.



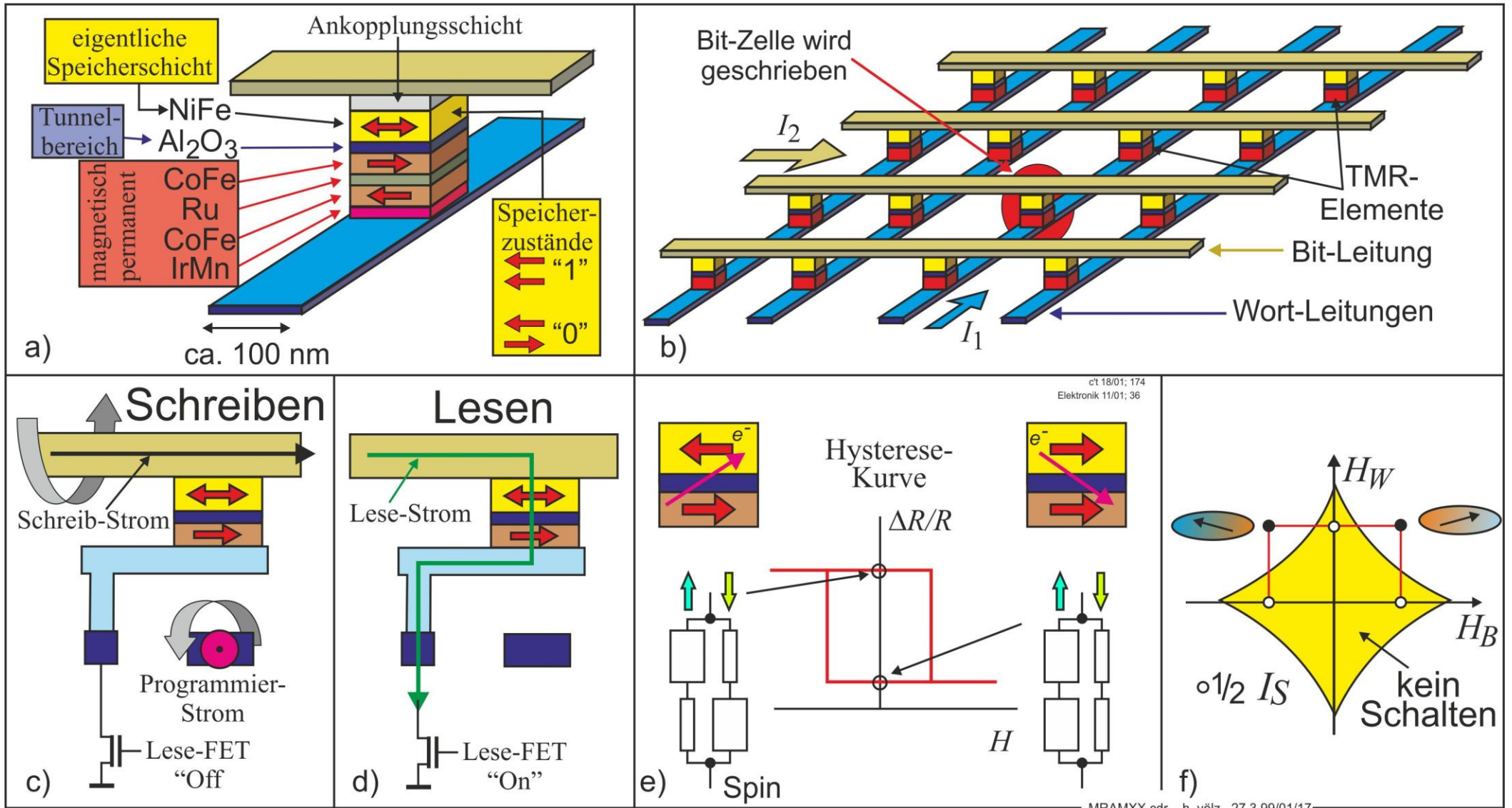
Magnetische RAM

Ein MRAM benutzt noch komplexere und seltener auftretende quantenphysikalisch magnetische Effekte als die **ferromagnetische Hysterese**. Um Details ihrer Beschreibung zu umgehen, sei von einer Analogie zum Licht ausgegangen. Selbst bei monochromatischem Licht zeigen