

Grundlagen der Elektronik für Medienwissenschaftler

Seminar HU; WS 2012/13

Prof. Dr. Horst Völz

Diese Einführung benutzt hauptsächlich:

Völz, H.: Elektronik - Grundlagen - Prinzipien - Zusammenhänge. 5. Aufl. Akademie Verlag, Berlin 1989.

Weitere Literatur und Prüfungshinweise sind am Ende vorhanden.

Dieses Material wurde heruntergeladen von r-h-voelz.de bzw. horstvoelz.de

Es ist für privaten Gebrauch frei nutzbar.

Bei Publikationen, Vorträgen usw. ist die Angabe der Quelle notwendig.

Bei kommerzieller Nutzung ist eine Abstimmung mit mir erforderlich.

Die Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12 oder 15 verfügbar.

Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

Email [h.voelz\(at\)online.de](mailto:h.voelz@online.de)

Zur Abgrenzung

Inhaltlich sind zu unterscheiden:

A. Elektrik

Hier werden *einfache, unmittelbare elektrische Ströme* und *Ladungen* sowie deren *Wirkungen* betrachtet. Typisch sind Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten, Transformatoren, Stecker, Fassungen, Tasten, Schalter, Kabel, Klingel, Relais, Telefon, Motoren, Heizung, Beleuchtung, Mikrofone, Lautsprecher, MEMs usw. Meist werden auch *Geräte* einbezogen, die heute oft zusätzliche Elektronik enthalten, wie Kühlschrank, Waschmaschine, Küchenmaschine, Staubsauger, Küchenherd usw. Ferner werden hier auch *Elektrochemie* (Batterien, Akkus), spezielle *optische Varianten* (LCD-Anzeige, Lichtleiter) eingeordnet.

B. Elektronik

Sie liegt dann vor, wenn die Bewegung von *Ladungen* (Elektronen) *extern gesteuert* wird. Typisch sind *Elektronen-Röhren* und *Transistoren*, aber auch *Hall-Elemente*, *Feldplatten* und z.T. *Supraleiter*. Bezüglich der *Anwendung* werden hauptsächlich unterschieden: Bauelemente, Mikro-, Leistungs-, Signal-, Digital- und Höchstfrequenz-, Nano- und Quanten-Elektronik.

C. Zwischengebiet

Nicht eindeutig zuordenbar sind vor allem *einfache Vakuumbaulemente* (Fotzellen, SEV usw.) sowie die *Gasentladungsphysik* mit Plasma-Bauelementen, wie Glimmröhre bis Display-Panels und Leuchtstofflampen.

Leistungs- und Informations-Anwendungen

Elektrik und Elektronik haben zwei deutlich unterschiedliche Anwendungsbereiche

Bei der **Leistungs**-Elektrik und -Elektronik stehen ihre *energetischen* Möglichkeiten im Vordergrund
Sie betreffen u. a.:

- Die **Kraft**wirkung wie bei Motoren.
- Die **Wärm**wirkung wie bei elektrischen Heizkörpern oder dem Gegenteil bei Kühlschränken.
- Die Erzeugung von **Licht** und **Beleuchtung**.
- Die Erzeugung von großen **Wechselstromleistungen**, wie zur Energieerzeugung (Generatoren), bei Sendern, Leistungsverstärkern zu Beschallung.

Hierbei treten vorwiegend Spannungen $>100\text{ V}$ und Ströme $>1\text{ A}$ auf.

Die wichtigste Kenngröße ist jedoch der **Wirkungsgrad**, d. h. die *effektive Nutzung* der Elektrizität.

Bei der **Informations**-Elektrik und -Elektronik stehen **Signalen und Daten** im Zentrum. Sie betreffen hauptsächlich

- Die **Übertragung** vom Telefon, über Rundfunk und Fernsehen bis zum Internet.
- Die **Speicherung** der Signale und Daten, wie Schallplatte, CD, Tonband und Videoaufzeichnung.

Beide können nach zwei Prinzipien erfolgen

- **kontinuierlich** (analog), vorwiegend als **Signale** $f(t)$, z. B. UKW und Schallplatte.
- **digital** mittels codierter (gequantelter) Signale = **Daten** – heute üblich.

Es interessieren vor allem **Geschwindigkeit, Speicherkapazität, Störabstand, Sicherheit und Fehlerfreiheit**.

Übliche **Spannungen** liegen bei wenigen V , bis zu pV herab, die **Ströme** reichen von pA bis zu wenigen mA .

Die notwendigen Ladungsträger

Alle Effekte, Erscheinungen und Wirkungen von Elektrik und Elektronik beruhen auf Bewegungen und Beeinflussungen von Ladungsträgern.

Dabei sind vor allen *Elektronen* und *Ionen* zu unterscheiden, die mittels verschiedener Effekte bereitgestellt werden:

- In *Leitern* existieren frei bewegliche Elektronen. Ihr Verhalten wird vereinfacht als *Elektronengas* beschrieben.
- Für *Halbleiter* ist eine Beschreibung mittels des quantenphysikalischen *Bänder-Modells* erforderlich. Dabei kommen *auch* „Löcher-Leitung“ als Bewegung von fehlenden Elektronen (Fehlstellen) vor.
- Bei *Elektronen-Röhren* werden Elektronen beeinflusst, die u. a. über *Thermo-Emission* in ein Vakuum gelangen.
- Bei *Fotodioden, CCD, SEV* usw. werden die Elektronen durch die *Photonen des Lichts* ausgelöst.
- In *Gasentladungen* ist die *Stoßvervielfältigung* zwischen Ionen und Elektronen entscheidend. Typische Bauelemente sind Glimmlampen und *Plasma-Panels*.
- Bei Batterien und Akkus sind es *chemischen Reaktionen*, die mittels *Ionen* die erzeugte Spannung bewirken.

Das Elektronengas

Die Grundlagen des Elektronengases schuf CARL GEORG OSKAR DRUDE (1852 - 1933).

Sie wurden Später durch ARNOLD JOHANNES WILHELM SOMMERFELD (1868 - 1951) quantenphysikalisch begründet.

Eine anschauliche Herleitung ist aus dem Atom-Modell von NIELS BOHR (1885 - 1962) möglich.

Die Elektronen *umkreisen* danach ähnlich den Planeten den *Atomkern* und sind so *fest an ihn gebunden*.

Die verschiedenen Bahnen entsprechen unterschiedlichen *Energie-Niveaus* und bewirken so *Potentialtöpfe*.

Mittels *hoher Energie* (Photonen oder Stoß) können Elektronen aus diesem Verband durch *Ionisation* gelöst werden.

So etwas tritt u. a. bei Fotodioden oder Gasentladungen auf.

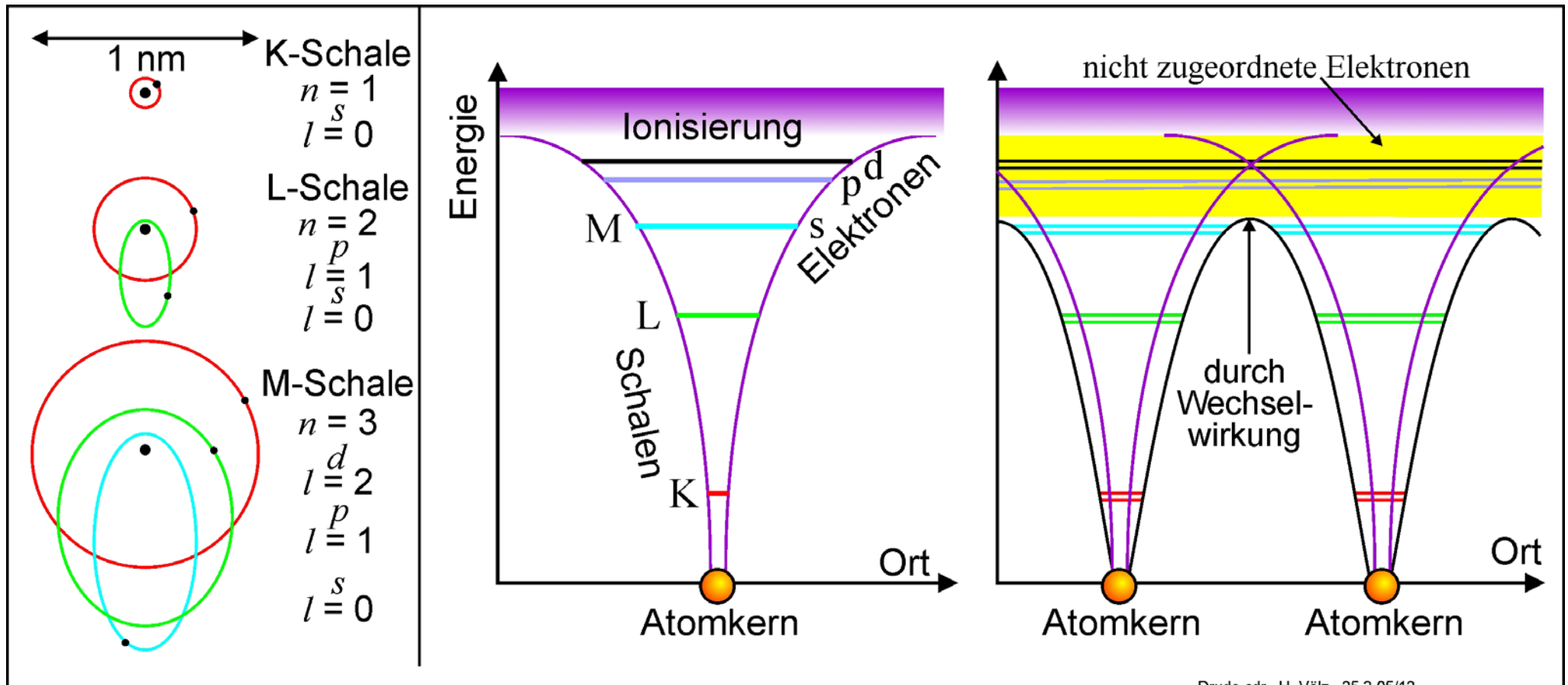
In einem *Festkörper* liegen die *Atome dicht beieinander*. Sie *beeinflussen* sich daher gegenseitig.

Als Folge durchdringen sich ihre energetischen Potentialtöpfe.

Dadurch *überlappen sich* die von den Atomkernen weit entfernten *Elektronen-Bahnen*

Ihre Elektronen gehören folglich zu mehreren Kernen und sind daher ähnlich einem Gas *frei beweglich*.

Ihre Anzahl entspricht grob der Atomanzahl und beträgt im Mittel $10^{19} - 10^{20}$ je cm^3 .



Der elektrische Strom

Jeder Körper besitzt bei der absoluten **Temperatur** T [°K] eine thermischen Energie $E = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$.

Darin ist $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ W·s/grad die BOLTZMANN-Konstante (LUDWIG BOLTZMANN, 1844 - 1906).

Im statistischen Mittel verleiht diese Energie jedem freien Elektron eine **thermische Geschwindigkeit** v_{th} gemäß:

$$\frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v_{th}^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T.$$

Wegen der Elektronenmasse $m_0 \approx 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg folgt dann bei Zimmertemperatur $v_{th} \approx 100$ km/s.

Nach einem relativ kurzen Weg stößt jedes Elektron mit einem anderen oder einem Atomkern zusammen.

Die statistisch gemittelte **freie Weglänge** $\lambda \approx 10^{-8}$ cm liegt in der Größenordnung der Atomabstände.

Je Elektron entstehen so etwa 10^{15} Zusammenstöße je Sekunde.

Makroskopisch gesehen erfolgt dabei keine gerichtete Bewegung der Elektronen.

Hierzu ist ein **äußeres elektrisches Feld** der Feldstärke E notwendig.

Wegen $e_0 \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ A·s **bewirkt** es eine **Beschleunigung** b der Elektronen gemäß $m_0 \cdot b = e_0 \cdot E$.

Die dabei entstehende Transportgeschwindigkeit v_{tr} wird der ungerichteten Bewegung v_{th} überlagert.

Bei der hohen Stromdichte von 3 A/mm² (s. u.) tritt im Kupfer nur eine Feldstärke von 50 µV/cm auf.

Sie bewirkt eine mittlere **Transportgeschwindigkeit** $v_{tr} \approx 0,2$ mm/s $\approx 10^{-9} v_{th}$.

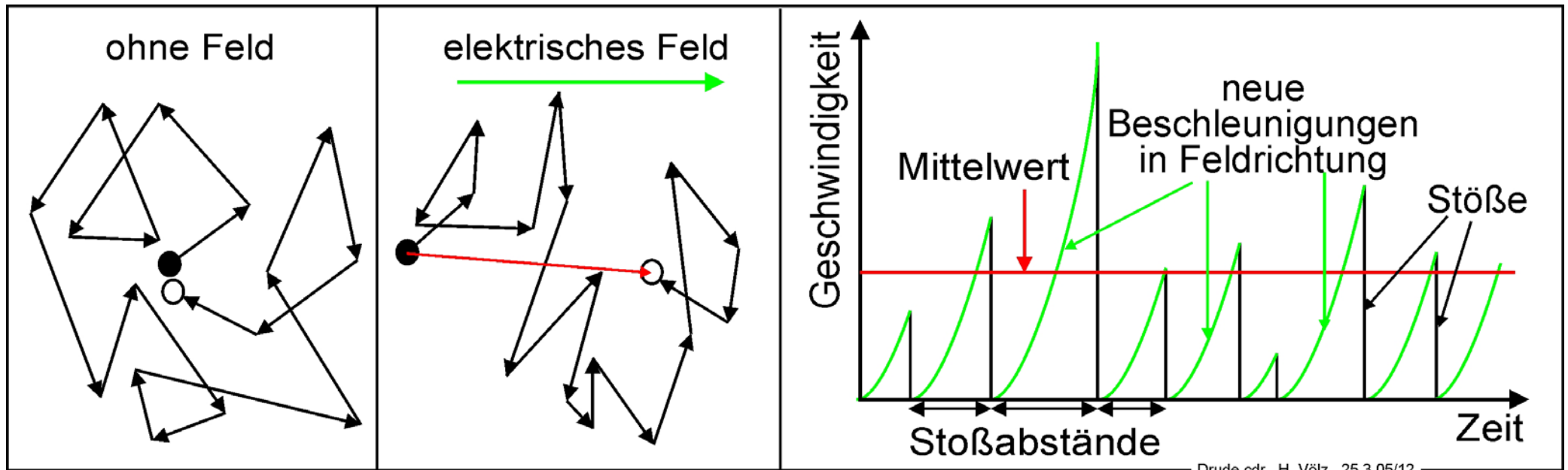
Sie muss deutlich von der **Signalgeschwindigkeit** v_{sgn} unterschieden werden, die nahe der Lichtgeschwindigkeit liegt

⇒ Analogie *Wasserbewegung im Rohr*. Druckimpuls wirkt am Ende viel schneller als Moleküle dorthin gelangen.

Die durch das Feld bewirkte gerichtete Bewegung wird **bei jedem Stoß wieder ungerichtet** und damit zu Wärme.

Nur bei **Supraleitung** und in **Nanoröhren** fehlt die Wechselwirkung und daher fließt dann der Strom verlustlos (ewig).

⇒ Analogie STOOKE'sches Gesetz: Fallen eines Körper in zäher Flüssigkeit → konstante Fallgeschwindigkeit.



Bei jedem Stoß wird die durch das elektrische Feld jeweils erreichte Geschwindigkeit in eine andere Richtung umgelenkt. Im rechten Bild wurde dabei angenommen, dass davon keine Komponente in Feldrichtung übrig bleibt. Das ist eine absichtlich falsche Vereinfachung. Sonst würde das Bild zu unübersichtlich.

Die Signalgeschwindigkeit in nächsten Bild kann damit verglichen werden, wie schnell sich Schall ausbreitet, ohne dass die Luftmoleküle genauso schnell zum Ohr gelangen (Vgl. Autobahnstau bei Auflösung).

Die elektrische Stromstärke I

Es sollen n Elektronen in der Sekunde durch einen Leiterquerschnitt fließen.

Dann beträgt die **Stromstärke** $I = n \cdot e_0 \approx n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A}$. ($e_0 \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$).

Für 1 A sind folglich $n \approx 6,25 \cdot 10^{18}$ Elektronen je Sekunde erforderlich.

Für die üblichen Ströme ist daher kein **Zählen der Elektronen** möglich.

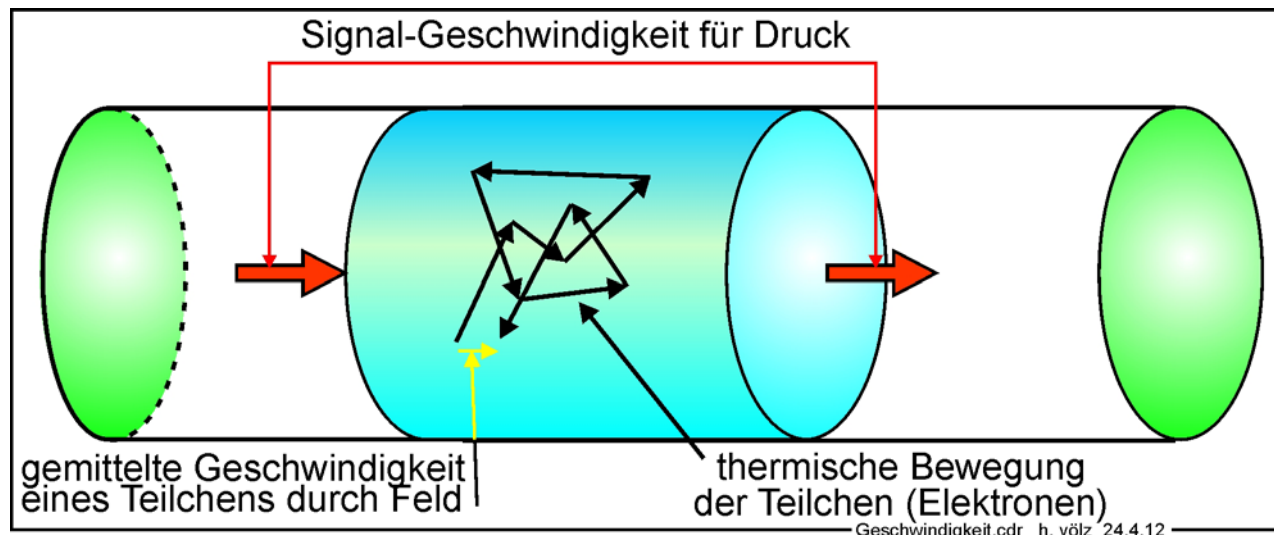
Auch die dazu gehörende Frequenz ist meist nicht messbar. Bei 1 pA würden etwa 6 MHz entstehen.

Ströme werden daher meist über ihre Kraft-Wirkungen gemessen.

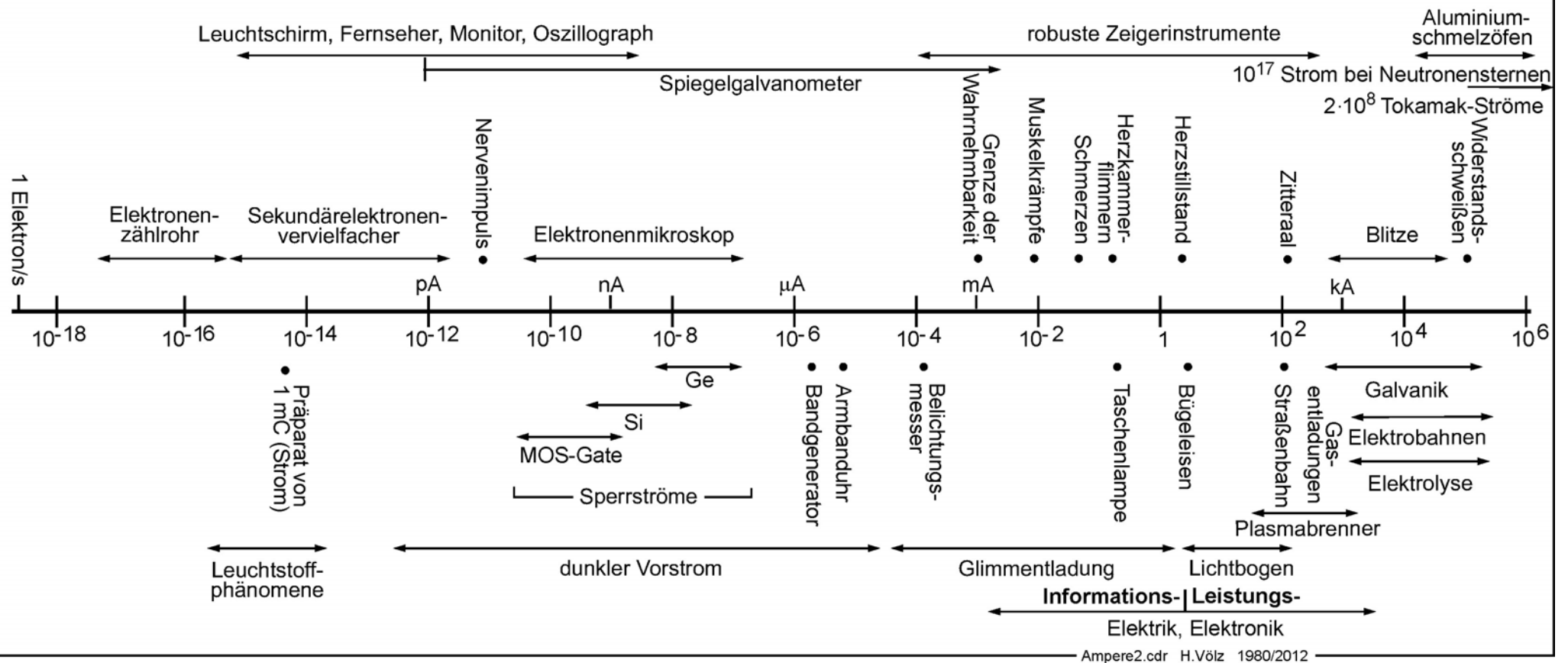
Für viele Anwendungen –in besondere bezüglich der Erwärmung – ist noch die **Stromdichte** i notwendig.

Fließt der Strom durch einen Leiter mit dem Querschnitt A so gilt $i = I/A$

Unter „normalen“ Bedingungen ohne zusätzliche Wärmeableitung sind für Leiter maximal 3 A/mm^2 zulässig.



elektrische Stromstärke in A



Die elektrische Spannung U

Sie kann ebenfalls über die Elektronenzahl definiert werden.

Dazu wird von einem ***Luft-Kondensator*** mit zwei Flächen A [m²] und deren Abstand d [m] ausgegangen.

Mit der absoluten Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ A·s/V·m gilt für die Kapazität

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}.$$

Außerdem besteht zwischen der Spannung und der Ladung Q der Zusammenhang $U = Q/C$.

Auf eine Platte werden nun m Elektronen gebracht. Die andere werde geerdet.

Dann beträgt die Spannung gegen Erde

$$U = \frac{m \cdot e_0}{\varepsilon_0 \cdot A / d} = 1,81 \cdot 10^{-8} \cdot m \cdot \frac{d}{A}.$$

Eine Messung von U mittels Kondensator und Elektronenzahl m ist kaum möglich.

Sie erfolgt aus der Kraftwirkung auf Ladungsträger bzw. der über einen Widerstand fließenden Stromstärke.