die elektrischen Vektoren der elektromagnetischen Schwingungen in alle möglichen Richtungen (Bild 93a). Hinter einem Polarisationsfilter sind nur noch die Komponenten der festgelegten Richtung vorhanden (b). Ein



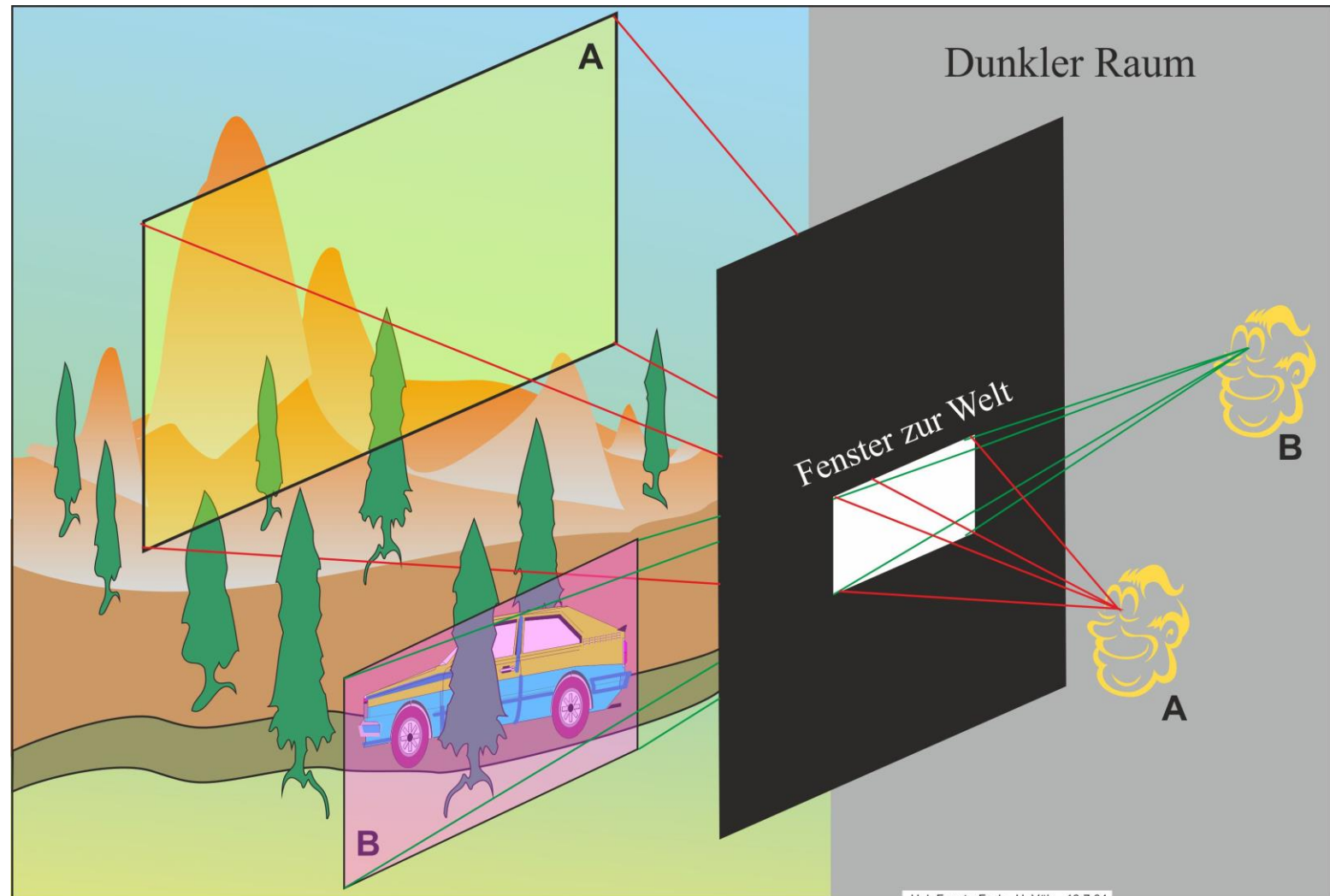
zugmr3.cdr h. vözl 14.10.07

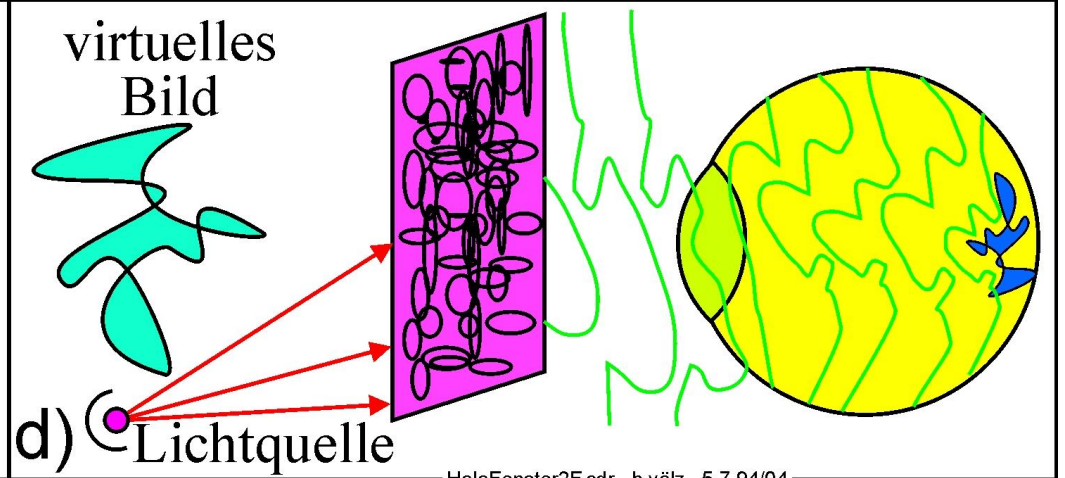