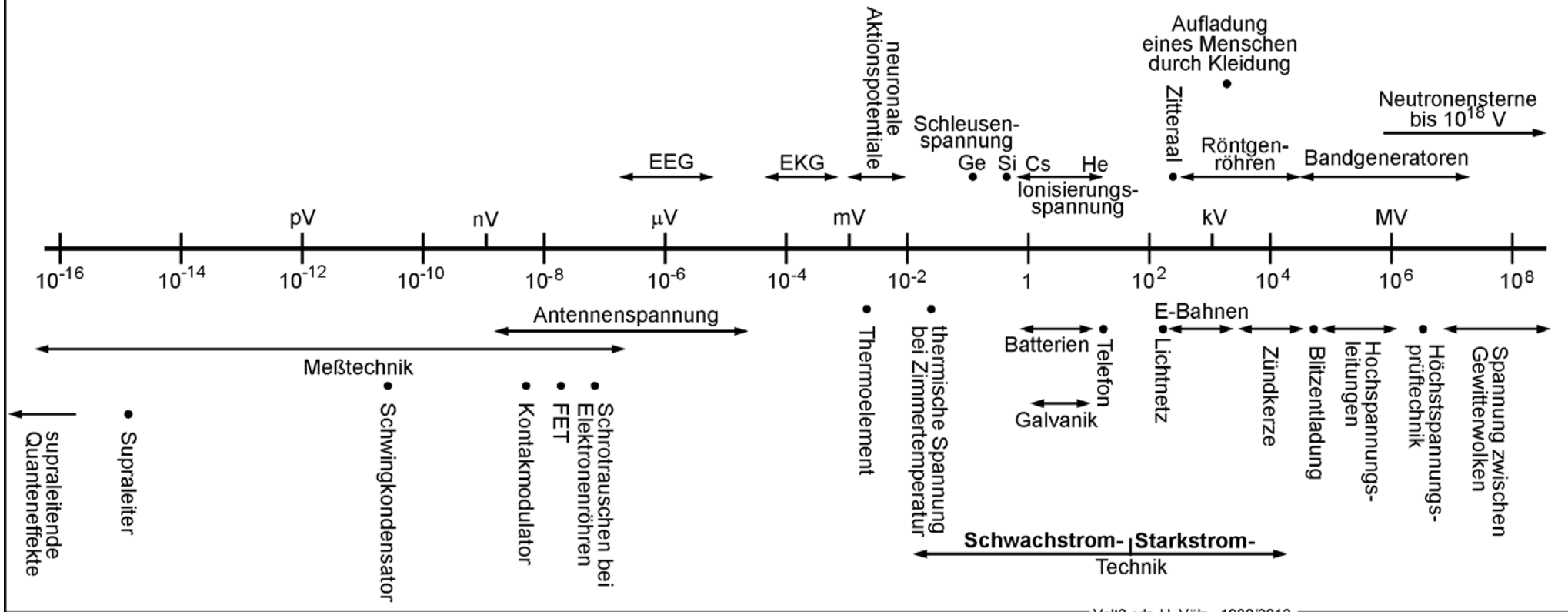
Dabei ist zu beachten, dass dabei Ladungsträger abgeleitet werden.

Deshalb sind u. a. chemischen oder andere Spannungsquellen erforderlich (s. u.)

Es ist zu beachten, dass in die ***Feldstärke*** $E = U/d$ in Volt/m nicht der Abstand d sondern nur die Fläche A eingeht.

Analogie: Die Spannung entspricht dem, wenn man auf einem hohen Berg steht und weiß wie tief man fallen kann.

elektrische Spannung in V



Volt2.cdr H. Völz 1980/2012

Elektrische Energie

Das Produkt aus Strom I und Spannung U ist die elektrische Leistung $N = U \cdot I$.

Damit die elektrische Leistung verfügbar ist, muss sie meist aus anderen Energien gewonnen werden.

Die Ladung eines Kondensators bricht mit einer Stromentnahme exponentiell zusammen (s. u.).

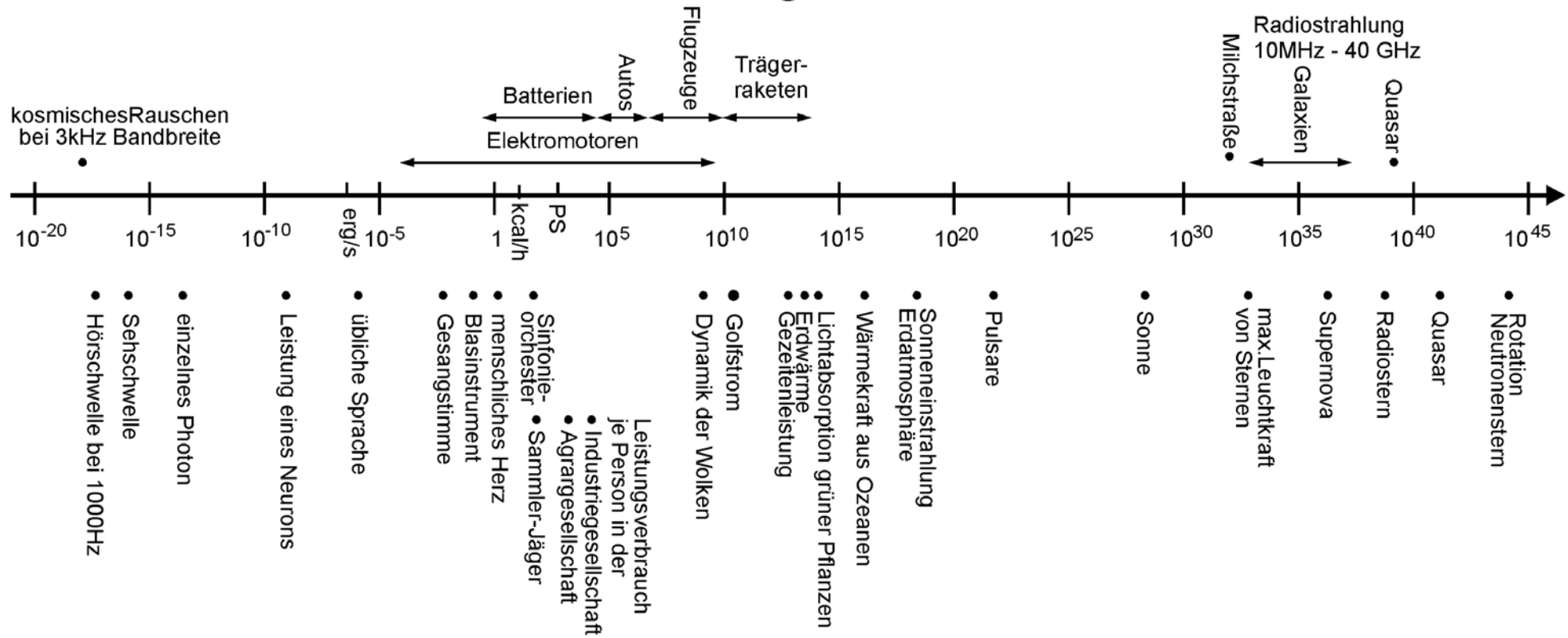
Er ist daher nur selten als technische Spannungsquelle nutzbar. Übliche *Spannungsquellen* sind dagegen:

- Auf *chemische* Reaktionen beruhende *Batterien* und *Akkumulatoren*; im erweiterten Sinn gehören hierzu auch die *Brennstoffelemente*.
- Auf *magnetische Induktion* beruhende mechanisch angetriebene Generatoren, vor allem in thermischen, Wind-, Gezeiten- oder Kern-*Kraftwerken* und zur Speicherung Stauseen. Ihre Energie ist über das *Lichtnetz* verfügbar.
- Umsetzung von Licht in Spannung bei *Fotoelementen* (Solarzellen).
- *Radioaktivität* nutzende Spannungsquellen. Sie werden selten, hauptsächlich in Satelliten benutzt.

Neben den Spannungsquellen gibt es auch *Stromquellen*. Sie liefern einen konstanten Strom.

Bei ihnen ist daher die je Sekunde entnehmbare *Ladungsträger-Anzahl* festgelegt.

Leistung in W



watt2.cdr h. vözl 1970/2012

Das Ohm'sche Gesetz

Die zusätzliche Bewegung der Elektronen durch ein äußeres Feld ist vernachlässigbar gegenüber der thermischen. Das hat zur Folge, dass die beschleunigende *Spannung* U und der bewirkte *Strom* I *proportional* sind.

Der entsprechende Faktor ist der Widerstand R .

Mit ihm gilt daher das **OHM'sche Gesetz** (GEORG SIMON OHM, 1787 - 1854):

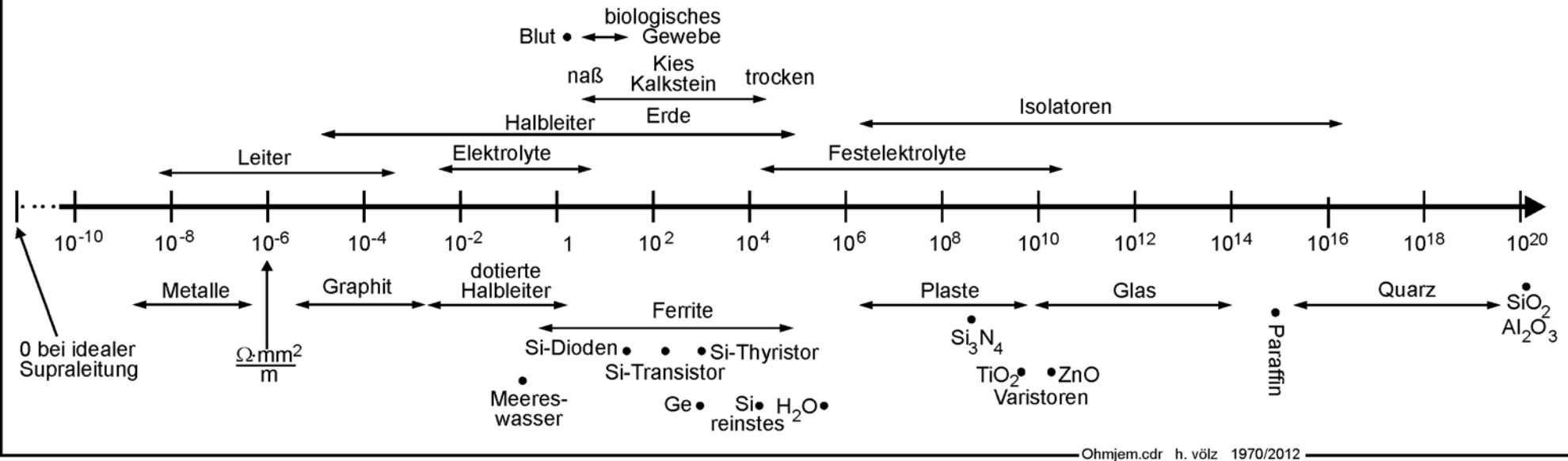
$$U = I \cdot R$$

Für einen Leiter mit dem Querschnitt A und der Länge l berechnet er gemäß

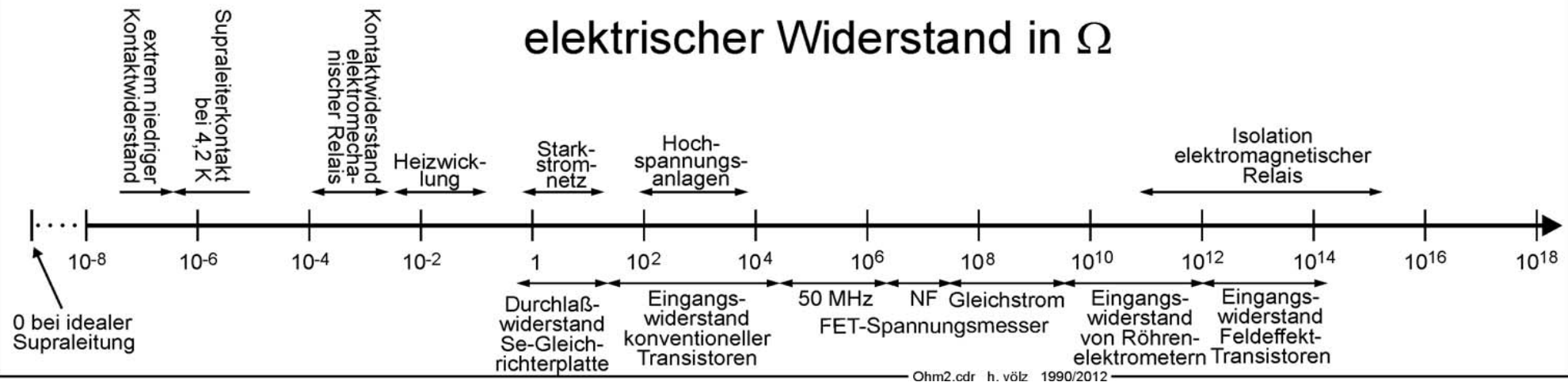
$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}.$$

Darin ist ρ der *material-spezifische Widerstand* in Ω/m .

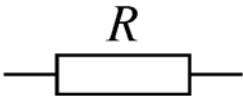
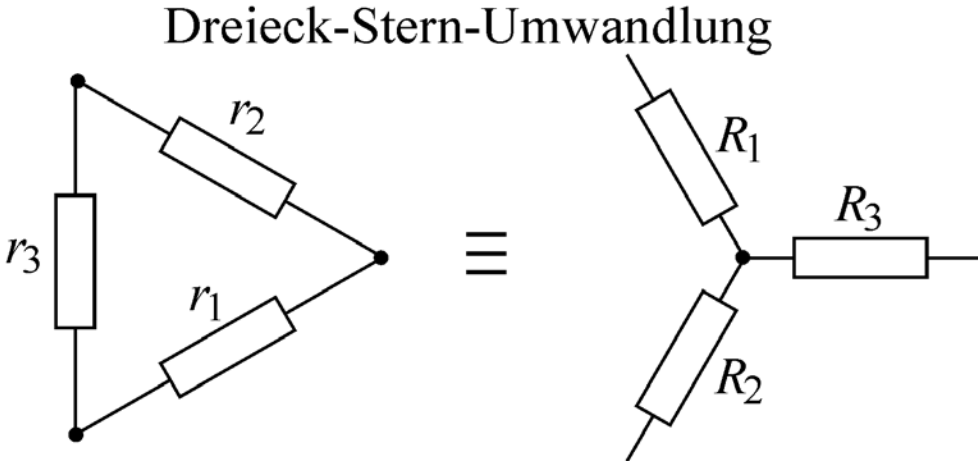
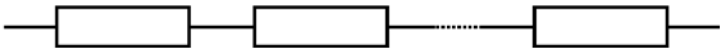
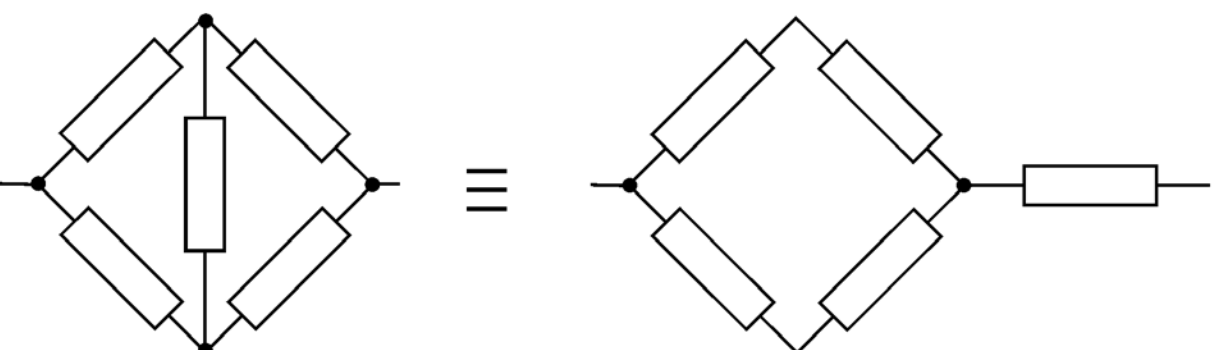
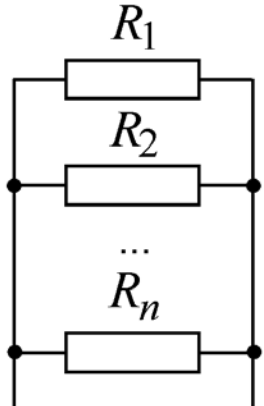
spezifischer Widerstand in $\Omega \cdot m$



elektrischer Widerstand in Ω



Zusammenschaltung von Widerständen

Das Symbol 	Dreieck-Stern-Umwandlung 
Reihenschaltung  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	Anwendung auf die Messbrücke 
Parallel-schaltung Ihre Berechnung ist kompliziert 	

widerstände.cdr h. vözl 1982/2012

***Ergänzung:* Parallelschaltung von Widerständen**

Das Ohmsche Gesetz gilt für jeden Widerstand, und an jedem liegt die gleiche Spannung U .
Wegen der Summierung der Ströme I gilt daher auch

$$\sum I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} = \frac{U}{R_{ges}}.$$

Und daher

$$R_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}.$$

Eine Vereinfachung ist für 2 Widerstände möglich:

$$R_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Ergänzung: Stern-Dreieck-Umwandlung

Sie ist nützlich zur Vereinfachung von komplizierten Widerstands-Netzwerken.

Ein Beispiele ist die WHEATSTONE-Messbrücke, u. a. für die Spannung im Querzweig (s. Bild).

Sir CHARLES WHEATSTONE (1802 - 1875).

$R_1 = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1 + r_2 + r_3}$	$r_1 = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_1}$
$R_2 = \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2 + r_3}$	$r_2 = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_2}$
$R_3 = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2 + r_3}$	$r_3 = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_3}$

Reale Spannungs- und Stromquellen

Ideale Spannungs- und Strom-Quellen behalten ihre Spannung bzw. ihren Strom auch bei Energieentnahme. Doch weder in der Theorie noch in der Technik gibt es sie. Sie müssten ja imstande sein *unendliche Energie* zu liefern. In der Praxis geht bei jeder Strom-Entnahme etwas Energie in der Quelle verloren und erwärmt sie.

Dieser Verlust kann bei beiden durch eine *Innenwiderstand* R_i erfasst werden. In der Praxis hängt seine Größe auch (etwas) von der Stromentnahme ab.

Bei der *Spannungsquelle* liegt er in Reihe mit der idealisierten Quelle U_0 . Er begrenzt so den maximal entnehmbaren Strom auf $I_{max} = I_k = U_0/R_i$.

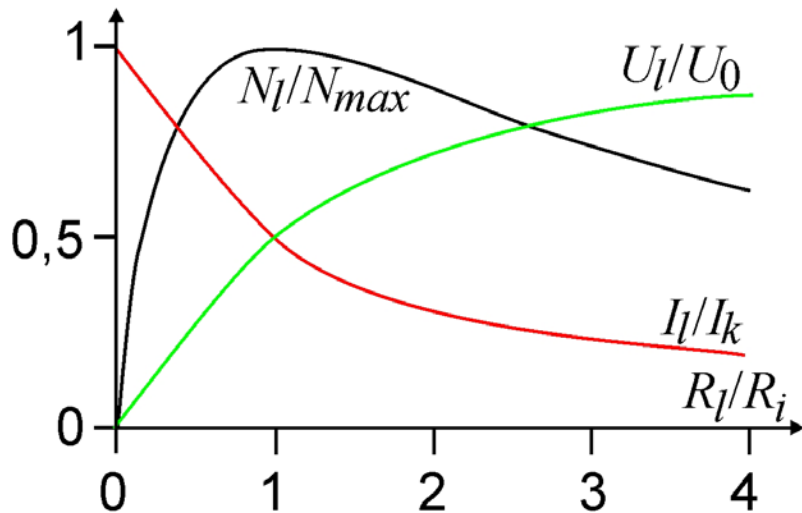
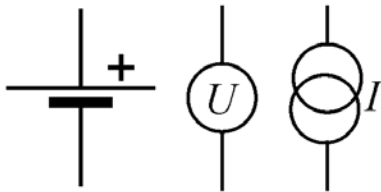
Bei der *Stromquelle* liegt er parallel zur idealisierten Stromquelle I_k . Er begrenzt die im Leerlauf erreichbare Spannung auf $U_l = I_k \cdot R_i$.

Aus jeder realen Quelle kann durch Anpassung die *größtmögliche Leistung* entnommen werden. Dabei muss für den Lastwiderstand gelten $R_l = R_i$.

Eine geringe *Überanpassung* mit $R_l \geq R_i$ ist immer weniger kritischer als eine Unteranpassung $R_l \leq R_i$.

Bei beliebigen *Netzwerken* ist es immer möglich den Anschluss von *zwei Klemmen* durch eine *einfache Ersatzschaltung* zu erfassen.

Symbole für Spannungs-
und Strom-Quellen



$$N_l = U_l \cdot I_l = U_0^2 \frac{R_l}{(R_l + R_i)^2}$$

$$R_l \rightarrow \infty$$

$$R_l \rightarrow 0$$

$$U_l = U_0$$

$$I_l = U_0 / R_i$$

$$U_l = U_0 \frac{R_l}{R_l + R_i}$$

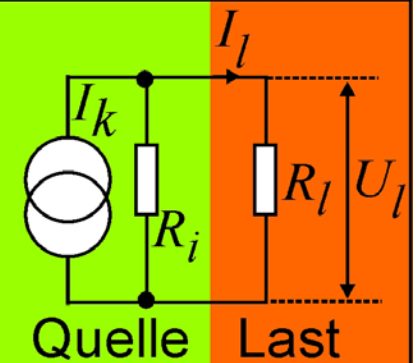
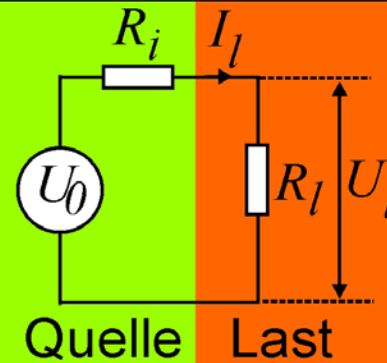
$$I_l = U_0 \frac{1}{R_l + R_i}$$

$$U_l = I_k \frac{R_l \cdot R_i}{R_l + R_i}$$

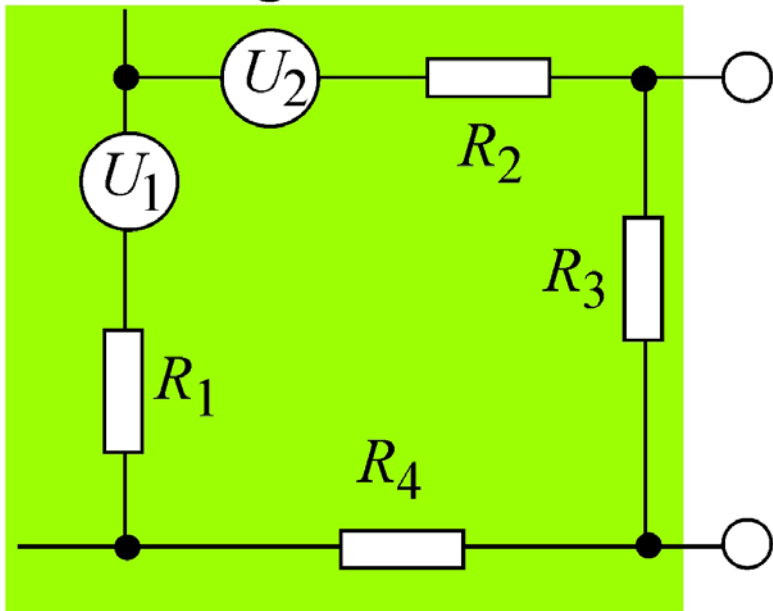
$$I_l = I_k \frac{R_i}{R_l + R_i}$$

$$U_l = I_k \cdot R_i$$

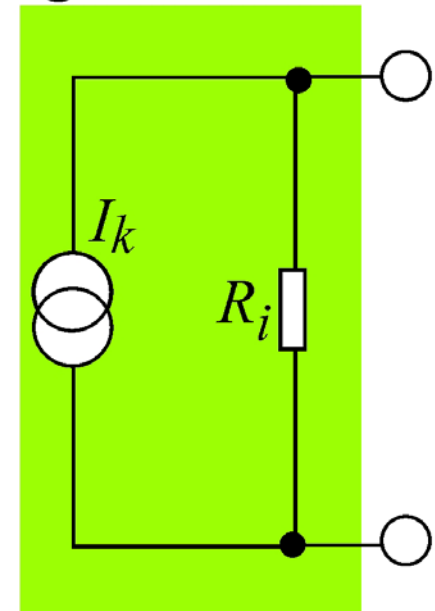
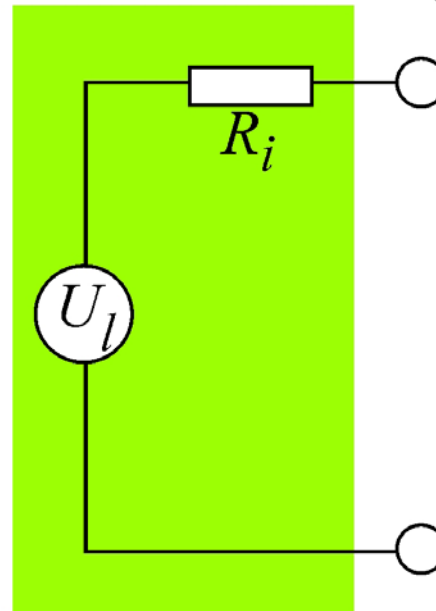
$$I_l = I_k$$



beliebiges Netzwerk



Ersatzschaltungen bzgl. Anschlüsse



notwendige Bestimmungen U_l und I_k

Das elektrische Feld

Neben der negativen Ladung des Elektrons gibt es auch positive Ladungen (gemessen in Coulomb C bzw. A·s). **Positive Ladungen** kommen als Ionen (Atomkerne) oder infolge fehlender Elektronen bei einem Material vor. Meist werden die Ladungen **punktförmig** angenommen und zwar auch dann, wenn sie sich auf einem Körper befinden.

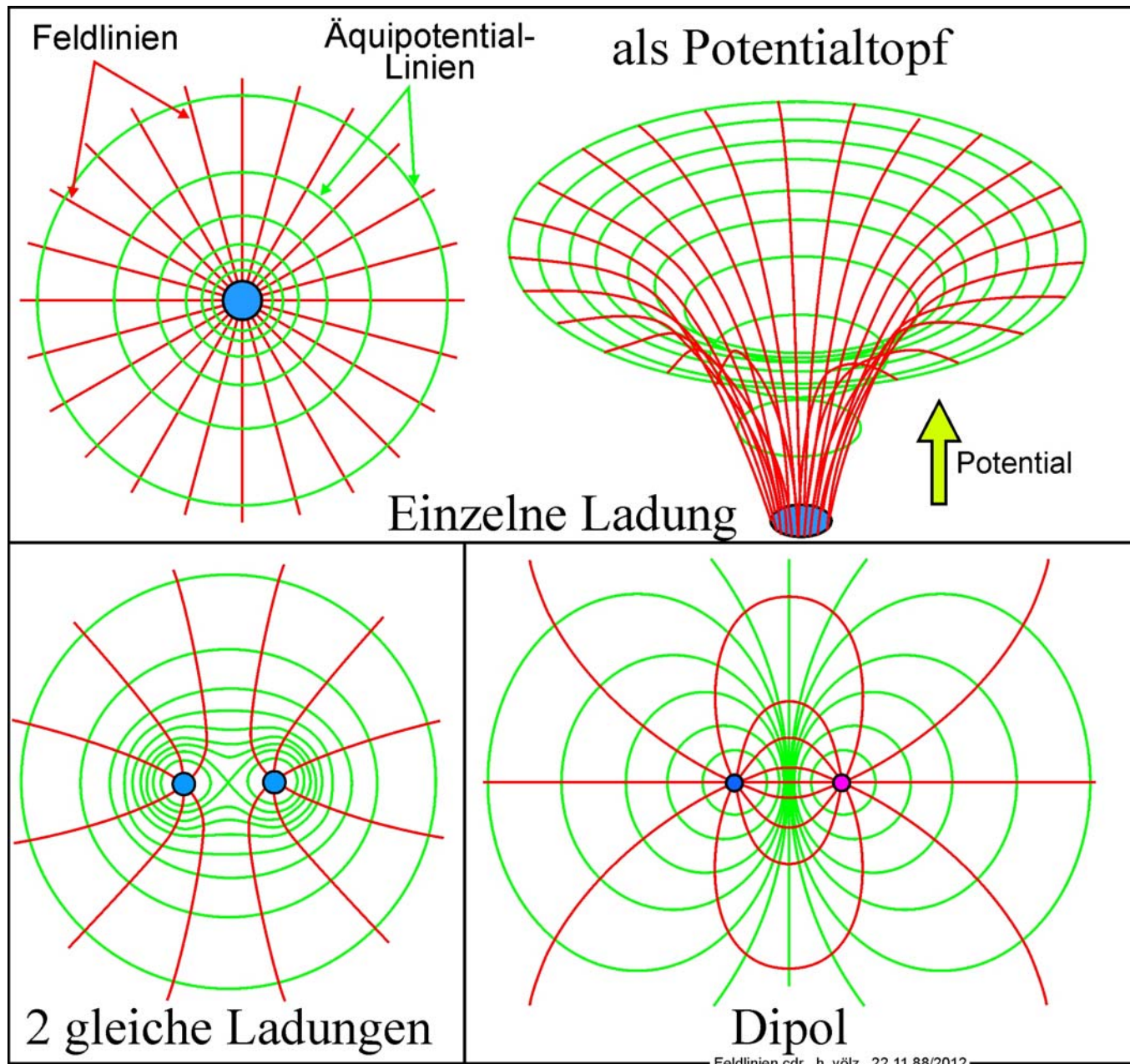
Indirekt können Ladungen – und damit auch Elektronen – durch ihr Feld **beschrieben werden**. Es ist eine **Abstraktion**, die nur durch seine **Wirkung** indirekt nachweisbar ist. Es übt eine **Kraft** F auf andere Ladungen bzw. auf Körper mit Ladungen aus. Zwischen gleichen Ladungen herrscht Abstoßung, zwischen entgegengesetzten Ladungen Anziehung. Aus der Ladung Q und der Kraft F berechnet sich die Feldstärke E (Potential) gemäß:

$$F = E \cdot Q$$

Um jede Ladung herum gibt es **Äquipotential-Linien** auf denen die Kraft gleich groß ist. Senkrecht zu ihnen verlaufen **Feld-Linien**. Auf ihnen würde sich eine freie Ladung bewegen. Eine einzelne Ladung kann so mit dem Abstand r durch einen **Potentialtrichter** dargestellt werden.

$$U(r) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r}$$

Darin ist $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm die Dielektrizitätskonstante des Vakuums. Er veranschaulicht wie sich eine freie Ladung zur felderzeugenden Ladung hin **bewegen** (oder von ihr entfernen) würde.



COULOMB'sches Gesetz

CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB (1736 - 1806).

Es erfasst die gegenseitige Krafteinwirkung von zwei Ladungen Q_1 und Q_2

Bei einem Abstand r ergibt sich für die Kraft:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}.$$

Gleiche positive (bzw. negative) Ladungen stoßen sich mit dieser Kraft ab.

Zwei entgegengesetzt gleich große Ladungen bilden einen **Dipol**. Bei ihm ziehen sich die Ladungen an.

Kapazität und Kondensator

Lateinisch *condensare* verdichten

Es sei eine räumliche Anordnung von Material für Ladungen gegeben.

Dann ist der Quotient aus Ladung Q und der sich einstellenden Spannung (Potential) U konstant:

$$C = \frac{Q}{U} \cdot [1]$$

Der Wert C heißt Kapazität und wird in Farad angegeben.

Bei einem **Plattenkondensator** mit den Flächen A und dem Abstand d gilt

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot [2]$$

Darin ist ε_r die relative Dielektrizitätskonstante des Zwischen-Materials.

Für einen **Kugelkondensator** mit den Radien r_1 und r_2 gilt analog

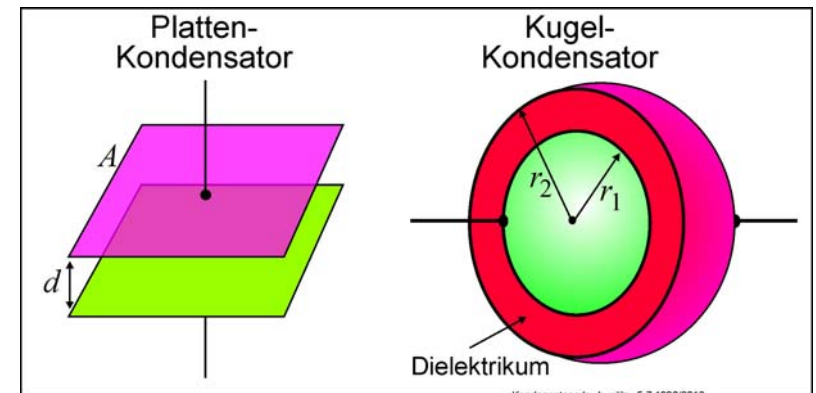
$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}.$$

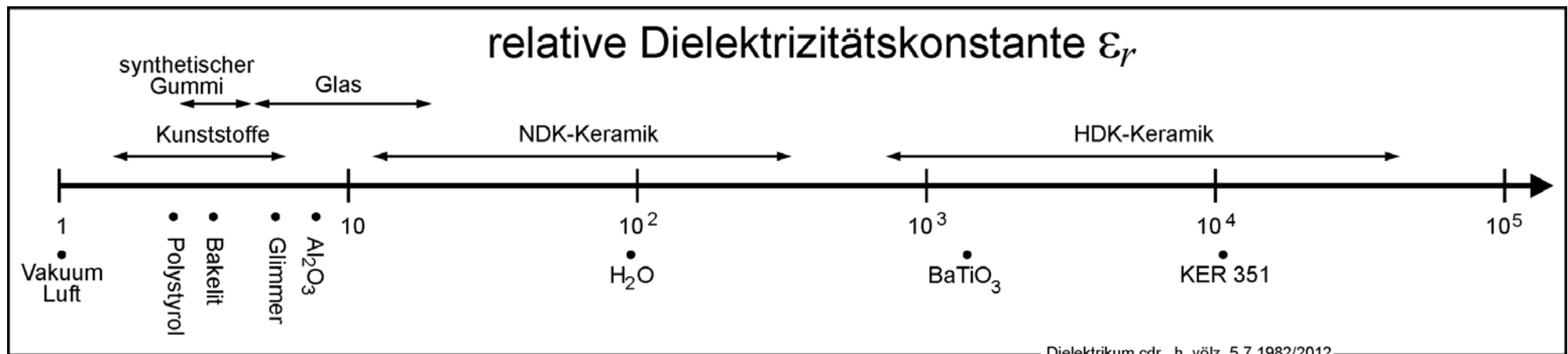
Häufig wird die Kapazität einer Kugeloberfläche mit R **gegenüber dem Unendlichen** ($r_2 \rightarrow \infty$) in Luft $\varepsilon_r \approx 1$ angegeben.

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot R$$

Hierbei gilt: Stecknadelkopf $\approx 0,1$ pF; Fußball ≈ 25 pF; Erde $\approx 0,7$ mF.

Beim **Kondensatormikrofon** ändert sich der der Abstand d in [2] mit der Bewegung der Membran. Da aber die Ladung des Kondensators Q erhalten bleibt, muss sich nach [1] die Spannung ändern. Das ergibt die Mikrofonspannung.





Schaltungen mit Kondensatoren

Für die *Zusammenschaltung von Kondensatoren* gilt im Prinzip dasselbe wie bei Widerständen. Es sind jedoch die Formeln für Reihen- und Parallelschaltung zu vertauschen!

In *Kombination mit Widerständen* ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten.

Besonders wichtig ist dabei die *Ladung* und *Entladung* eines Kondensators über einen Widerstand.

Bei der Stromzufuhr bzw. Stromentnahme ändern sich die Ladungsträgerzahl und damit die Spannung.

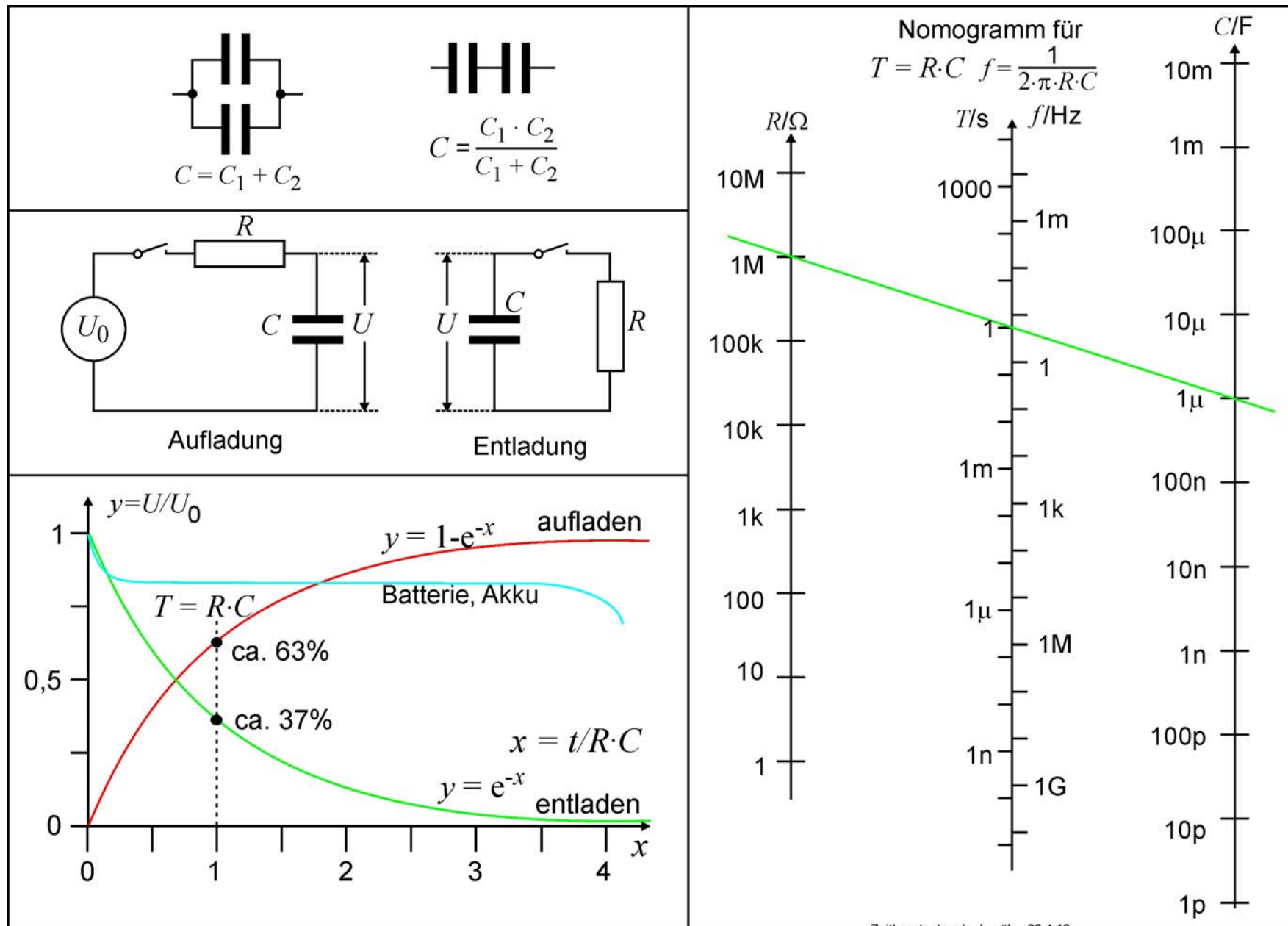
Die führt zu einem *exponentiellen Verlauf*. Typisch ist dabei die *Zeitkonstante* $T = R \cdot C$.

Bei dieser Zeit hat sich Spannung auf $1/e \approx 27\%$ geändert.

Kondensatoren verhalten sich also deutlich anders als *Batterien* und *Akkus*.

Bei Ihnen bleibt infolge der ablaufenden *chemischen Reaktionen* die Spannung über die gesamte Zeit nahezu konstant.

Das Verhalten der Doppelschichtkondensatoren liegt zwischen den beiden Extremen. Es ist relativ komplex.



Zeitkonstante.cdr h. völz 30.4.12

Kondensator-Varianten

Erster Kondensator war die **Leidener Flasche** ($\approx 5 \text{ nF}$) = Glasgefäß innen und außen mit Metallfolie (Al) belegt. Sie wurde 1745 von EWALD JÜRGEN GEORG VON KLEIST (Cammin) und unabhängig 1746 von PIETER VAN MUSSCHENBROEK (Leiden) erfunden.

Heute gibt es eine **Vielzahl von Kondensatoren**. Sie unterscheiden sich z. B. nach:

- **Daten:** Kapazität, Spannungen und gepolt bei Elkos (Elektrolytkondensatoren).
- **Betrieb:** Fest-, verstellbare Dreh- und Durchführungs-Kondensatoren sowie einstellbare Trimmer.
- **Dielektrikum:** Luft, Glimmer, Keramik, Papier, Kunststoff, Oxide (Al; Ta-Elkos, SiO_2 Halbleiter) usw.
- **Herstellung:** Wickel, gegenüberstehende Flächen, Mehrschicht, SMD.

Bei den **Wickelkondensatoren** sind weitere Unterscheidungen sinnvoll.

Ursprüngliches **Dielektrikum** war paraffiniertes Papier benutzt; heute sind Polystyrol, Polypropylen und Polyester üblich. Für die Elektroden wurde früher Al-Folie verwendet, heute sind sie fast immer aufgedampft.

Die **aufgedampften** Elektroden ermöglichen auch **MP-Kondensatoren** (Metall-Papier).

Bei einem Durchschlag entsteht dann kein Kurzschluss, das Metall verdampft, der Kondensator ist selbstheilend.

Die Anschlüsse können **axial** oder **einseitig** herausgeführt werden.

Induktionsarme Kondensatoren verwenden keine Drähte, sondern sind seitlich vollständig mit dem Wickel verbunden.

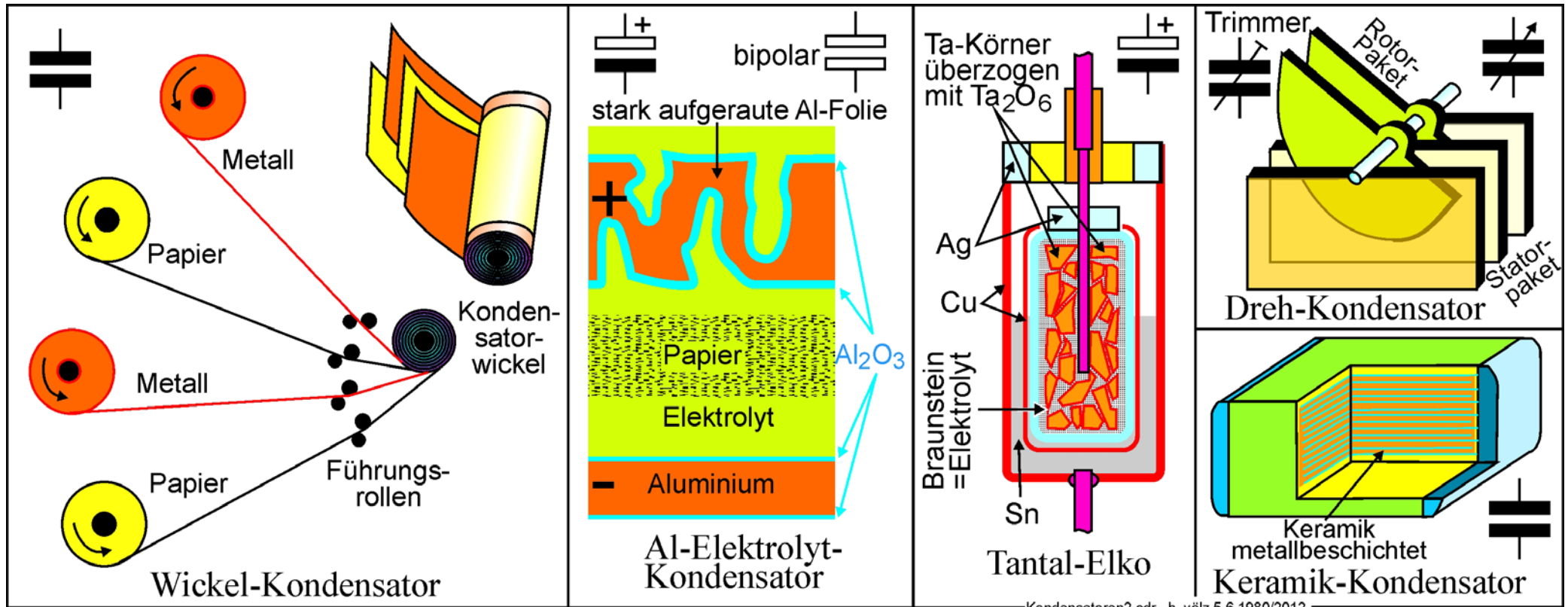
Elektrolytkondensatoren sind fast immer gepolt, das Dielektrikum ist die Oxid-Schicht des Metalls.

Sie wird als Anode mittels Elektrolyse (anodische Oxidation, Formierung) verstärkt.

Die Oberfläche des Aluminiums wird sehr stark aufgeraut, so dass eine große Oberfläche entsteht.

Bei Tantal- und Niob-Elko werden mit gleicher Wirkung Körner durch Sintern verbunden.

Als „Kontaktmaterial“ wird ein Elektrolyt verwendet, der z. T. in Papier aufgesogen ist. Es gibt auch Trockenelektrolyte.



Doppelschicht-Kondensatoren

Es gibt mehrere Varianten, ihre Definition und ihre Funktionsweise sind nicht ganz eindeutig.

Weiter **Begriffe** sind Ultrakapazität (Ultracap), Super-, Hybrid-, elektrochemischer Kondensator, Pseudokapazität, electrochemical double layer capacitor (EDLC).

Bezüglich des Bauvolumens besitzen sie eine extrem große Kapazität und mindestens die **100-fache** Energiedichte gegenüber anderen Kondensatoren.

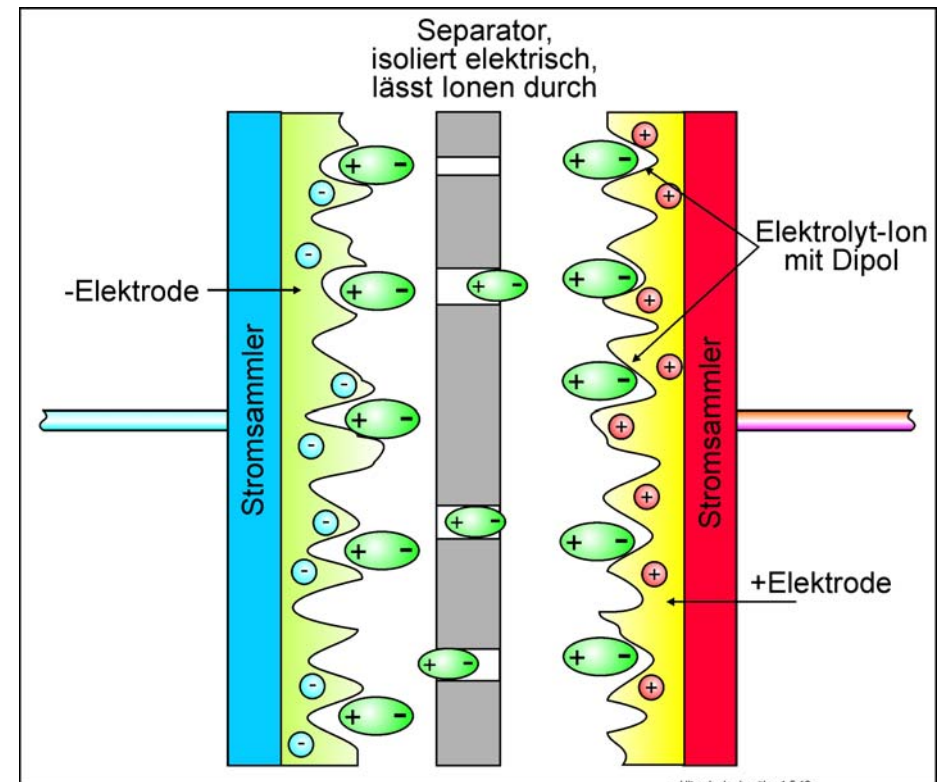
Physikalisch liegt eine äußerst dünne, elektrisch isolierende **HELMHOLTZ-Doppelschicht** an den Oberflächen vor.