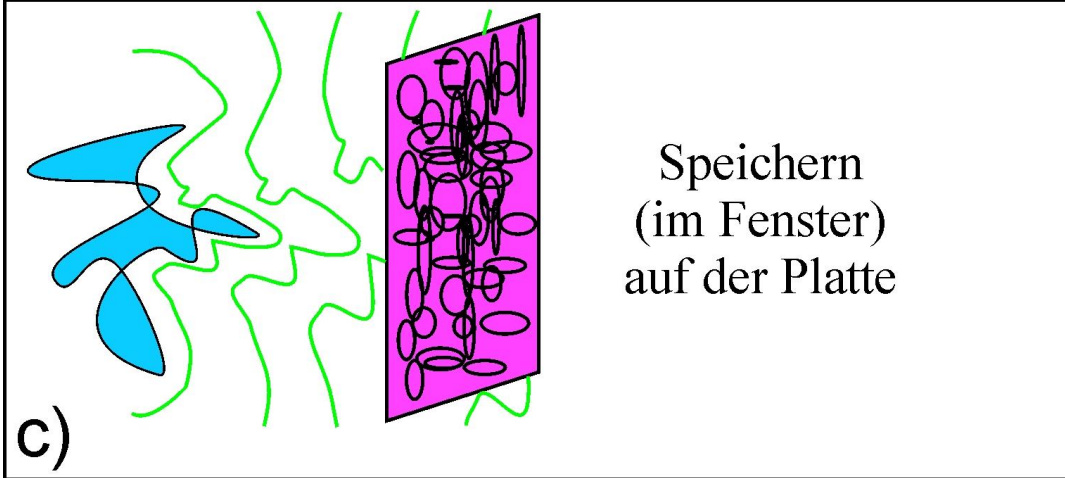
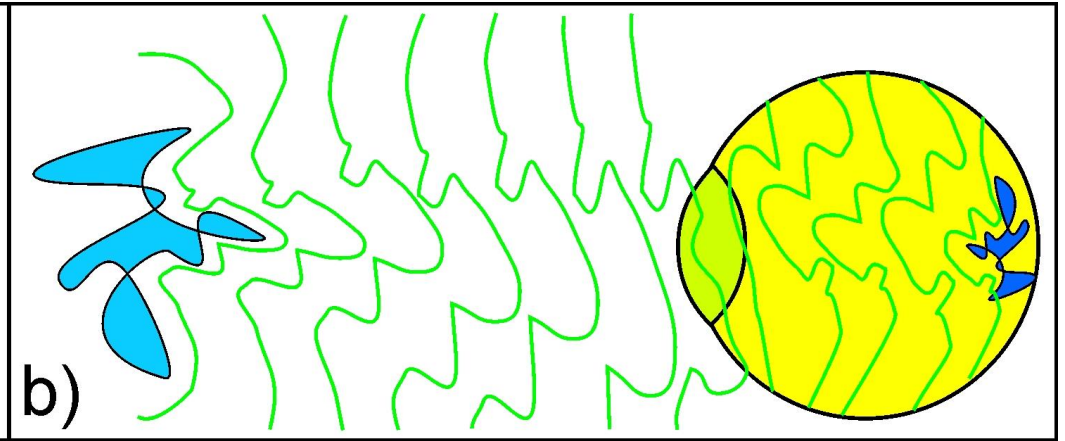
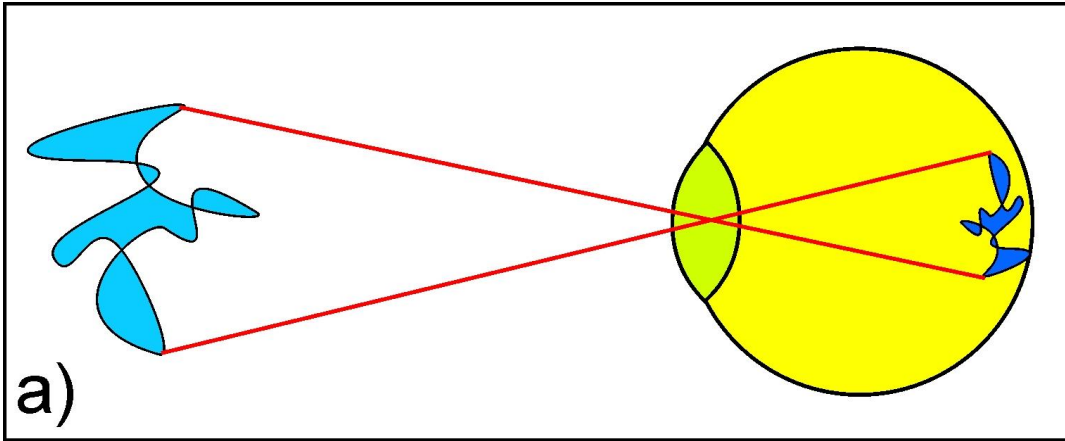
zweites Polarisationsfilter selektiert davon nur die Komponenten seiner eingestellten Richtung aus c). In einem üblichen elektrischen Strom treten die spin-up- und spin-down-Elektronen gleich häufig auf d). Mit speziellen Magnetschichten kann bewirkt werden, dass eine Spin-Richtung bevorzugt ist. Dabei ändern einige Elektronen ihren Zustand (e). Eine zweite anders orientierte Magnetschicht wirkt dann ähnlich, wie das zweite Polarisationsfilter. Nur einige Spins klappen erneut um. Dabei kommt es insgesamt zu einer Stromreduzierung f).