Gemäß der Formel $E = U/d = 2V/0,4 \text{ nm}$ ergibt sich eine hohe **Feldstärke** von etwa 5 MV/mm

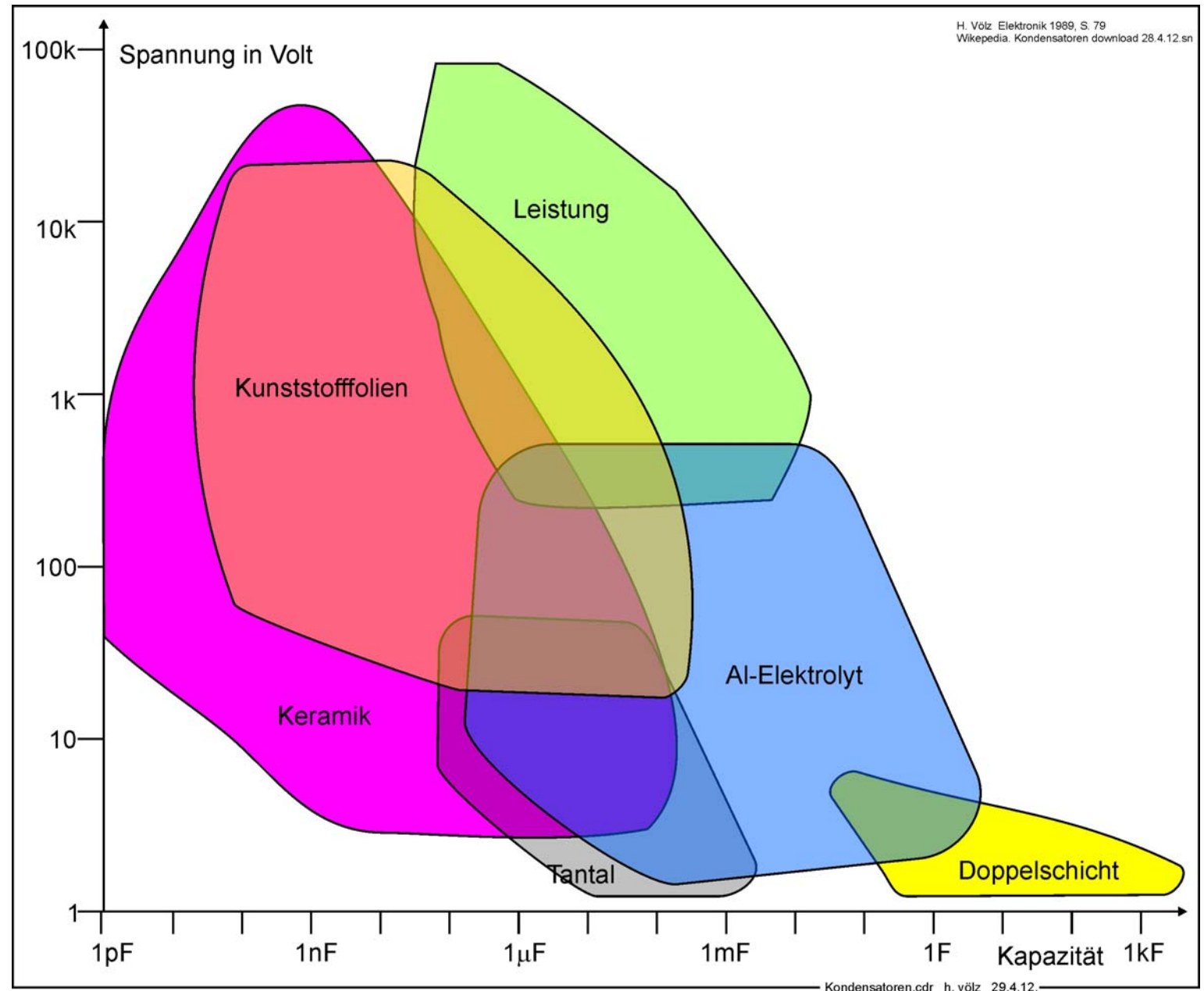
In einem leitfähigen Elektrolyten befinden sich zwei **großflächige Elektroden**, die durch einen **Separator** getrennt sind, der aber **Ionen passieren** lässt.

Zusätzlich zur rein statischen Speicherung erfolgt mittels einer **reversiblen Redoxreaktion** ein Ladungsaustausch an den Elektroden ohne chemische Stoffänderung (wie bei Batterien und Akkus).

Wesentliches Material ist dotiertes Rutheniumoxid: $\text{RuO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{RuO}(\text{OH})$



Je nach dem Aufbau der Kondensatoren besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen der zulässigen Spannung U und der erreichten Kapazität C



Piezo- und Ferro-Elektrizität

Griechisch *piezein* drücken, pressen und *ēlektron* Bernstein, *Ferro* nur indirekt bzgl. Eisen.

Beides sind spezielle Eigenschaften von Dielektrika mit beachtlicher praktischer Bedeutung.

Sie treten oft gemeinsam auf.

Teilweise besitzen diese Materialien eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r \gg 1000$. (= HDK-Material).

Mit einer *Verformung* entstehen an der Oberfläche **piezo-elektrische** Materialien elektrische Spannungen.

Daher kann der Effekt nur bei nichtleitendem Material auftreten.

Umgekehrt bewirken angelegte elektrische Spannungen eine Verformung des Materials.

Diese Effekte werden u. a. bei den *Quarzen zur Frequenzstabilisierung* genutzt.

Weitere Anwendungen sind mechanische *Antriebe*, *Ultraschallwandler*, *Sensoren* und *Oberflächenwellen*.

Ferroelektrisches Material ermöglicht eine permanente Polarisierung, die sich gemäß einer Hysterese verändern lässt.

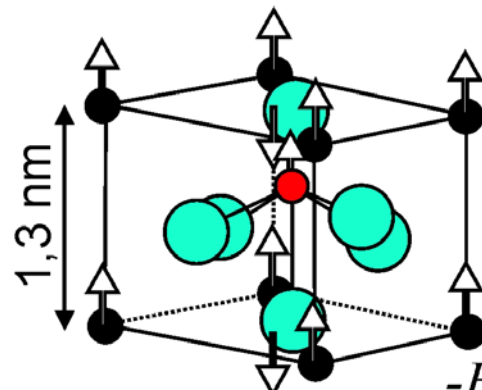
Diese konstante Ladung Q hat bei *Kondensatormikrofonen* eine zentrale Bedeutung erlangt.

Über den Membranabstand ändert sich die Kapazität C und somit die Spannung gemäß $U = Q/C$.

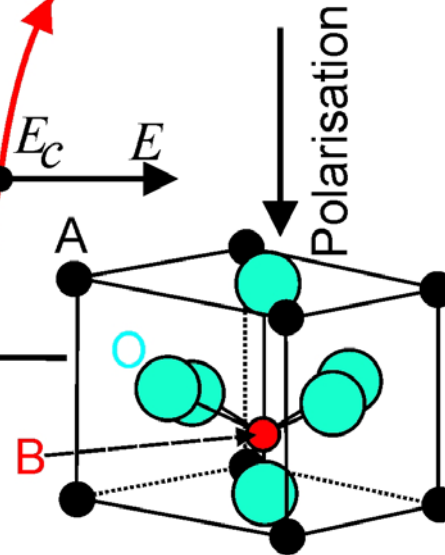
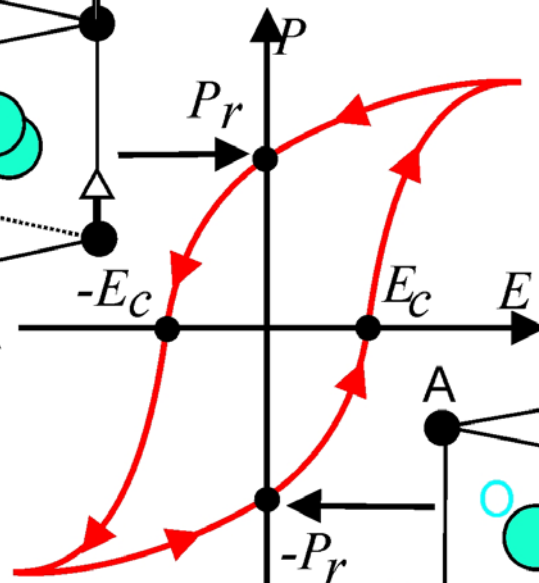
Wegen der Hysterese ermöglicht ferroelektrisches Material neue *elektronische Speicher* als **FRAM**.

Im Gegensatz zum üblichen RAM geht die gespeicherte Information bei Verlust der Betriebsspannung nicht verloren.

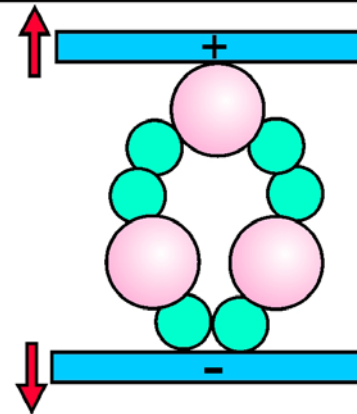
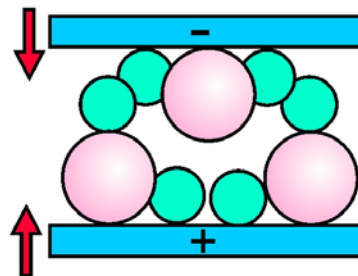
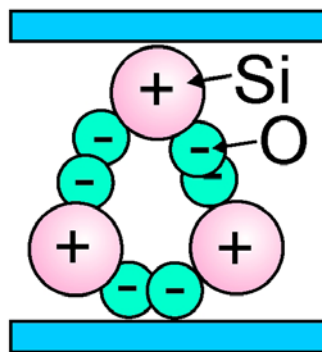
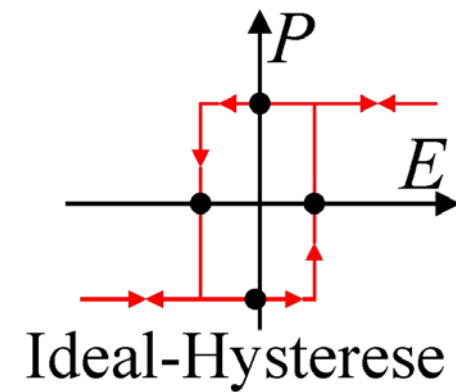
Die wichtigsten piezo- und ferroelektrischen Materialien sind neben Quarz: Bariumtitanat BaTiO_3 (BTO); Blei-Zirkonat-Titanat $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT); Strontium-Bismut-Tantalat $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT); Bismuttitanat $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BIT); Bismut-Lanthan-Titanat $\text{Bi}_{4-x}\text{La}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BLT); Bismut-Titanat-Niobat $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ (BTN); Strontiumtitanat SrTiO_3 (STO); Barium-Strontium-Titanat $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST); Natriumnitrit NaNO_2 ; Lithiumniobat LiNbO_3 .



ABO_3
 A (Pb, Ba, Ca)
 B (Ti, Zr, Mn)



Ferro-Elektrizität



Piezo-Elektrizität

Chemische Stromquellen

Bei Kondensatoren sinkt mit jeder Stromentnahme die Spannung.

Für die meisten Anwendungen sind aber Stromquellen mit weitgehend *konstanter Spannung* erforderlich.

Dazu müssen ständig aus anderen Energien weitere Elektronen erzeugt werden.

Das leisten vor allem unterschiedliche chemische Spannungsquellen.

Sie sind heute sehr umfangreich, vor allem bei transportablen Geräten *notwendig*: u. a. Laptops, Tablets, MP3-Player, elektronische Fotoapparate, Handys, Armbanduhren, Taschenrechner, Mess- und Hörgeräte sowie Schrittmacher.

Als größere Ausführungen existieren z. B. in Handwerkergeräten, als Starterbatterien bei Autos und Energiespeicher zur Reserve und für unterbrechungsfreien Betrieb.

Leider sind für die Bezeichnung der Varianten z. T. recht *unscharfe Begriffe* üblich.

Zunächst ist es daher sinnvoll, die *chemische* – auch *galvanische - Zelle* einzuführen.

Sie besteht zumindest aus *zwei Elektroden* (Anode und Katode) und einer chemischen „Kopplung“, meist der *Elektrolyt*.

Bevorzugt läuft die chemische Reaktion an den Elektroden ab. Sie stellt die Ladungen, die elektrische Energie bereit.

Werden *mehrere solche Zellen* zusammengeschaltet, so liegt eine *Batterie* vor.

Die Begriffsherkunft ist unglücklich: *lateinisch battitūra* Hammerschlag (Schlägerei, was zum Schlagen dient).

Batterie zuweilen auch (fälschlich) als *Oberbegriff* für alle chemischen Stromquellen benutzt.

Unabhängig von der Zusammenschaltung sind *Primär-* und *Sekundärzellen* zu unterscheiden.

Den *Primärzellen* ist ein elektrischer Strom nur bis zu ihrer chemischen Erschöpfung zu entnehmen.

Dagegen können *Sekundärzellen* – bevorzugt durch elektrischen Strom – bis zu 1000-mal wiederaufgeladen werden.

Sie heißen auch *Akku = Akkumulator* (*Lateinisch cumulus* Haufen, *(ad-)ac-cumulare* anhäufen).

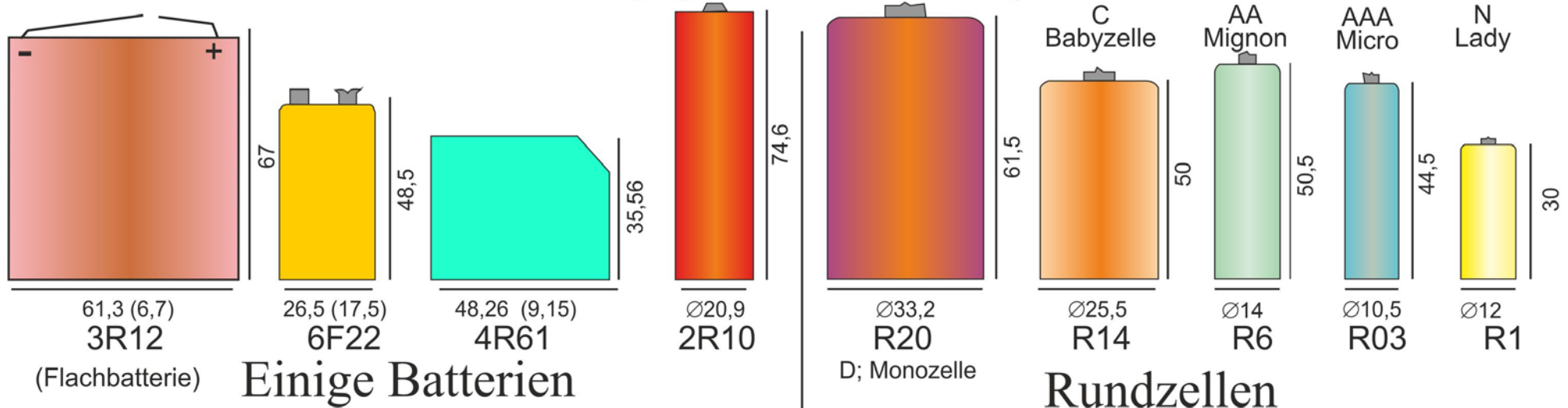
Eine Vielzahl von Zellen und Batterien ist in ihren Abmessungen *genormt*, z. B. Rund-, Flach- und Knopfzellen.

Schließlich kommen verschiedene *chemischer Prozesse* zum Einsatz, sie werden meist durch das Elektrodenmaterial gekennzeichnet: u. a.: Blei, NiCd, Silberoxid-Zink, Alkali-Mangan, Lithium usw.

Chemische Energiequellen



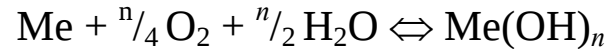
einige genormte Abmessungen



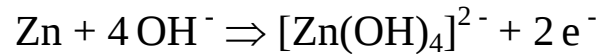
batterie.cdr h. völg 24.5.96

Eigenschaften

Die *chemischen Prozesse* in Primär- und Sekundärzellen sind meist *mehrstufig*. Wesentlich sind dabei Umwandlungen der Metalle (Me); *pauschal* gilt etwa:



Ein *Teilprozess* der Entladung setzt an der **Katode** (negativer Pol) Elektronen frei. Für Zink (Zn) gilt z. B.:



Über die äußere Stromleitung bewirken die Elektronen dann an der Anode weitere chemische Reaktionen.

Prinzipiell sind alle chemischen Reaktionen *umkehrbar*.

Bei der Ladung können *Strukturänderungen* (z. B. Spikes) auftreten, die u. a. Kurzschluss oder Explosion bewirken. Daher müssen einmal benutzbare und wiederaufladbare Zellen konsequent unterschieden werden.

Die *Spannung* und *Energie* einer Zelle hängen erheblich vom Material ab. Annähernd gilt die folgende Reihe:

Element	Li	Mg	Na	Al	Zn	Fe ²⁺	H ₂	Cd	Fe ³⁺	Cu ²⁺
V	3,4	3,1	2,7	2,7	1,7	1,3	1,2	1,2	1,1	0,62
Wh/g	3,2	2,8	1,8	2,8	0,89	0,76	3,7	0,44	0,88	0,29

Der *Energieinhalt* einer Zelle hängt vor allem von den *Abmessungen* und den *chemischen Bestandteilen* ab.

Bei den Kondensatoren wird er in As bzw. in Farad (F = As/V) angegeben, bei Batterien ist mA/h (= 3,6 As) gebräuchlich.

Für diese Kenndaten gibt es *vielfältige Darstellungen*, welche die typischen Eigenschaften hervorheben.

Ein weiteres Kennzeichen sind die typischen *Entladekurven*, die deutlich von den Kondensatoren abweichen.

Weiter müssen Lagerfähigkeit, Schnellladung, Memory-Effekt (Nur bei NiCd), Temperaturbereich usw. beachtet werden.

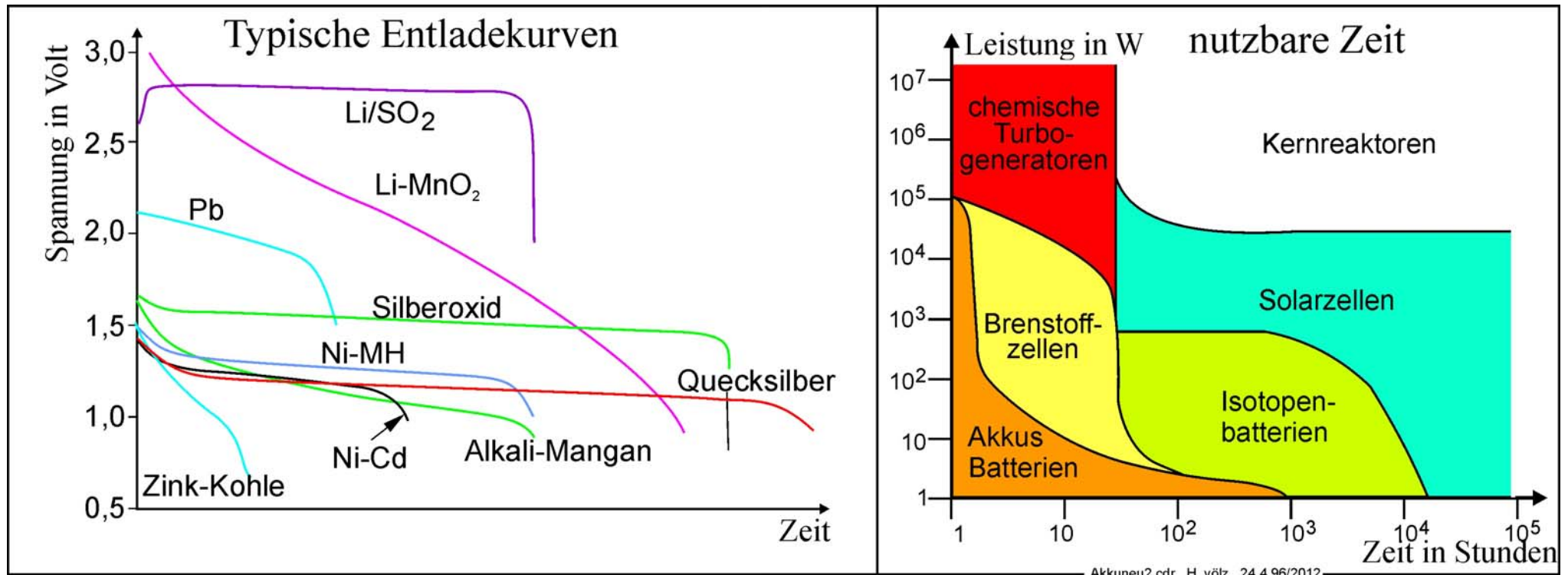
Die wichtigsten Batterien

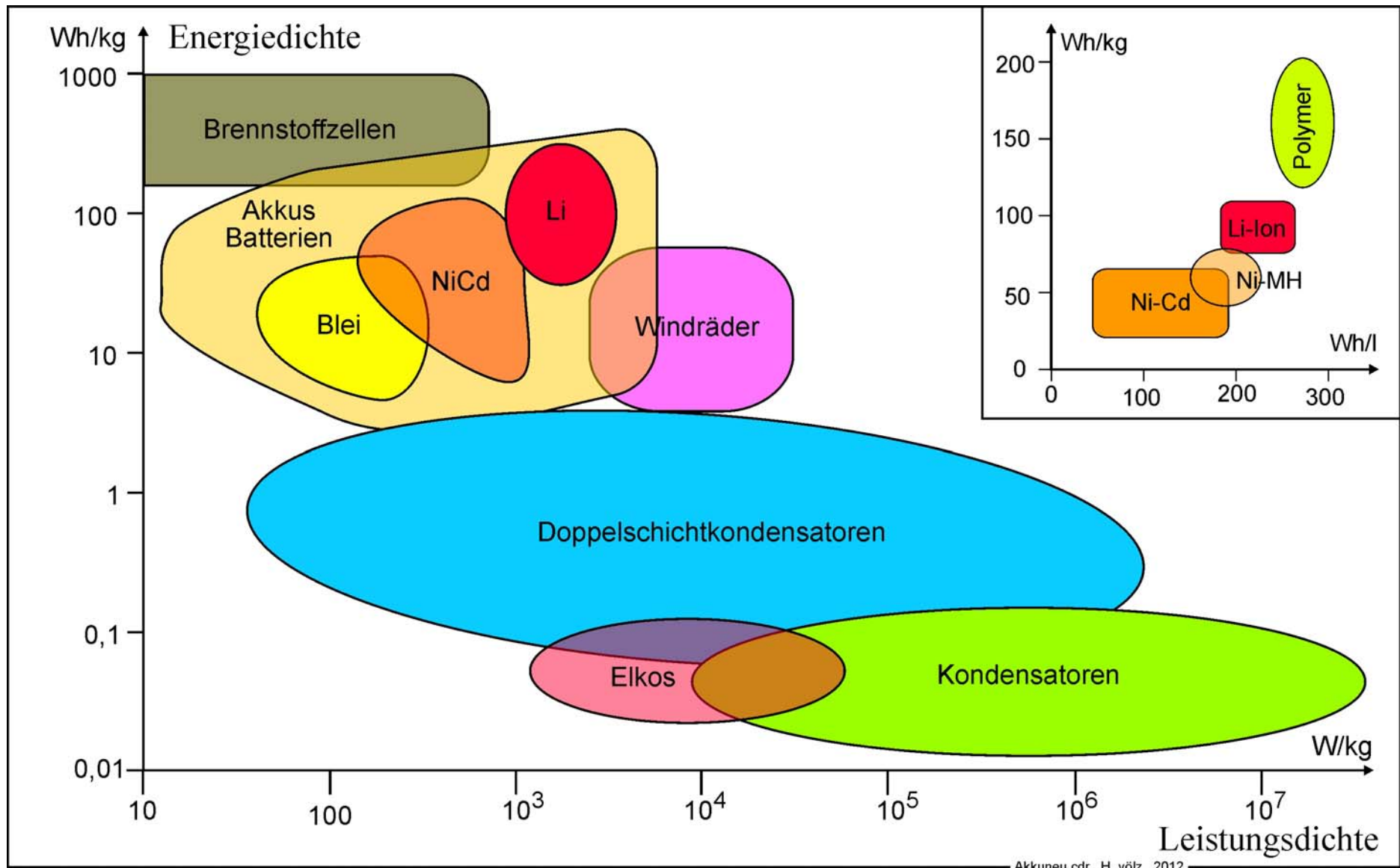
Fast alle gehören in den Sondermüll. Besonders schädlich sind Pb- und NiCd-Akkus.

Relativ umweltfreundlich sind nur die Lithium-Ionen-Akkus, sie besitzen auch die höchst Energiedichte

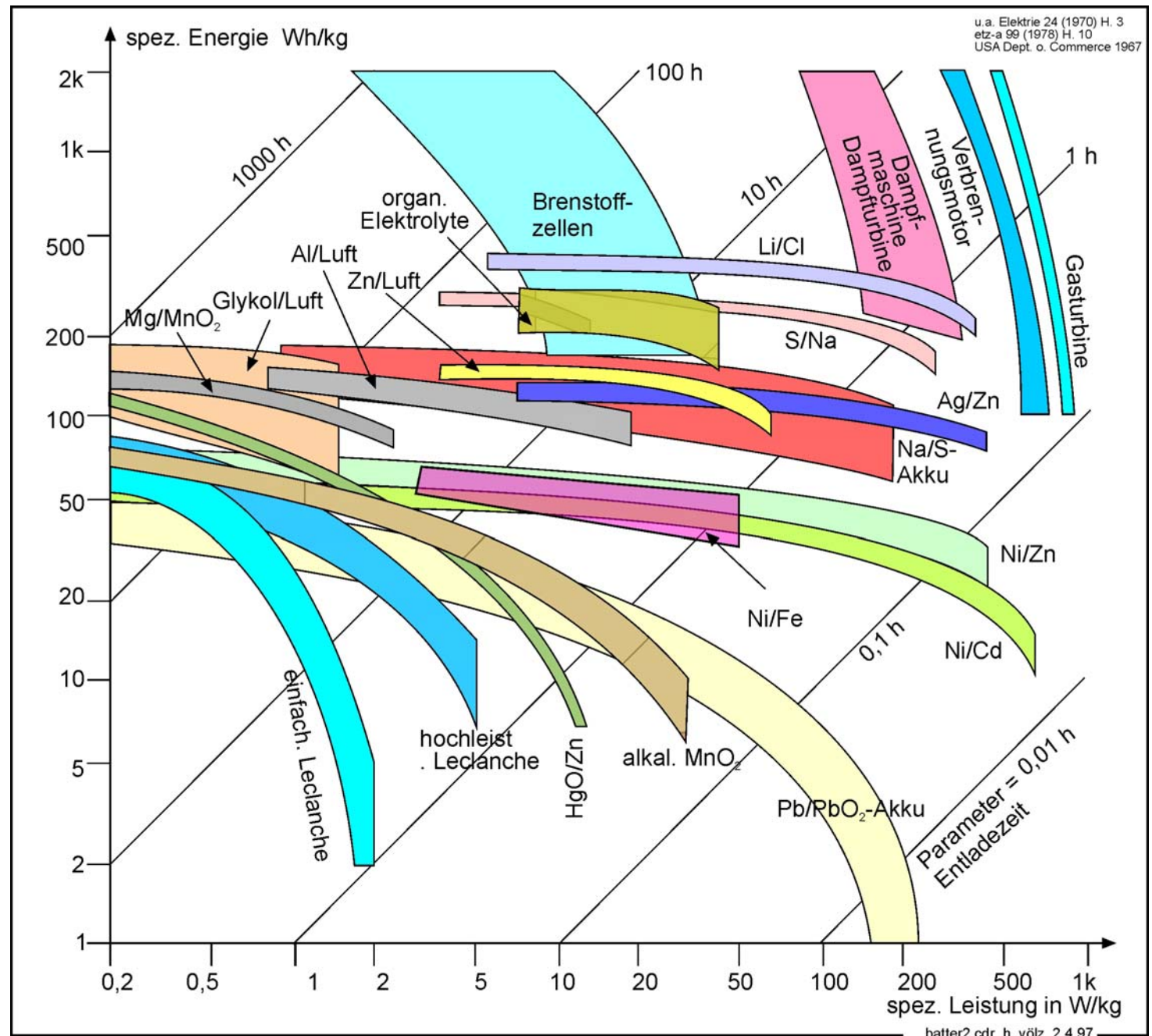
Zusätzlich angegeben ist die Nennspannung je Zelle

Primär-Zellen	Sekundär-Zellen (Akkus)
Alkali-Mangan (1,5 V)	
Zink-Kohle (1,5 V)	Pb = Blei (2 V)
Oxy-Nickel-Hydroxid (1,5 V)	NiCd = Nickel-Cadmium (1,2 V)
Lithium (2,9 bis 3,6 V)	NiMH = Nickel-Metallhydrid (1,2 V)
Lithium-Eisensulfid (1,5 V)	LiIon = Lithium-Ionen (3,7 V)
Zink-Luft (1,5 V)	LiPo = Lithium-Polymer (3,7 V)
Quecksilberoxid-Zink (1,35 V)	RAM = Rechargeable Alkaline Manganese (1,5 V)
Silberoxid-Zink (1,55 V)	





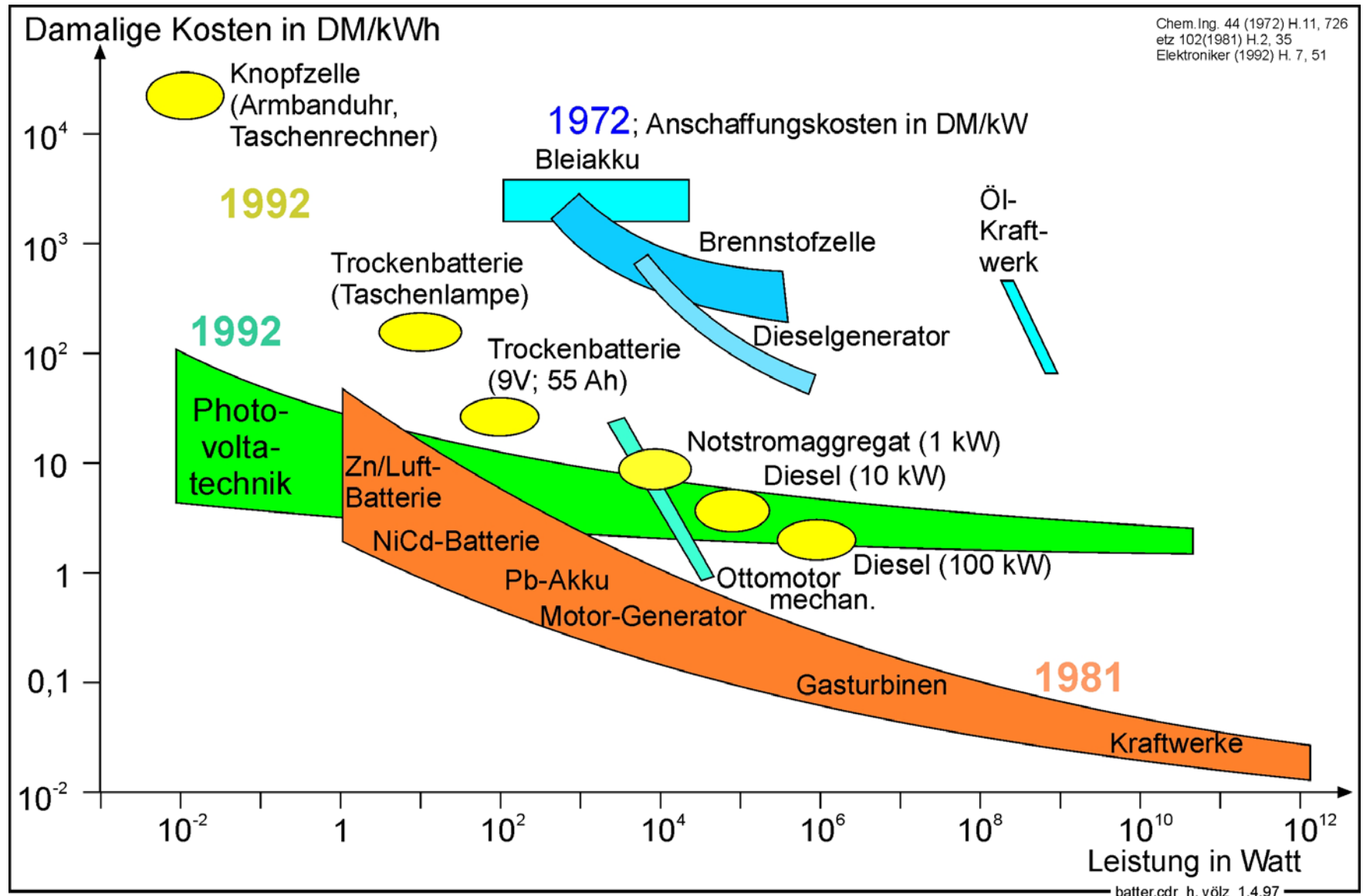
Dies ist ein vergrößerter und detailreicherer Ausschnitt aus dem vorigen Bild.



Die Energiekosten ändern sich stark mit der Zeit.

Bei den einzelnen Beispielen sind daher die Jahreszahlen der Quelle hinzugefügt.

Die angegebenen Kosten können so nur als Richtwerk betrachtet werden



Zur Geschichte

1789	LUIGI GALVANI (1737 - 1798) führt <i>Froschschenkel</i> -Versuch durch
1800	Graf ALESSANDRO GIUSEPPE ANTONIO ANASTASIO VOLTA (1745 - 1827) baut Säulenbatterie (≈ 100 V) auf
1803	JOHANN WILHELM RITTER (1776 - 1810) baut eine Vorform des Blei-Akku
1849	CLARK entwickelt die alkalische <i>Quecksilber-Oxid-Zink</i> -Zelle
1854	WILHELM JOSEF G. SINSTEDEN: Kupfer Kochsalz und Blei als Batterie, Bleiakku
1868	GEORGES LECLANCHÉ (1839 - 1882) entwickelt das nach ihm benannte Batterie mit Braunstein als Polaristor
1899	JUNGNER Grundlagen für den NiCd-Sammler
1900	P. SCHMIDT <i>Trockenelement</i> = Eindicken des Elektrolyts
1901	THOMAS ALVE EDISON (1847 - 1931) entwickelt NiCd-Akkumulator, erhält Patent dafür
1933	<i>Gasdichte</i> Zelle
1939	<i>Leak-Proof</i> -Zelle
1940	Quecksilber-Oxid-Zelle
1950	Gasdichte NiCd-Zelle
1950	Ag ₂ O-Zelle
1960	<i>Li-Zelle</i>
1970	AgO-Zelle
1987	NiMH-Akkus
1991	Co-Li-Ionen-Akku
1993	Nickel-Metallhydrid-Akku

Brennstoff-Zellen

Eine Brennstoffzelle kann **nicht** wie galvanischen Zellen **ge- oder entladen** werden.

Sie ist auch **kein Speicher** für elektrische Energie, sondern nur ein **Wandler** von Energie.

Ihr werden **Brennstoffe** z. B: Wasserstoff (H) zugeführt, die „verbrannt werden und dabei elektrische Energie frei setzen.

In diesem Fall ist der Prozess die Umkehrung der Elektrolyse von Wasser in Sauer- und Wasserstoff.

Eine **erste** derartige Brennstoffzelle wurde 1838 von CHRISTIAN FRIEDRICH SCHÖNBEIN erfunden.

Er umspülte zwei in Salzsäure befindliche Platindrähte mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff umspülte.

Heute gibt es **viele Varianten**, die sich nach Brennstoff, Aufbau, Temperatur usw. unterscheiden.

Sie werden seit langem als Energiewandler in der Raumfahrt (Apollo, Space Shuttle) und für U-Boot-Antriebe verwendet.

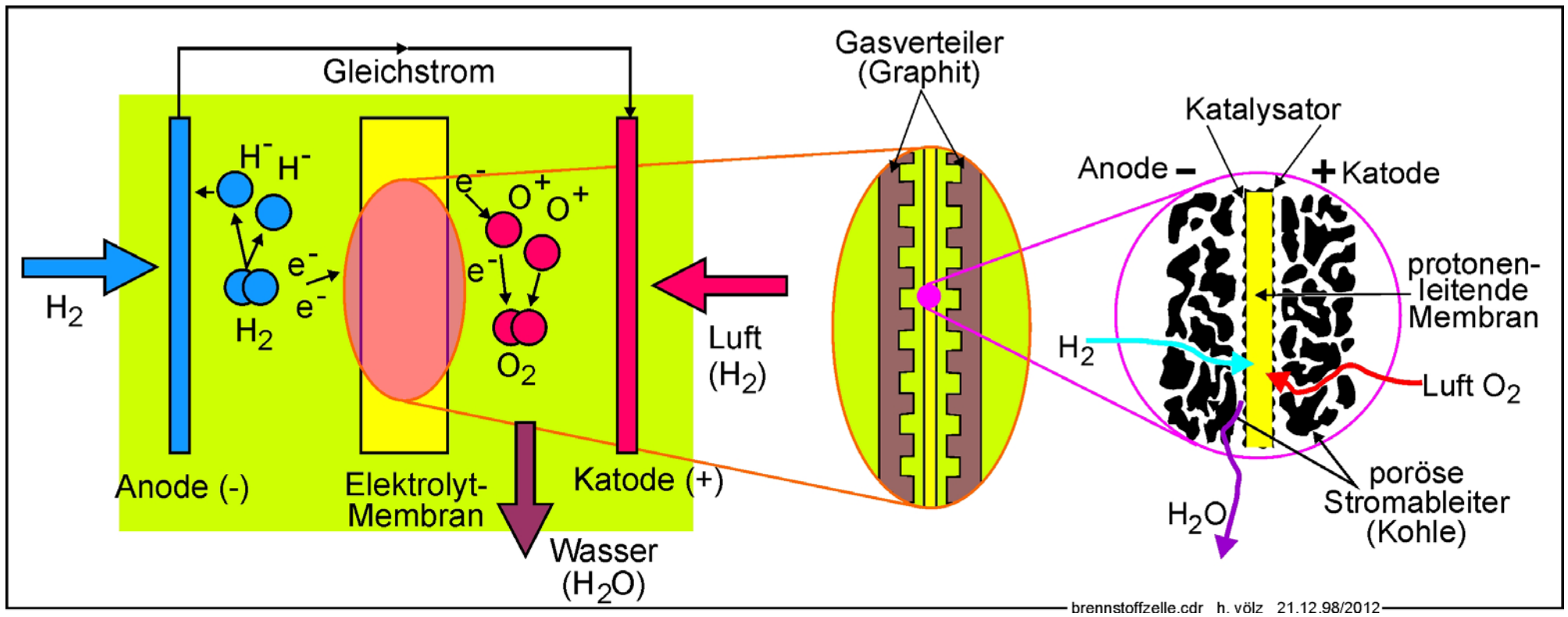
Ihre **Elektroden** bestehen aus Metall oder Kohlenstoff-Nanoröhren, die mit einem **Katalysator** beschichtet sind (Pt, Pd).

Sie sind durch eine Membran oder einen Elektrolyten (Ionenleiter) **voneinander getrennt** sind.

Dafür kommen meist gelöste Laugen, Säuren oder Alkalicarbonatschmelzen zum Einsatz. **Typische Reaktionen** sind:

	saure Zelle	alkalische Zelle
Minuspole (Anode)	$4 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}_2 \Rightarrow 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4 \text{e}^-$	$2 \text{H}_2 + 4 \text{OH}^- \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^-$
Pluspol (Katode)	$\text{O}_2 + 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4 \text{e}^- \Rightarrow 6 \text{H}_2\text{O}$	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \Rightarrow 4 \text{OH}^-$
Gesamt	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Da ständig Wasser gebildet wird, verdünnt sich die Säure bzw. Lauge und muss deshalb ständig nachgefüllt werden.



brennstoffzelle.cdr h. vözl 21.12.98/2012

Es müssten eigentlich noch Zellen erwähnt werden, die mit **Radioaktivität** α - (kleine Reichweite) oder β -Strahler arbeiten und so hohe Spannungen bei kleinsten Strömen liefern.

Ströme und Magnetismus

Um einen fließenden elektrischen Strom entsteht immer ein Magnetfeld. Hierfür gilt das Gesetz von BIOT-SAVART. JEAN BAPTISTE BIOT (1774 - 1862) und FÉLIX SAVART (1791 - 1841); Gesetz von 1820

Mit dem Strom I längs einer Wegstrecke ds beträgt die **Magnetfeld-Komponente** im Abstand r unter dem Winkel φ

$$dH = \frac{I}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sin(\varphi) \cdot ds.$$

Für einen **Kreisstrom** (Drahtwindung) mit dem Radius R ergibt sich auf der x -Achse an der Koordinate x die Feldstärke

$$H_x = \frac{I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

Bei einer **Spule** sind n Windungen (Kreisströme) mit dem Radius R dicht aneinandergelegt. Ist ihre Länge $l \ll R$, so existiert in ihrem Innern die Feldstärke

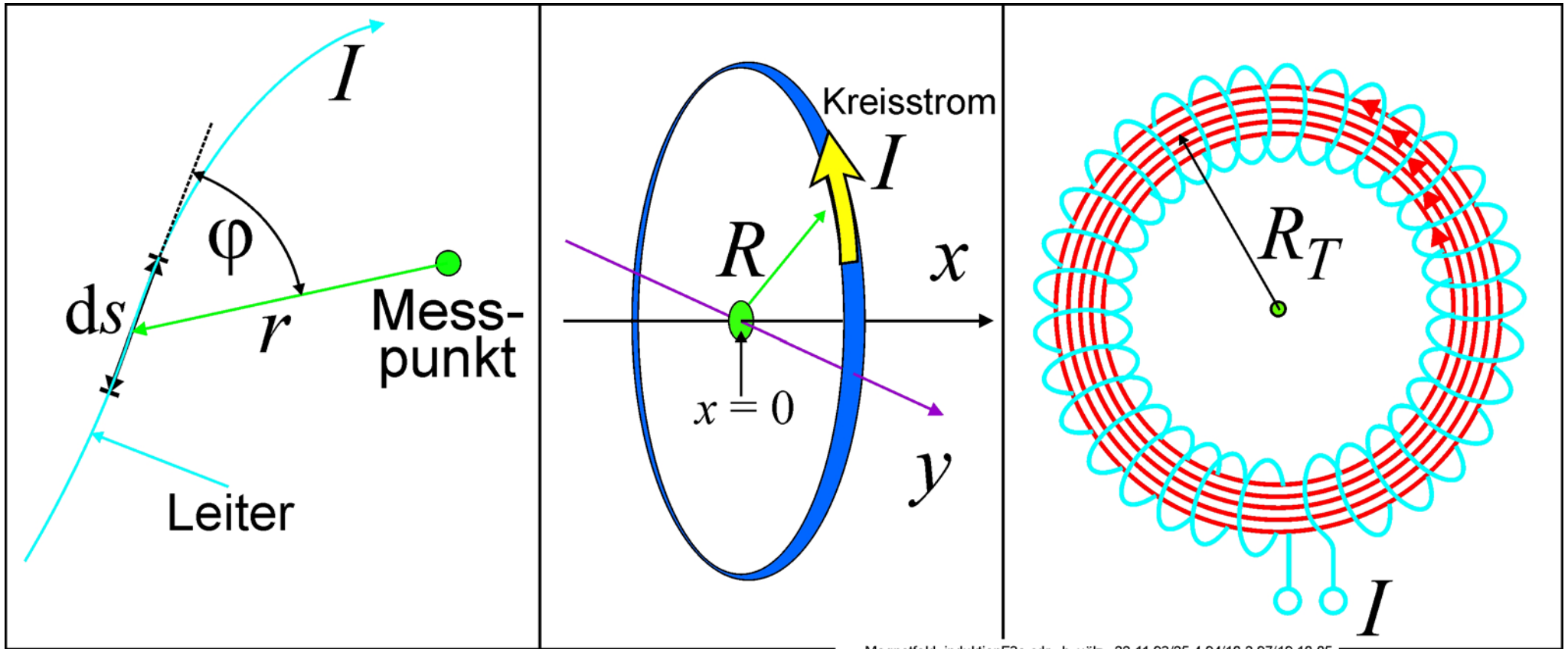
$$H_x = \frac{n \cdot I}{l}.$$

Dieses Ergebnis macht die **Maßeinheit** der magnetischen Feldstärke in A/m verständlich. Häufig wird aber die cgs-Einheit (nicht SI) Örsted benutzt:

$$1 \text{ Oe} = \frac{10}{4 \cdot \pi} \text{ A/cm} \approx 0,796 \text{ A/cm}.$$

Wird die Spule zu einem **Toroid** mit dem Radius R_T geformt, dann gilt für die Spulenachse

$$H = \frac{n}{2 \cdot \pi \cdot R_T}.$$



Magnetfeld_induktionF3a.cdr h. völz 22.11.93/25.4.94/10.2.97/19.10.05

Wirkung von Magnetfeldern

Wie alle Felder, sind auch Magnetfelder *nur* durch ihre (Kraft-) *Wirkungen auf „Passendes“* feststellbar:

Die Richtung der Kraftwirkung wird dabei durch Feldlinien bestimmt (s. u. Eisenfeilspäne)

Fließen durch zwei benachbarte Leitungen die Ströme in der gleichen Richtung, so *ziehen sich an*.

Entgegengesetzt gerichtete Ströme *stoßen sich ab*.