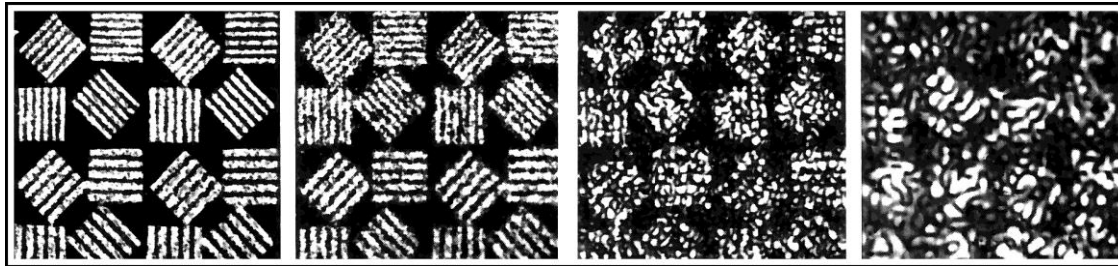
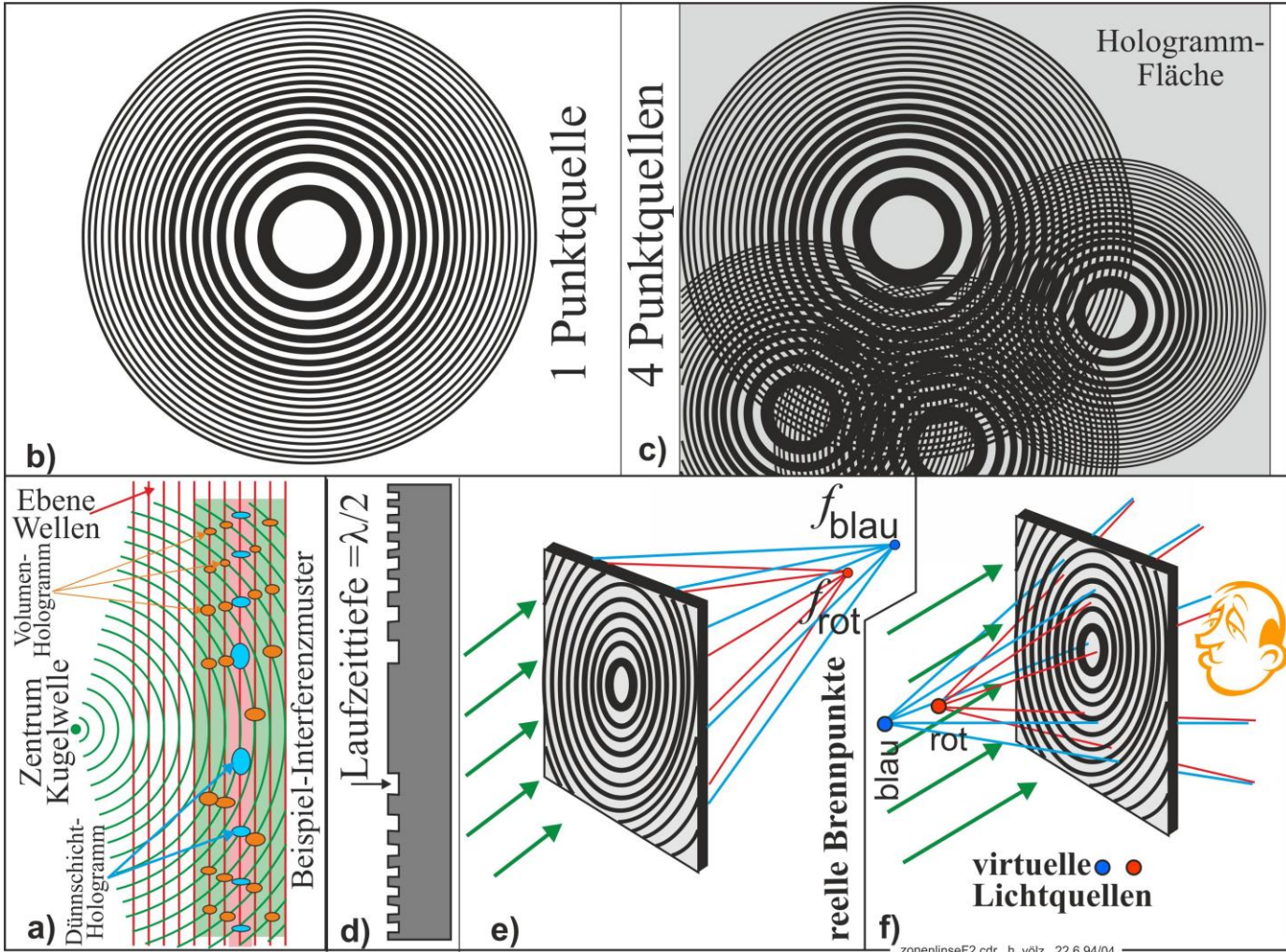


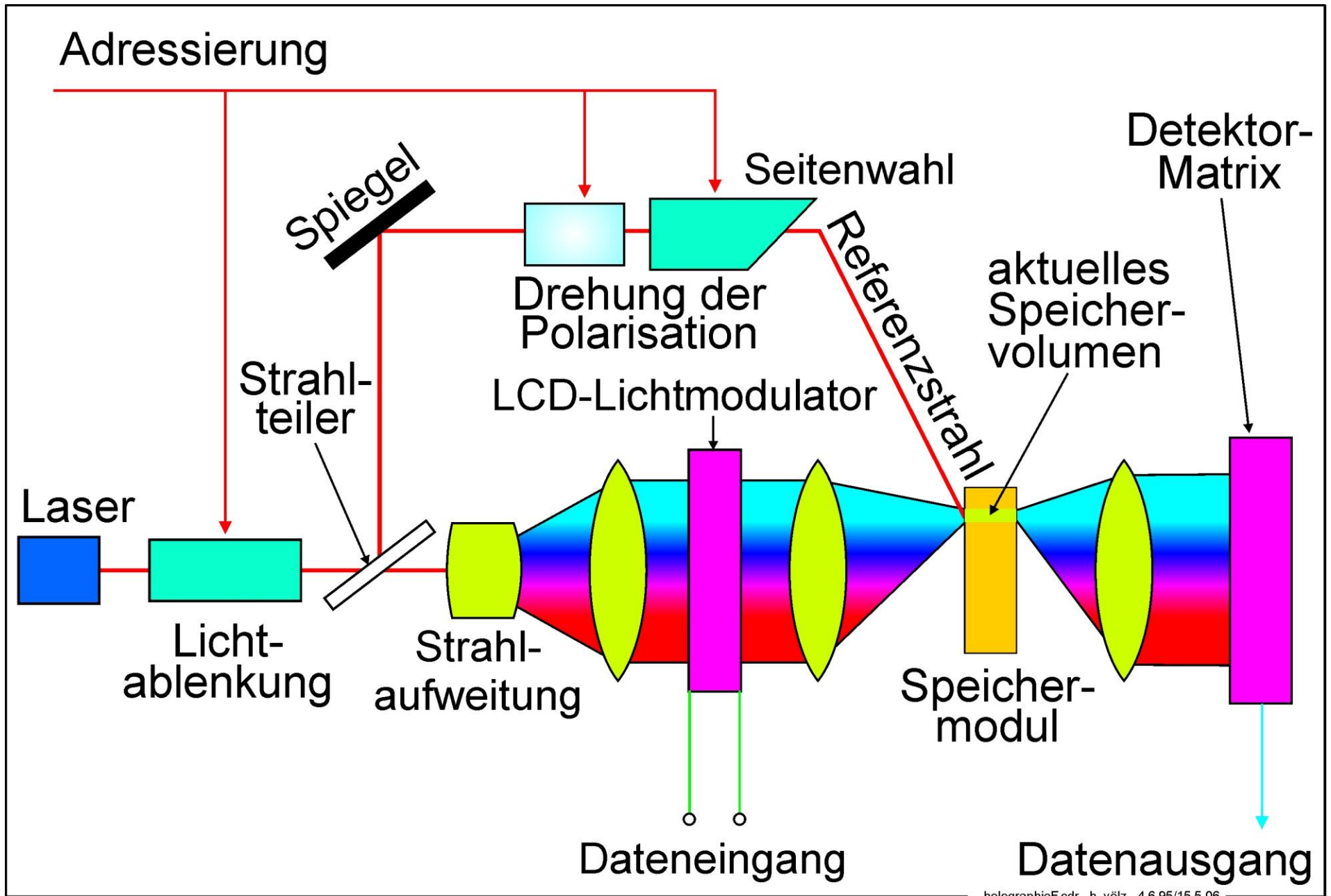
Holografie

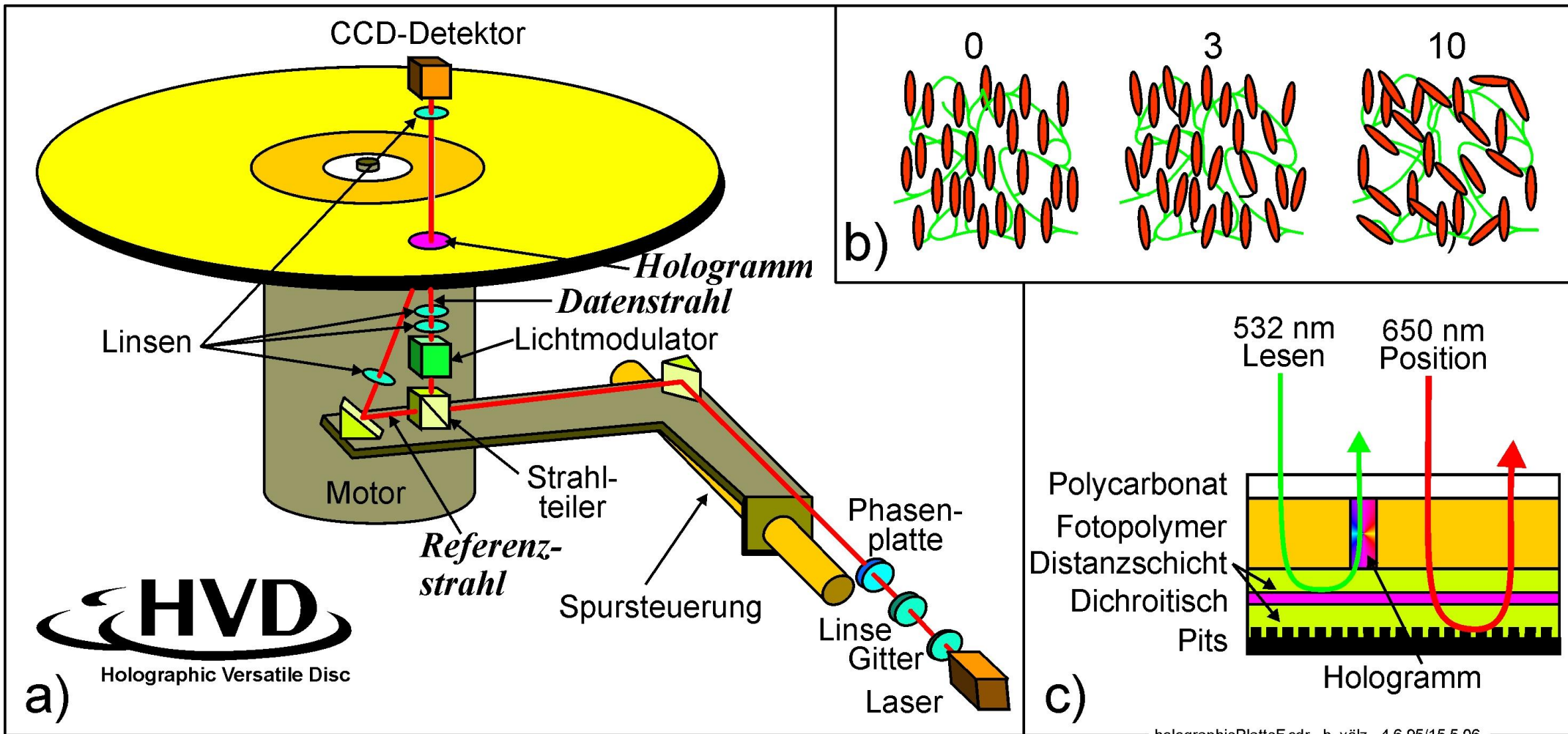
In guter Näherung kann ein Hologramm (griechisch holos ganz und gramma Geschriebenes) als ein Fenster zur Welt betrachtet werden (Bild 100). Je nachdem, wie dicht wir an dieses Fenster herantreten bzw. aus welcher Richtung wir hindurchschauen, sehen wir unterschiedliche Ausschnitte der Welt [Ern86], [Hei95], [Völ05]. Das Verständnis ihrer technischen Realisierung verlangt optische Kenntnisse. Von den drei Modellen (Strahlen-, Wellenoptik und Quantenphysik) ist