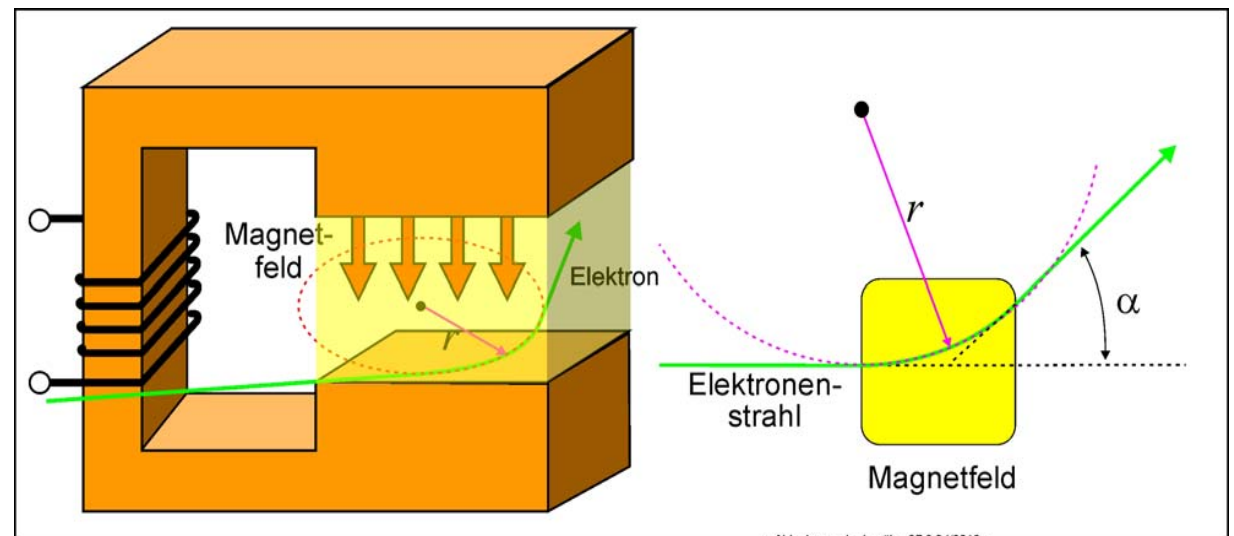
Hierauf beruht – noch immer statt Zählen von Elektronen – die *Definition der Stromstärke*:

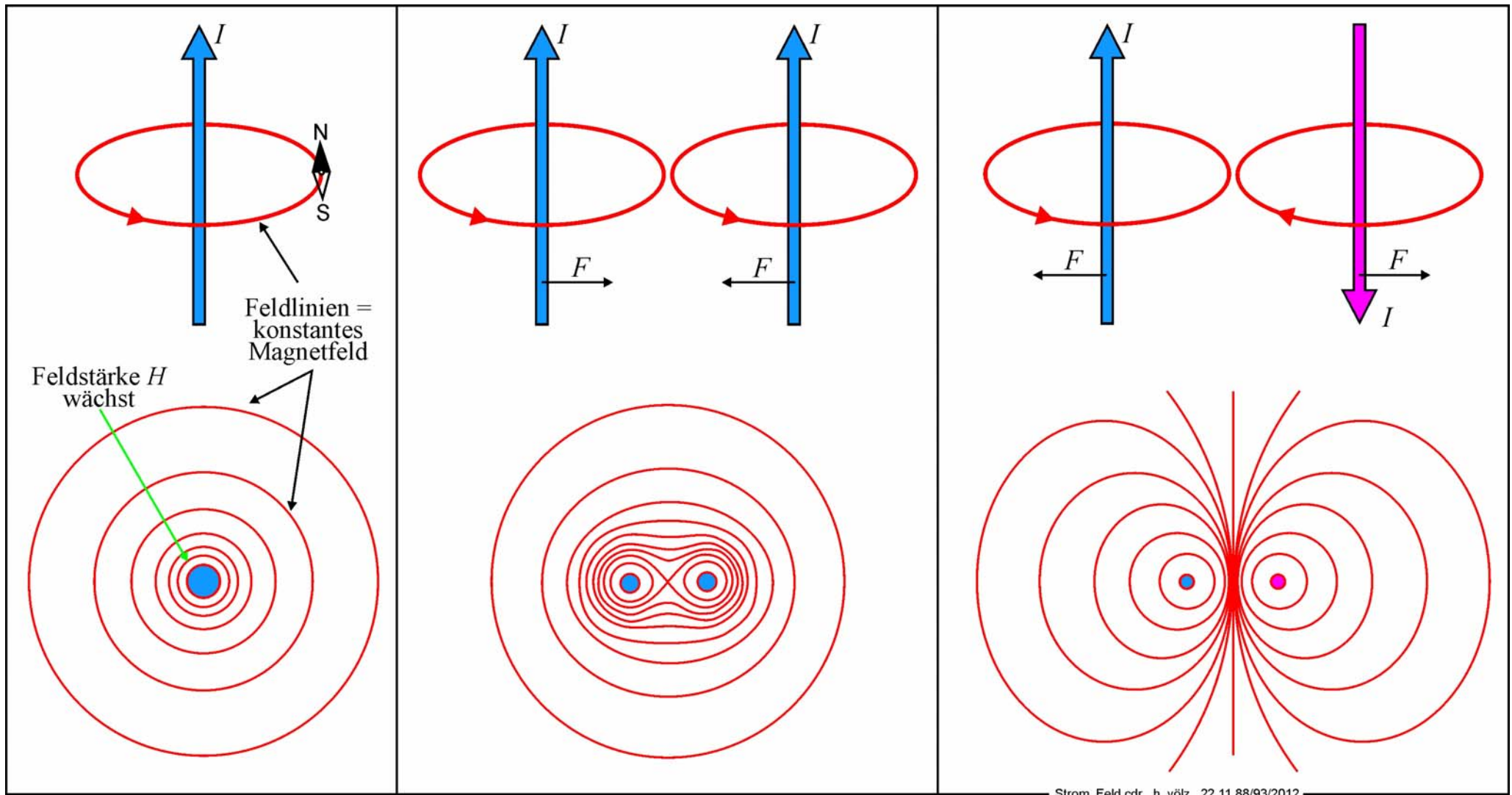
Die Basiseinheit 1 Ampere (1 A) ist die Stärke des zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die den Abstand von 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch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

Außerdem *lenkt* ein Magnetfeld *bewegte Ladungen*, z. B. Elektronen in ihrer Bewegungsrichtung *kreisförmig* ab.

Diese Ablenkung wird durch die LORENTZ-Kraft verursacht (s. u.): $F \sim v \cdot B \cdot \sin(\varphi)$.

HENDRIK ANTOON LORENTZ (1853 - 1928).





Hinweis: Die Bilder zu Ladungen S. 24 sind 3-dimensional, hier sind die Felder nur zweidimensional.

Feldlinien des Magnetfeldes

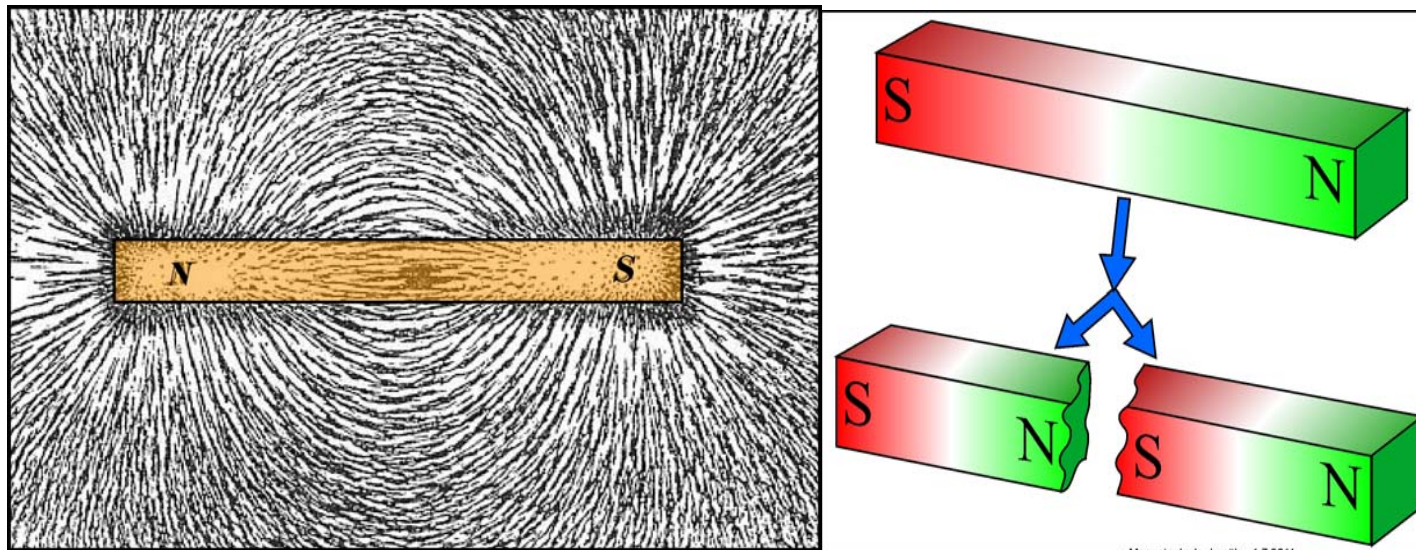
Feldlinien dienen stets zur Veranschaulichung von Feldern, mittelbar lassen sie sich sichtbar machen (Eisenfeilspäne!) Die **Feldlinien** des Magnetismus sind im Gegensatz zu allen anderen Feldern **immer geschlossen**. Sie enden also nicht wie bei Elektrostatik bei Ladungen oder wie bei der Schwerkraft bei Massen (→ vrgl. Grundkräfte!).

Achtung!

Entgegen theoretischen Ansätzen wurde **kein magnetischer „Monopol“**, d. h. isolierter Süd- oder Nordpol nachgewiesen. Außerhalb des Magneten verlaufen die Feldlinien **vom Nord- zum Südpol**.

Das Feld von **Dauermagneten** geht durch den Magneten hindurch und rührt nicht von bewegten Elektronen her.

Es geht auf nicht kompensierte **quantenphysikalische Spins** zurück (s. u.)



Magnetische Flussdichte = Induktion = B

Ursprünglich wurde angenommen, dass Magnetismus ähnlich wie eine **Flüssigkeit** durch den Raum fließt. Obwohl das lange als falsch erkannt ist, wurden die Begriffe magnetischer Fluss und Flussdichte beibehalten. Der Magnetismus wirkt **orthogonal** (senkrecht) zu den Feldlinien, seine **Gesamtheit** ist der **magnetische Fluss Φ** (Phi). In ihm ist mittelbar die gesamte **Energie des Magnetfeldes** enthalten. Er wird in V·s = Wb (Weber) gemessen. Die **Ursache** des Magnetflusses ist die Feldstärke H

Die **Flussdichte** betrifft den Flussanteil, der durch die **Fläche** A „fließt“.

$$B = \Phi/A.$$

Sie wird in Tesla gemessen: $1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G}$ (Gauß).

Mit der senkrecht zum Querschnitt herrschenden **Feldstärke** H ergibt sich die **Energiedichte** $w = B \cdot H / 2$.

Im *Vakuum* ist die Flussdichte B *proportional* zu H gemäß

$$B = \mu_0 \cdot H.$$

$\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ H/m ist die absolute Permeabilität (H = Henry = V·s/A).

Meist wird die Flussdichte mit einer *Spule* aus n Windungen gemessen.

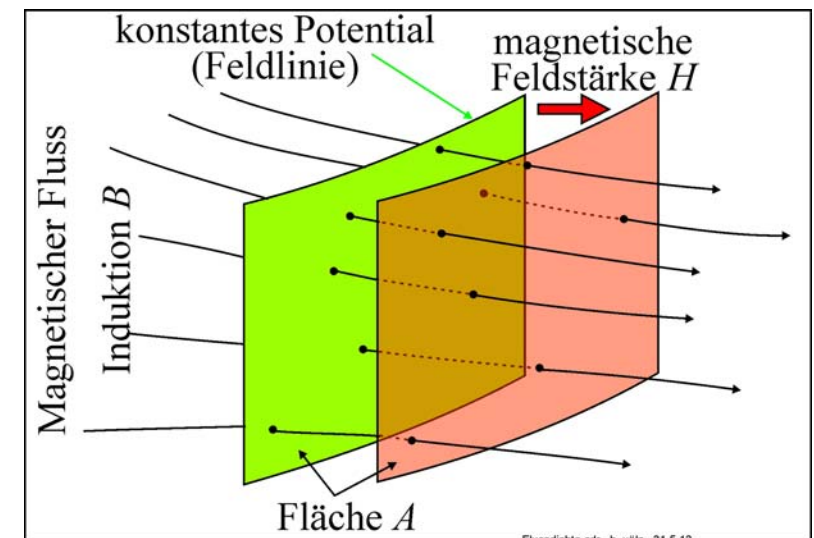
In ihr tritt jedoch nur dann eine **Induktionsspannung** (s. u.) auf, wenn sich B , Φ oder die Fläche A ändern:

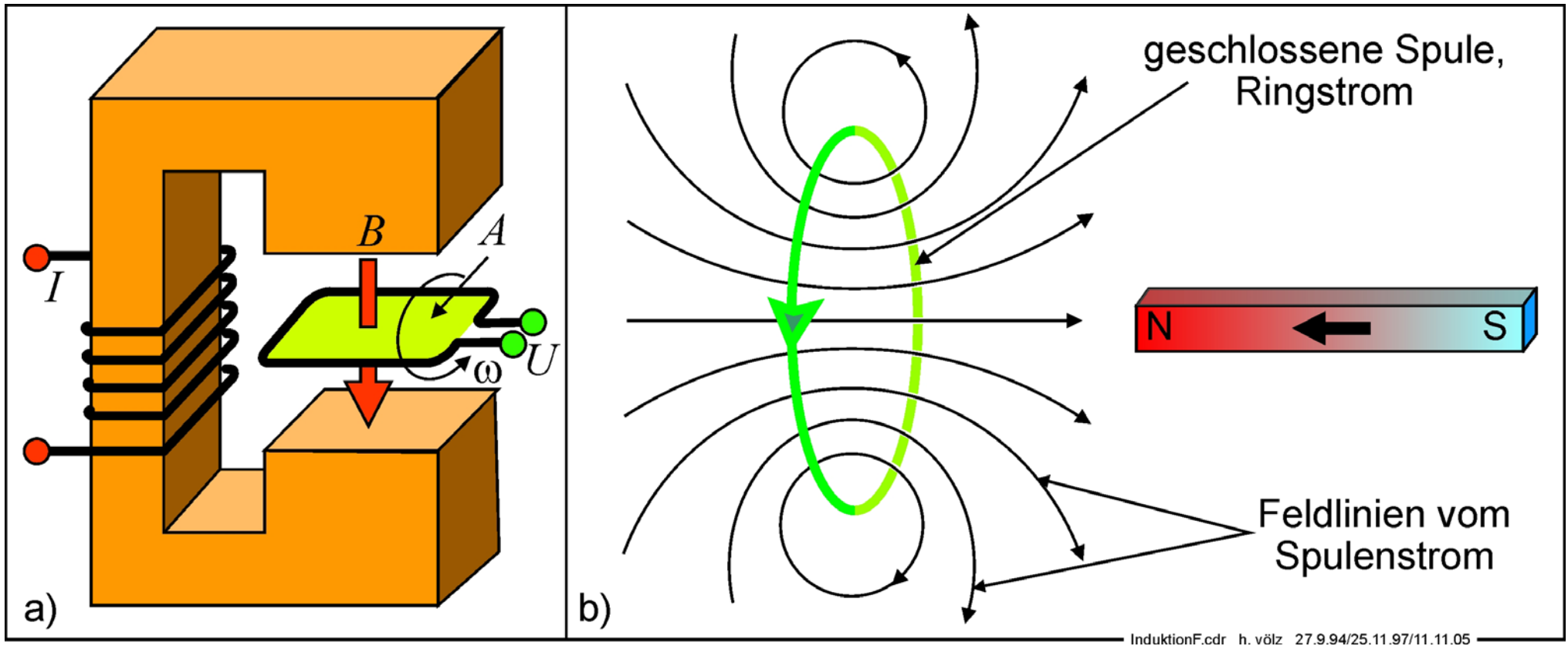
$$U_{ind} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = n \cdot \frac{d}{dt} \int B \cdot dA.$$

Beispiele hierfür sind eine Drehspule im Magnetfeld oder die Bewegung eines Magneten.

Für die Messung weniger geeignet sind der HALL-Effekt oder die Ablenkung einer Magnetnadel bzw. bewegter Ladung.

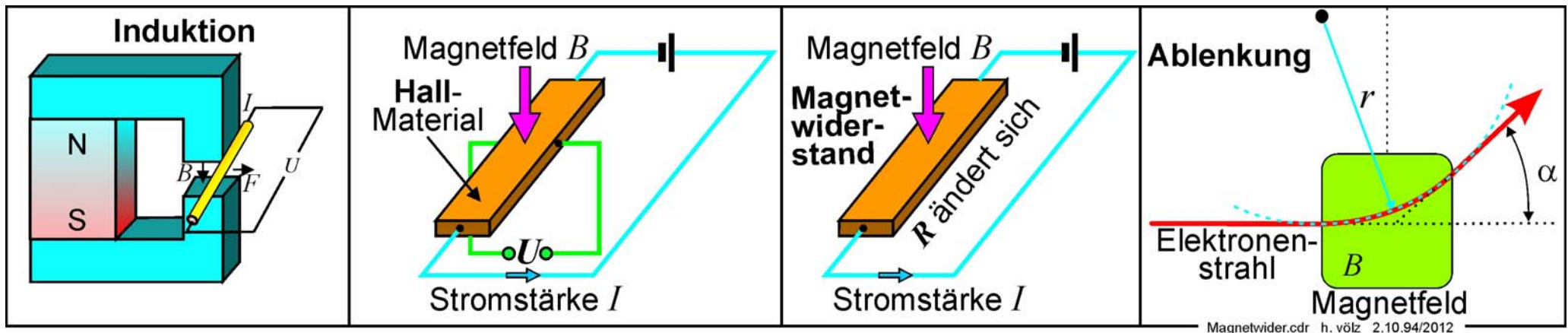
In Elektromotoren, Transformatoren usw. beträgt die typische magnetische Flussdichte ca. 1 T.





Wirkungen des Magnetflusses

- **Induktions-Spannung** $U \sim dB/dt$. Sie wird u. a. *genutzt* bei Stromgeneratoren (Dynamos) sowie Wandlern wie Mikrofonen und Magnetköpfen.
- **HALL-Effekt**, $U \sim B$, (EDWIN HERBERT HALL; 1855 - 1938). Sie führte zu wenigen technischen Anwendungen.
- **Magnetoresistiver Widerstand** (MR), $R = f(|B|)$. Die spätere Weiterentwicklung zum GMR (großer, great MR) wird in Magnetköpfen benutzt und führte zum Nobelpreis.
- **Ablenkung bewegter Ladungen** durch LORENTZ-Kraft $r \sim B$ (HENDRIK ANTOON LORENTZ; 1853 - 1928). Sie hat Bedeutung bei einigen Elektronenröhren, dem Röhrenmonitor und den klassischen Oszillografen.



Magnetfelder im Material

In Materialien existiert die relative Permeabilität $\mu_r \neq 1$. Das verändert die magnetische Induktion B :

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

Im Weiteren wird kein **dia-** ($\mu_r = 1 - \chi$) und **paramagnetisches** ($\mu_r = 1 + \chi$) mit $\chi \ll 1$ Material betrachtet. Sie haben einen nur sehr geringen Einfluss auf ein Magnetfeld und sind daher **kaum von technischer Bedeutung**. Fälschlich werden sie auch unmagnetisch genannt.

Unmagnetisch muss jedoch von unmagnetisiert unterschieden werden (s. u.).

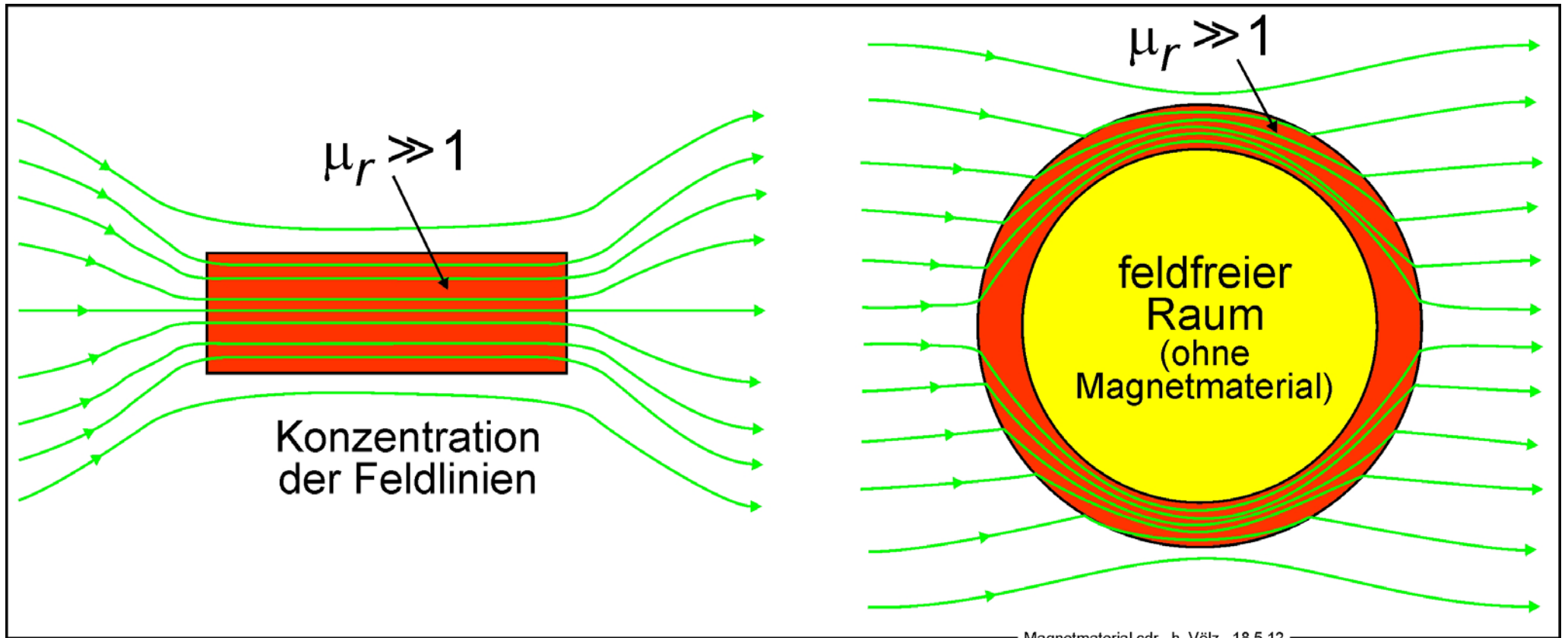
$\chi = \mu_r - 1$ heißt auch Suszeptibilität.

Hauptsächlich wird weiterhin **(ferro-) magnetisches** Material mit $\mu_r \gg 1$ und daher $\mu_r \approx \chi$ behandelt. Es „**verdichtet**“ den Fluss und die Feldlinien.

Verläuft der gesamte Fluss Φ nicht im Material, so wird ein Teil aus der Nachbarschaft in das Material hingezogen. Dadurch sinkt gegenüber der Umgebung die Feldstärke im Material.

An den **Grenzflächen** treten Unstetigkeiten auf, die etwa der **Lichtbrechung** an Oberflächen entsprechen.

Das Hineinziehen des Flusses in das Material kann soweit gehen, dass **feldfreie Räume** entstehen. Auf diesem Prinzip beruhen die magnetischen **Abschirmungen** bis hin zum FARADAY-Raum.



Hysteresese

In vielen naturwissenschaftlichen Gesetzen ist die Wirkung weitgehend der Ursache proportional.

Magnetisch entspräche das dem einfachen Gesetz: $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot (H + M)$.

Darin wird $M = (\mu_r - 1) \cdot H = \chi \cdot H$ als **Magnetisierung** bezeichnet. Sie ermöglicht eine etwas übersichtlichere Darstellung. Bei vielen magnetischen Materialien wird der obige lineare Zusammenhang weitgehend durch die Hysteresese aufgehoben. Der Zusammenhang zwischen erregender Feldstärke H und bewirkter Magnetisierung $B = f(H)$ ist recht kompliziert. U. a. hinterlässt jede Feldeinwirkung nach ihrem Verschwinden eine **remanente Magnetisierung** B_R bzw. M_R . Solch ein Material besitzt also ein „Gedächtnis“ bezüglich der Vergangenheit und ermöglicht sehr gute Speicher.

Die Vielzahl der möglichen Kurvenverläufe zeigt das folgende Bild:

Mit steigender Erregung wird schließlich bei recht hoher Feldstärke die **Sättigungsmagnetisierung** B_S bzw. M_S erreicht.

Bei einem entsprechend starken Wechselfeld wird die **Grenzhysteresese** durchlaufen.

Ihr Flächeninhalt bewirkt die **Hystereseseverluste**, die eine Erwärmung des Materials hervorrufen.

Die **Koerzitiv-Feldstärke** H_C ist notwendig, um die Sättigungsmagnetisierung rückgängig zu machen.

Innerhalb der Grenzhysteresese sind sehr vielfältige Kurvenverläufe möglich.

Für unterschiedliche Erregungen H treten gibt es verschiedene Remanenzen $M_R = f(H_{max}) \Rightarrow$ Remanenzkurve.

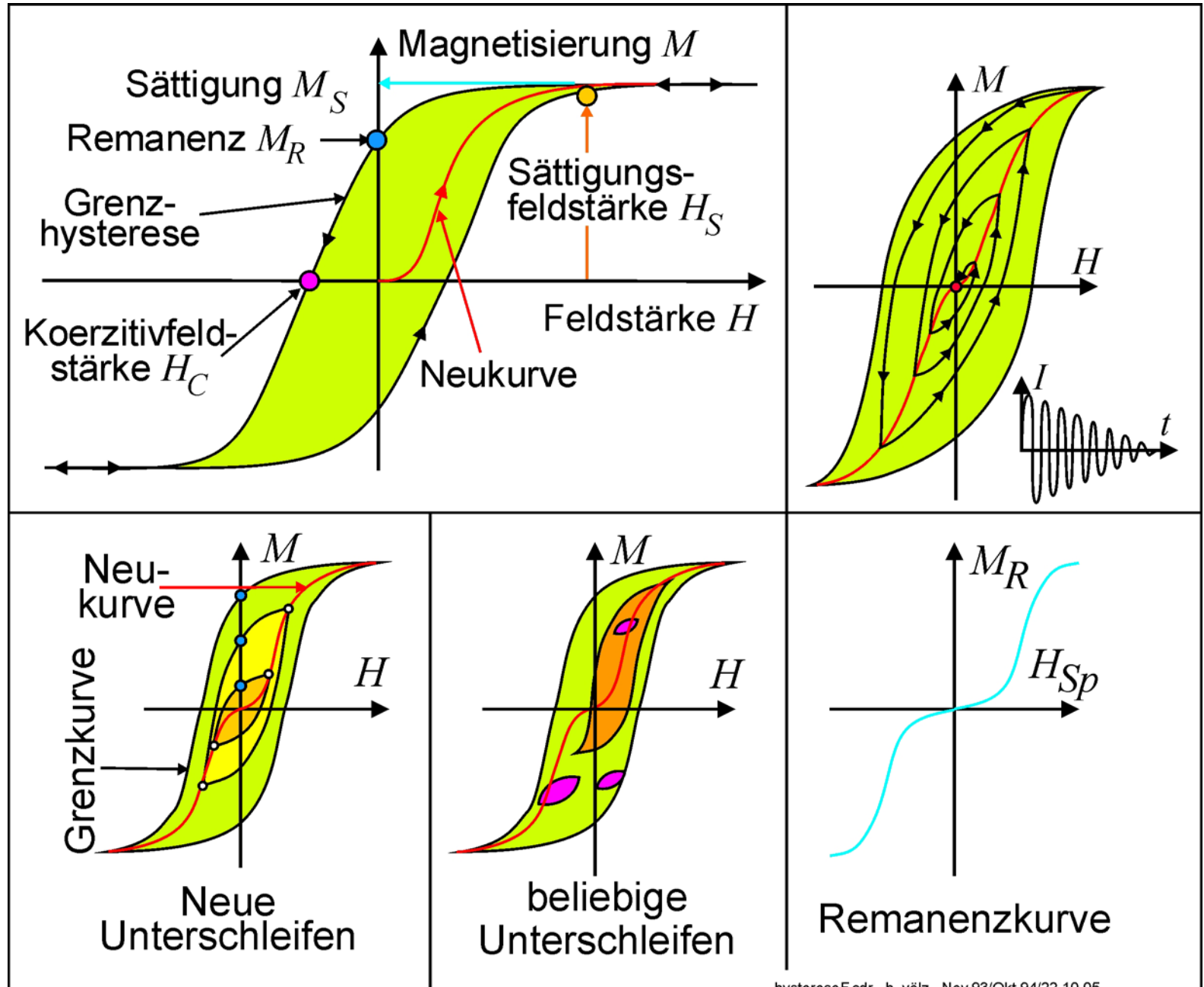
Durch ein abklingendes Wechselfeld kann der „eigentliche Nullpunkt“ = **unmagnetisiert** erreicht werden.

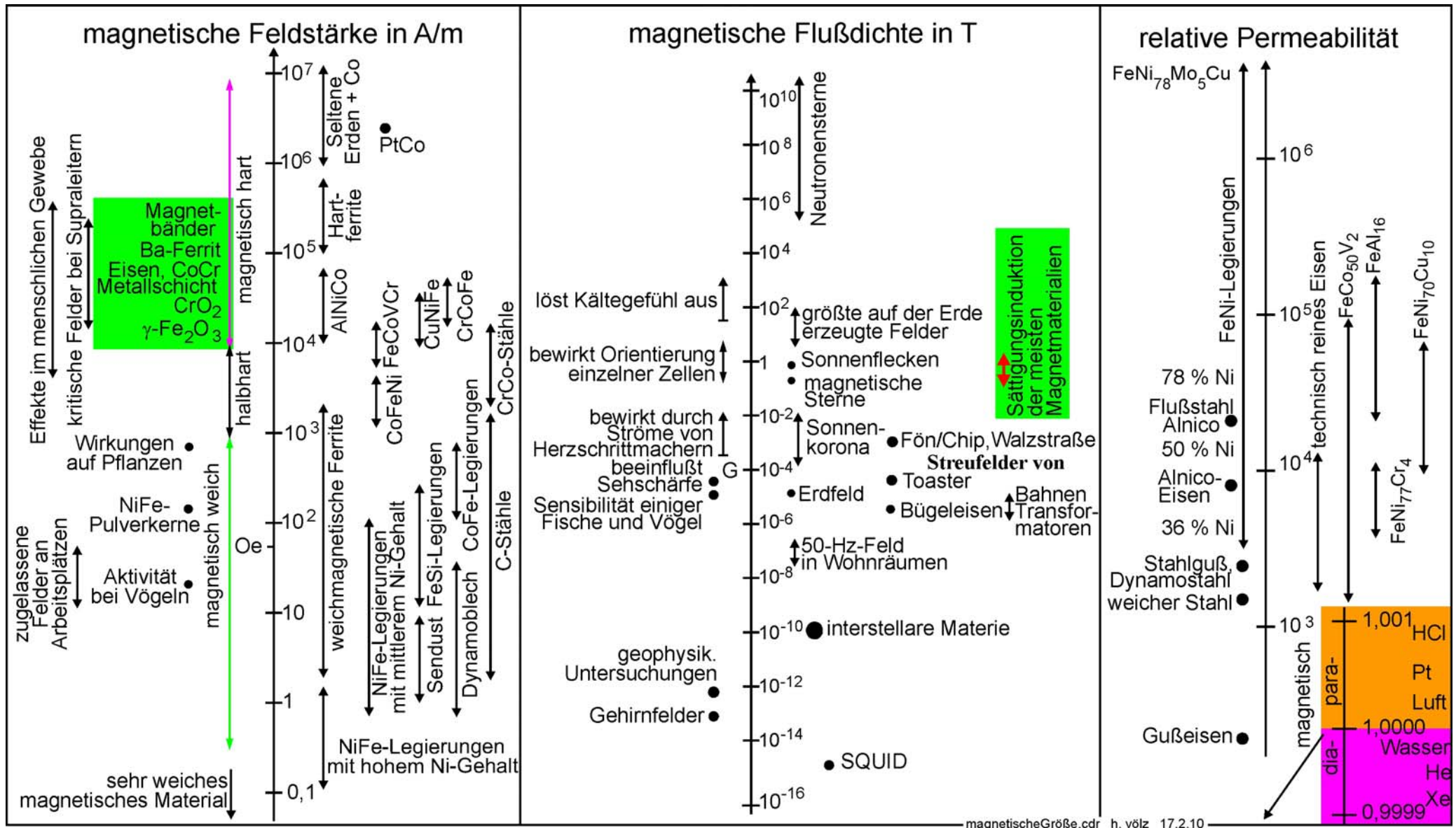
Hier **erscheint** jedes magnetische Material unmagnetisch.

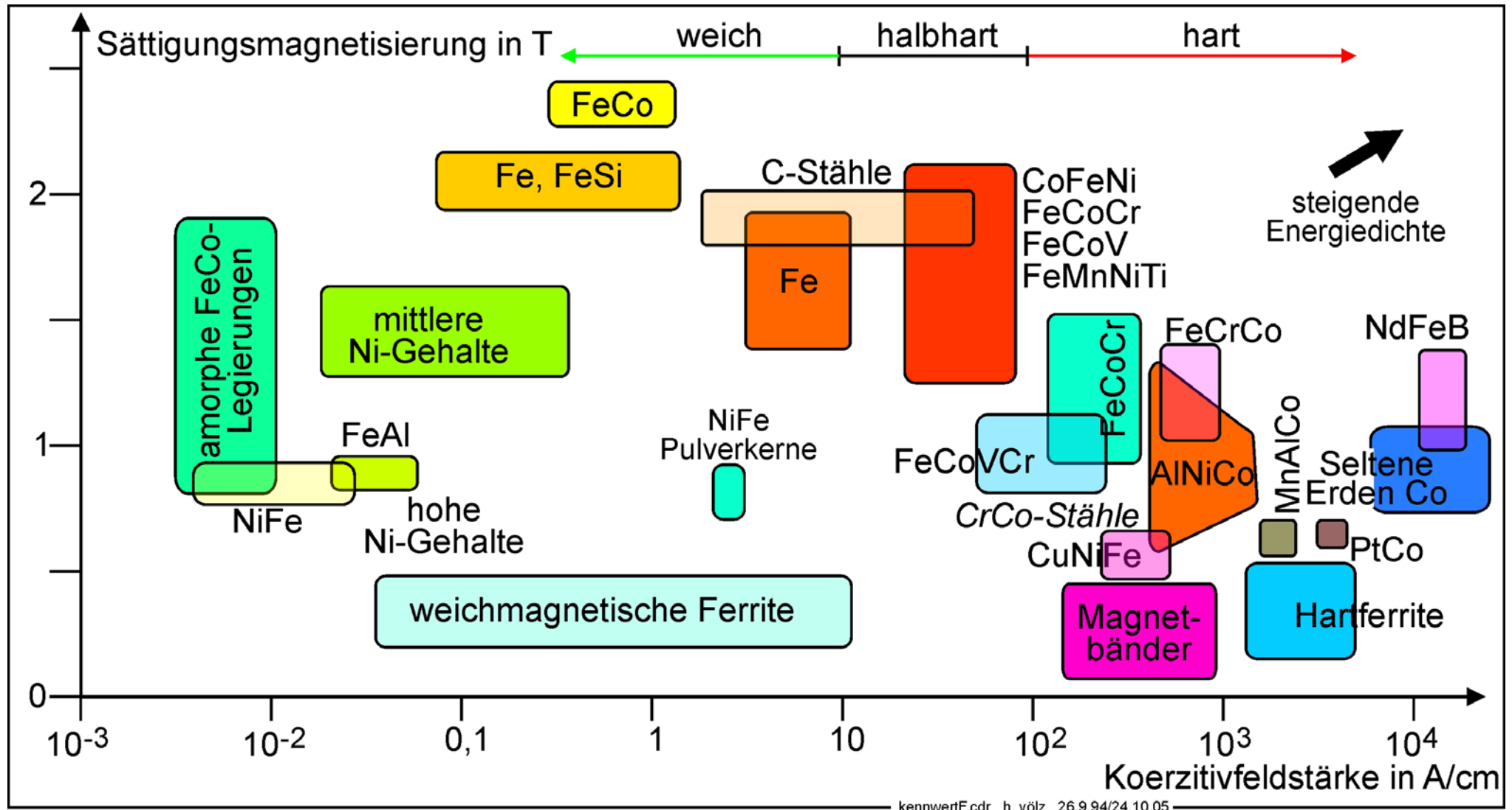
Hier beginnt die **Neukurve** (früher jungfräuliche Kurve).

Besonders wichtige **Kenndaten** sind Sättigungs-Magnetisierung, Koerzitiv-Feldstärke und Anfangspermeabilität.

Ein anschauliches Beispiel für die Hysterese ist ein Gummiband. Die Feldstärke entspricht dem Strom, die Magnetisierung der Länge des Bandes. Wird es unter Zug gedehnt, so gelangt es nach Aufhören die Zuges zunächst nicht auf seine ursprüngliche Länge zurück. Der größeren Länge entspricht die die Remanenz.







Magnetfelder der Atome

Gemäß dem klassischen Atommodell bewegen sich die Elektronen auf Kreis- und Ellipsenbahnen um den Atomkern. Deshalb führte NILS BOHR (1885 - 1962) das **BOHRsche Magneton** als magnetisches Bahn-Dreh-Moment ein:

$$\mu_B = \frac{e_0 \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m_e} \approx 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2.$$

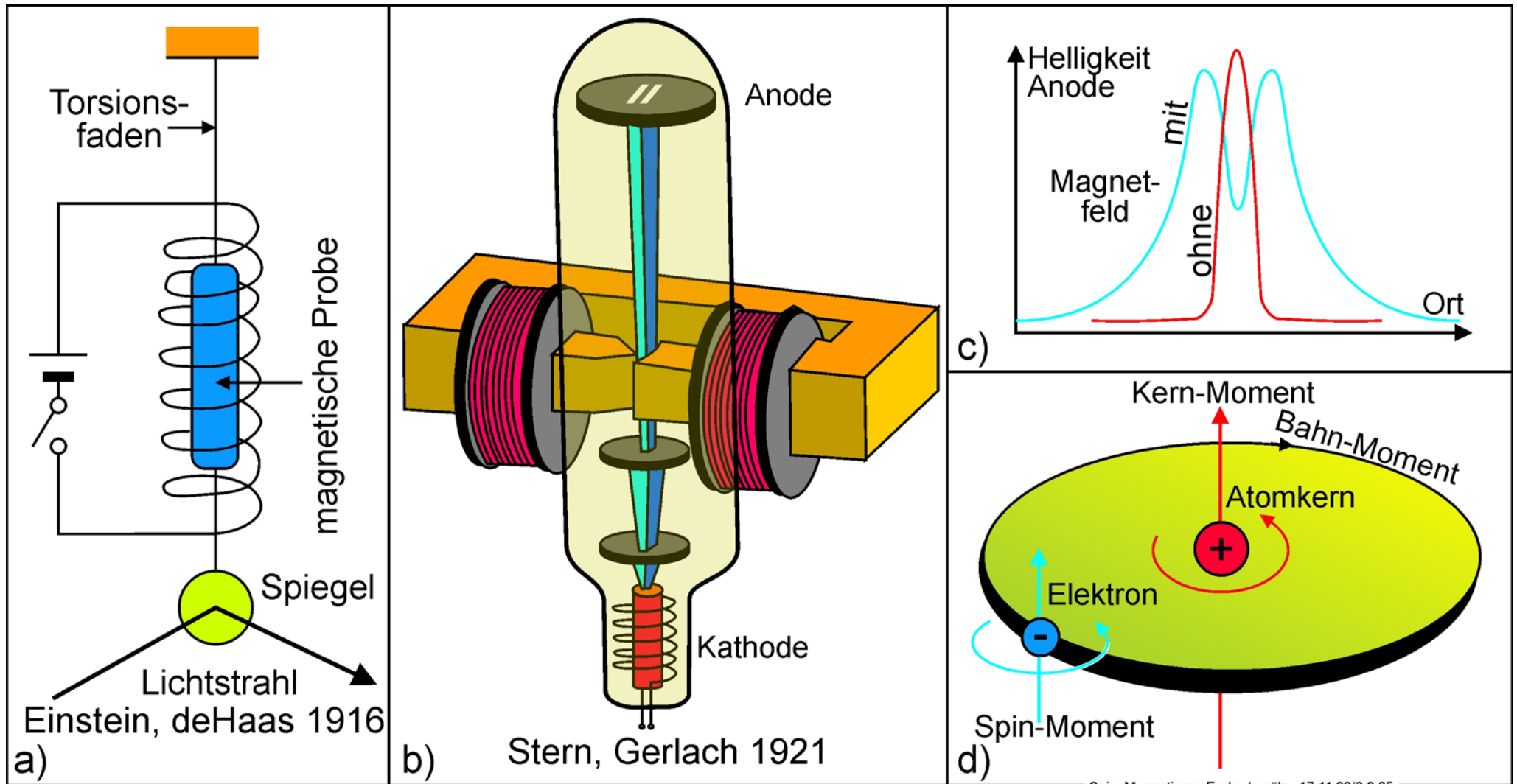
Darin bedeuten: e_0 die Elektronenladung, m_0 die Elektronenmasse und h die PLANCK'sche Konstante.

Achtung! μ_B hat keinen Bezug zur magnetischen Permeabilität μ_0 oder μ_r .

1916 wiesen ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) und WANDER JOHANNES DE HAAS (1878 – 1960) diese Kreisströme nach.

1921 zeigte dann der STERN-GERLACH-*Versuch* Effekte (OTTO STERN; 1888 – 1969; WALTHER GERLACH; 1889 – 1979): Es gibt die magnetischen Momente des *Spin* (Eigenrotation) von Atomkern und Elektronen (spin-up ↑, spin-down ↓).

Doch warum zeigen dann fast *nur die drei chemische Elemente* Fe, Ni und Co ein beachtliches Magnetfeld?



Spin_MagnetismusF.cdr h. vözl 17.11.93/3.9.05

Warum sind nur wenige Elemente magnetisch?

Das **PAULI-Verbot** besagt, dass es in einen Kristall usw. nur verschiedene *Quantenzustände* geben kann (WOLFGANG ERNST PAULI, 1900 - 1958).

In Ruhe nimmt ein System außerdem immer den Zustand mit der *niedrigsten Energie* an.

Hierdurch *kompensieren sich* weitgehend alle *magnetischen Momente* eines Atoms.

Erstaunlich ist es, dass die Energie eines Elektrons der inneren Bahn größer als die einer äußeren Bahn sein kann.

Dadurch besitzt die *äußere Schale bereits Elektronen* bevor alle Quantenzustände der inneren Schale besetzt sind.

Zusätzlich *schirmt* dabei die äußere Schale die Elektronen inneren Schale gegenüber Einflüssen *ab*.

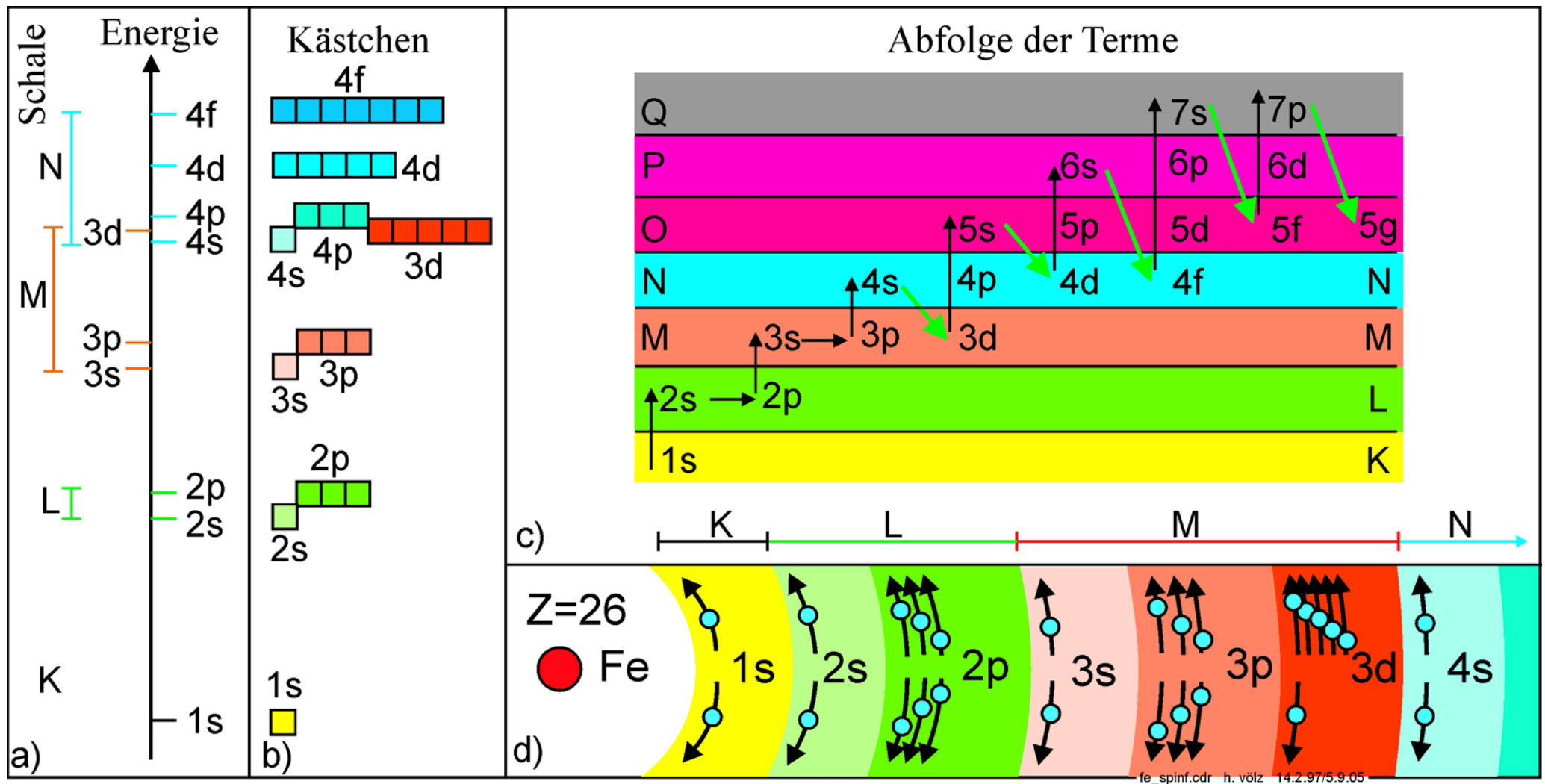
Deshalb verfügen die Spins der inneren Elektronen über Freiheiten. Sie müssen sich *nicht mehr kompensieren*.

Das tritt *erstmalig bei Fe, Co und Ni* auf. So besitzen sie ein beachtliches magnetisches Moment.

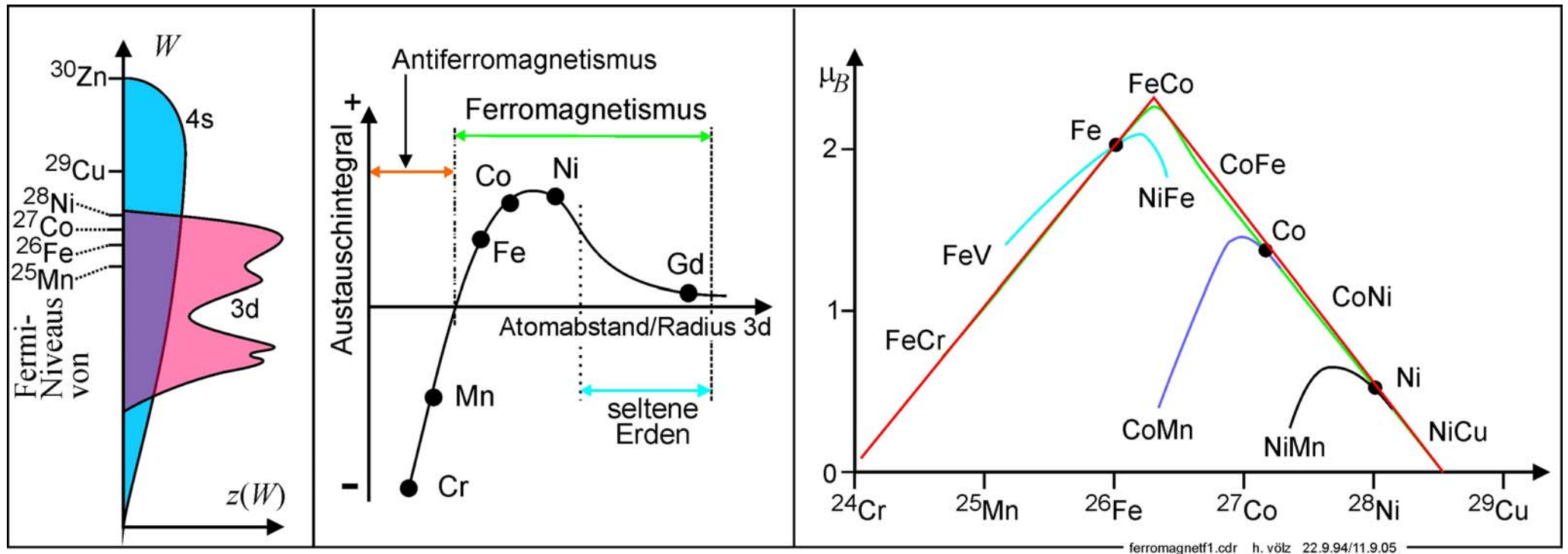
Später kommt das dann bei den *Seltenen Erden* vor. Sie wurden für den Magnetismus erst vor ca. 20 Jahren wichtig.