hierfür die Wellenoptik von Huygens vorteilhaft. Sie besagt, dass sich von jedem leuchtenden oder beleuchteten Punkt eine Kugelwelle ausbreitet. Von der ganzen Oberfläche aus addieren sich diese Kugelwellen zu einer Wellenfront (Bild 101b), die sich von der Oberfläche fortbewegt. Beim Durchlaufen von Grenzflächen mit verschiedenen Brechungsindizes wird diese Wellenfront verformt. Das ist zwar weniger anschaulich als die meist verwendete Strahlenoptik, aber dennoch entsteht auf der Netzhaut das Abbild des blauen Objektes. So erfolgt die Speicherung des Wellenbildes beim Durchtritt das Fenster c), die dann bereits das Hologramm ist. Aus ihm allein kann indirekt mit nur einer Lichtquelle wieder die hindurch tretende Wellenfront und damit das Bild auf der Netzhaut erzeugt werden (d). Das Objekt ist dabei nicht mehr notwendig, wird aber dennoch deutlich gesehen. Auf der Platte ist aber nicht das (virtuelle) Bild des Originals. Es scheint im Raum (wie im Bild b) zu stehen. Zusätzlich ist dafür aber in der Wellenfront die vollständige (sichtbare) Welt hinter dem Fenster enthalten.











HVD.

Kurze Geschichte der Holografie

- 1948 Der Ungar Gábor 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 großen Weißlicht-Reflex-Volumenhologrammen
- 1962 GaAs-Injection-Laser von R.N. Hall sowie unabhängig von M. I. Nathan
- 1963 Pieter J. van Heerden schlägt dreidimensionalen holografischen Speicher vor
- 1963 Erste öffentliche Hologrammvorführung von E. N. Leith und J. Upatnieks
- 1965 Farbhologramme mit mehrfarbigen Lasern durch B. T. Cathy
- 1969 Steve Benton erfindet das Regenbogen-Hologramm
- 1970 ca. erste Versuche zur digital-holografischen Speicherung
- 1973 Jan Rajchmann demonstriert einen holografischen Speicher für Rechner
- 1984 11·10⁶ Exemplare des Märzheftes der „Geographic“ mit großem Hologramm eines Adlers
- 2006 Beginn der HVD (holographic versatile disc) durch InPhase mit Bayer-Medium