Schließlich tritt dieser Effekt dann noch einmal bei einigen sehr *schweren Elementen* auf.

Für die Darstellung der Zusammenhänge gibt es mehrere Möglichkeiten.



Links: **Belegungsdichte** der Terme mit Elektronen und **FERMI-Niveaus** von einigen Elementen.
Mitte: Das **Austauschintegral** der Elemente in Abhängigkeit von Atomabstand und Radius.
Rechts: Verlauf des gemessenen magnetischen Momente für einige Elemente und Verbindungen.



Erklärung der Hysterese

Ferromagnetisches Material ist immer vollständig *spontan magnetisiert*.

Das ist an der Oberfläche mittels einer magnetischen Flüssigkeit (sehr kleine Fe-Späne in Flüssigkeit) nachweisbar. Dabei zeigt sich, dass es überall kleine **Bereiche** gibt, die in einer Richtung magnetisch gesättigt sind. Sie sind durch so genannte **Wände** voneinander getrennt, die weitgehend an Fehlstellen des Materials hängen bleiben. Ohne äußeres Magnetfeld ist die jeweilige Richtung hauptsächlich durch die **Form-Anisotropie** des Bereiches festgelegt.

Ein **äußeres Magnetfeld** wirkt auf die einzelnen Bereiche mit **drei möglichen Änderungen** ein.

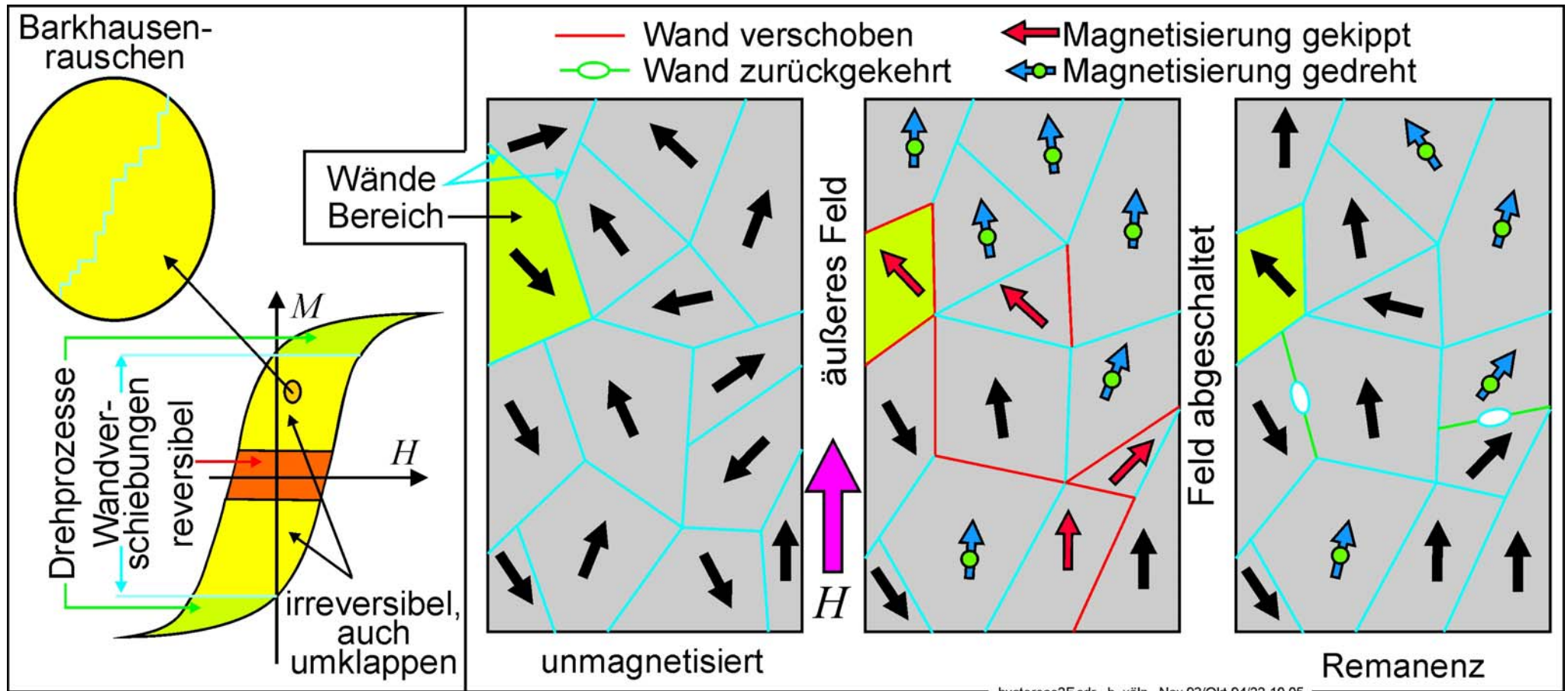
Mit steigendem Magnetfeld treten sie bevorzugt in der folgenden Reihenfolge auf:

1. **Wandverschiebungen:** Hierbei verlagern sich die trennenden Wände zugunsten der Bereiche des äußeren Feldes. Diese Änderungen sind teilweise reversibel bzw. irreversibel.
2. **Klappprozesse:** Zur besseren Anpassung springt die Magnetisierungsrichtung eines Bereichs in die entgegengesetzte Richtung. Diese Änderung ist **voll irreversibel**. Auch nach dem Verschwinden des äußeren Feldes bleibt die neue Richtung erhalten. Das Umklappen ist mittels BARKHAUSEN-Effekt nachweisbar. GEORG HEINRICH BARKHAUSEN (1881 - 1923)
3. **Drehprozesse:** Das Magnetfeld im Material wird kontinuierlich in die Richtung des äußeren Feldes gedreht. Dieser Prozess ist voll reversibel. Die Änderung verschwindet völlig, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird.

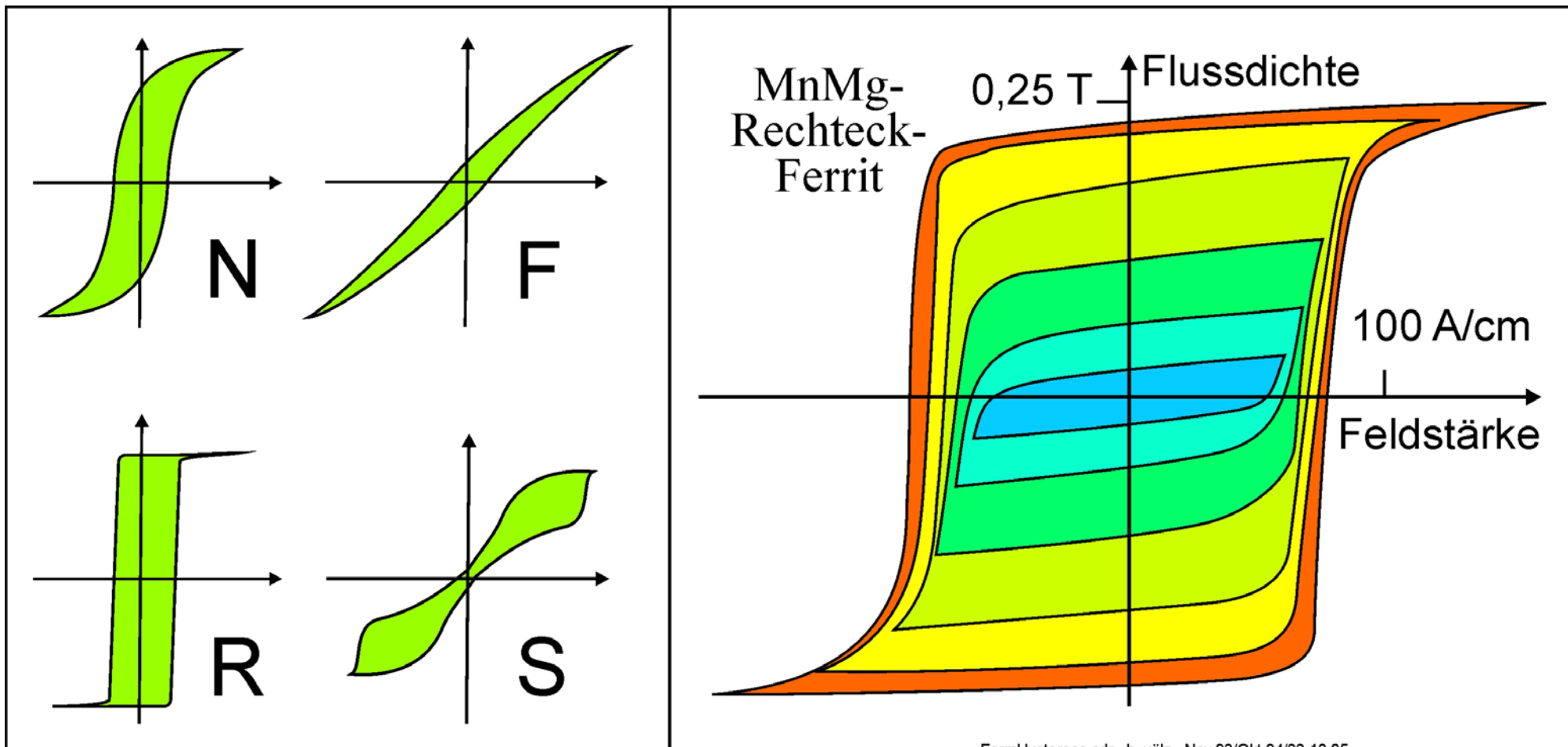
Das Zusammenwirken der drei Effekte ist die Ursache der komplizierten Hysterese-Kurven. Je nach Material, Kristallisation usw. können sehr unterschiedliche Kurvenverläufe auftreten.

Magnetisches Material ist also immer vollständig spontan magnetisiert!

Doch pauschal (bezogen auf die Umwelt) kann es unmagnetisch, genauer **unmagnetisiert erscheinen**.

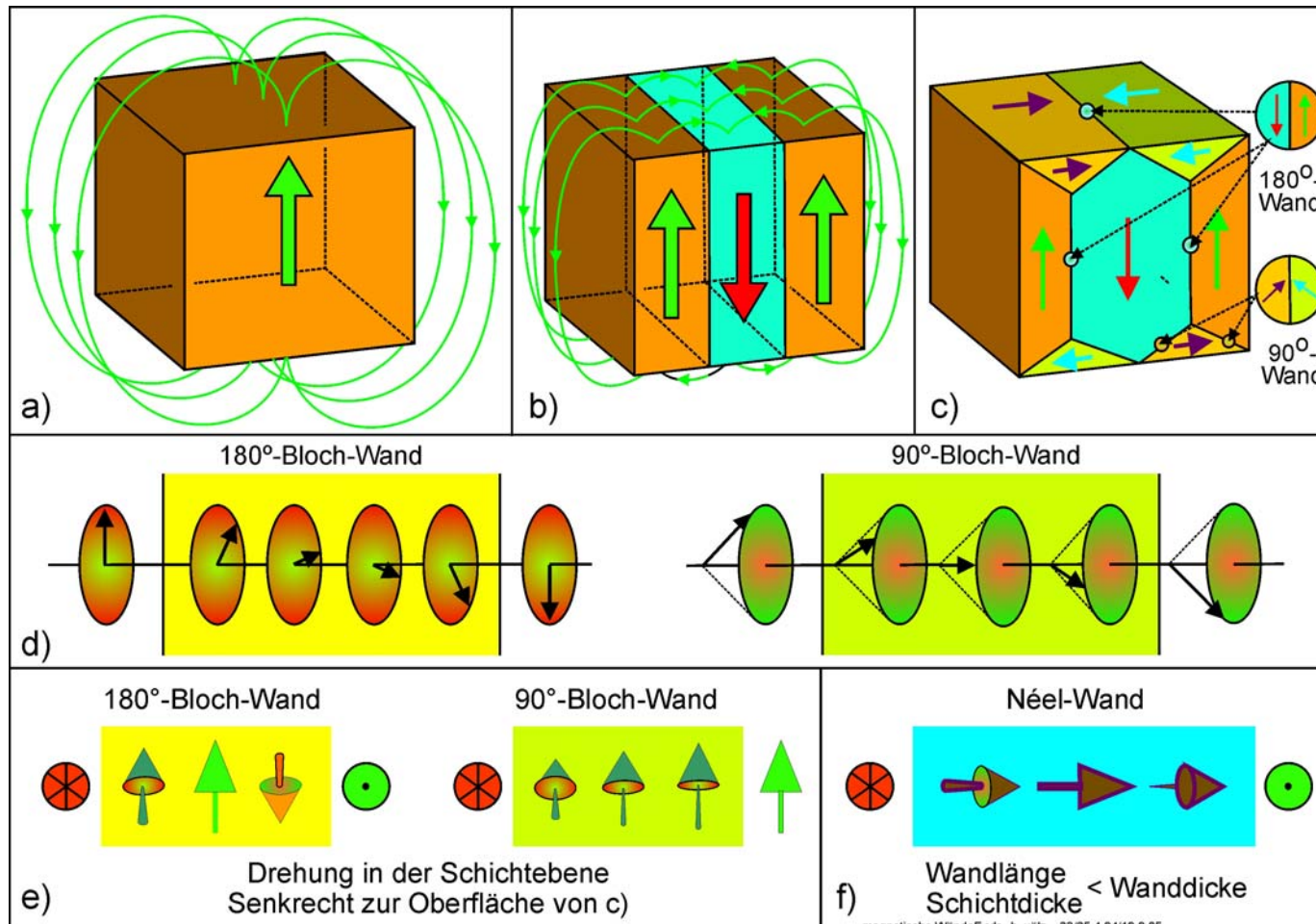


hysterese2F.cdr h. völz Nov.93/Okt.94/22.10.05



Minimale externe Energie

Die einzelnen magnetischen Bereiche können im Raum sehr unterschiedlich orientiert sein. Sie stellen sich jedoch immer so ein, dass im äußeren Magnetfeld möglichst wenig Energie auftritt. Dabei können mehrere Typen von magnetischen Wänden entstehen.



Induktion

*Lateinisch **inductio, inducere** hineinführen*

Von diesem *vielschichtigen Begriff* sind hier drei gebräuchliche Inhalte unwichtig:

- *Wissenschaftliche Methode*: schließt vom besonderen Einzelfall auf das Allgemeine, Gesetzmäßige.
- *Mathematik*: Vollständige Induktion = Verfahren zum Nachweis der Allgemeingültigkeit eines Satzes.
- *Biologie*: Von einem bestimmten Keimteil ausgehende Wirkung für Entwicklungsvorgänge.

Eingeführt sind schon (s. o.):

- Induktion = *Magnetische Flussdichte* = B
- Induktions-*Spannung*, die in einem Leiter, einer Spule entsteht, wenn sich B , Φ oder die Fläche A ändern

Jetzt kommen noch *hinzu*:

- als Effekte: *Selbst-* und *Gegen-Induktion*.
- als zugehörnde Bauelemente: Selbst und Gegen-*Induktivität*.

Selbstinduktion $\Rightarrow$ Induktivität

Eine Induktionsspannung entsteht nicht nur, wenn magnetische Felder auf einen Draht, eine Spule einwirken.

Ändert sich die Stromstärke I in einem Leiter, so wirkt das sich ändernde Magnetfeld ***auch auf den Leiter selbst***.

Es entsteht auch in ihm die Induktionsspannung:

$$U_{Ind} = -L \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Sie wirkt der Stromänderung dI/dt entgegen. Dieser Vorgang heißt ***Selbstinduktion***; L ist die ***Induktivität***.

Sie verzögert den Stromanstieg bzw. wirkt Stromsenkung, -abschaltung entgegen $\Rightarrow$ Funken am Schalter (Gleichstrom!).

L hängt von der Gestalt des Leiters (A = Querschnitt, l = Länge, n = Windungszahl) und der Permeabilität μ_r ab:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}.$$

Sie wird in ***Henry*** (H) gemessen (JOSEPH HENRY; 1797 - 1878).

Wirkt das Feld einer Spule auf eine andere ein, so bilden beide eine ***Gegeninduktivität*** (M)

Beispiele hierfür sind ***Transformatoren*** (Trafo) und ***Übertrager***.

Die Wirkung heißt auch ***Gegeninduktion***.

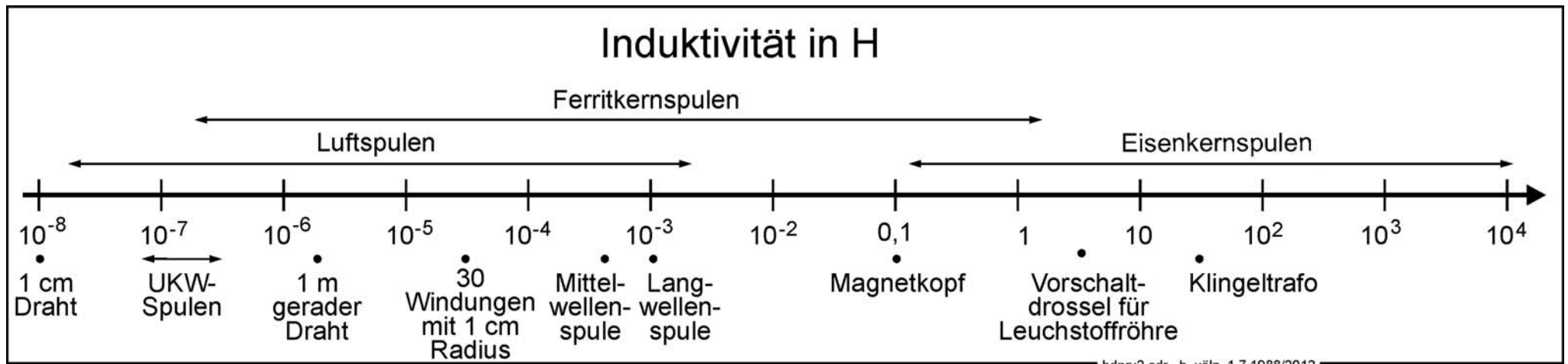
Induktivitäten *bestehen aus* Drahtwindungen und dem Wickelkörper bzw. Magnetkern.

Der Wickelkern (-körper) entspricht einem *magnetischen Widerstand*, der in der Tabelle auch als *AL-Wert* auftaucht.

Er ist das primäre, „vorproduzierte“ Bauelement, welches erst durch die Spule zur Induktivität wird.

Wegen der Wicklung sind Spulen selten als „eigentliche“ Bauelemente verfügbar.

Das ist auch der Grund, dass *selten die Induktionswerte* in Henry angegeben werden.



hdnry2.cdr h. völz 1.7.1988/2012

Wirbelstrom und Skineffekt

Außer der meist erwünschten Induktion und Selbstinduktion haben Magnetfeld-Änderungen weitere Wirkungen.

In einem kompakten Leiter ruft die dort induzierte Spannung den **Wirbelstrom** I_{Wir} hervor.

Mit der dazugehörenden internen Induktionsspannung U_{Wir} ergibt sich eine **Energie** $E_{\text{Wir}} = U_{\text{Wir}} \cdot I_{\text{Wir}}$.

Sie geht u. a. bei Spulen (Drosseln) und Transformatoren verloren und erzeugt **unerwünschte Wärme**.

Deshalb sollen Magnetmaterialien oft eine geringe Leitfähigkeit besitzen $\Rightarrow$ **Pulver-, Ferritkerne und Lamellierung**.

Gezielt kann sie aber auch zur **Erhitzung von Leitermaterial**, z. B. bei Schmelzöfen eingesetzt werden.

Eine weitere Abwandlung vom Wirbelstrom ist der **Skineffekt**

In einem **Draht** drängt der Wirbelstrom die bewegten Elektronen an dessen **Oberfläche**.

Für die Leitung von Hochfrequenz steht dann ein nur deutlich **kleinerer Querschnitt** zur Verfügung.

Um den Widerstand dennoch gering zu halten werden viele dünne Drähte zu einer **Litze** parallel geschaltet.

Die entstehende Flexibilität ist ein zusätzlicher Gewinn.

Elektromagnetismus und mechanische Bewegung

Bereits MICHAEL FARADAY (1791 - 1867) glaubte an die *Symmetrie der Natur* und experimentierte auf dieser Grundlage. Führt Strom zum Magnetismus, dann muss es auch Magnetismus Stromerzeugung ermöglichen. Erzeugt Bewegung im Magnetfeld Elektrizität dann muss auch Elektrizität *Bewegung* im Magnetfeld hervorrufen usw.

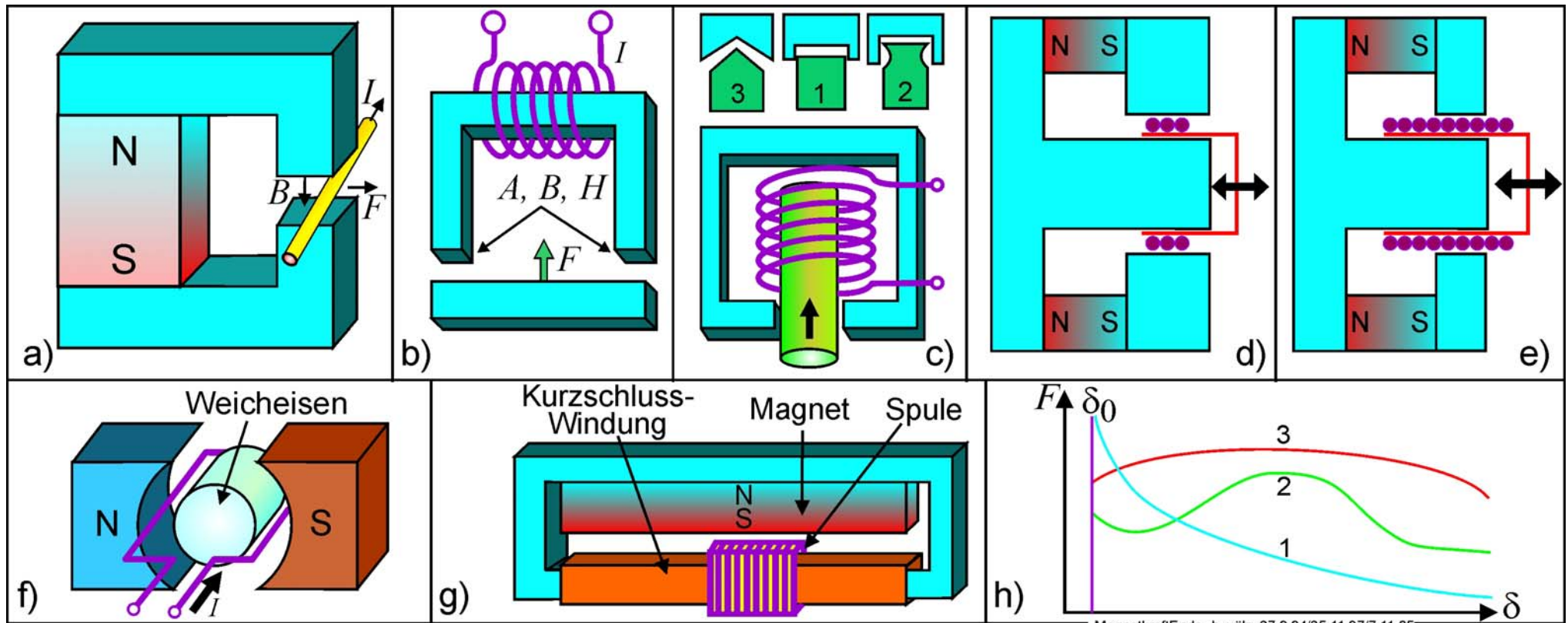
Oben ist gezeigt, dass elektrische und magnetische Effekte eng miteinander verknüpft sind.

Nun sei ergänzt, dass Elektromagnetismus auch mit vielfältigen Bewegungen gekoppelt ist.

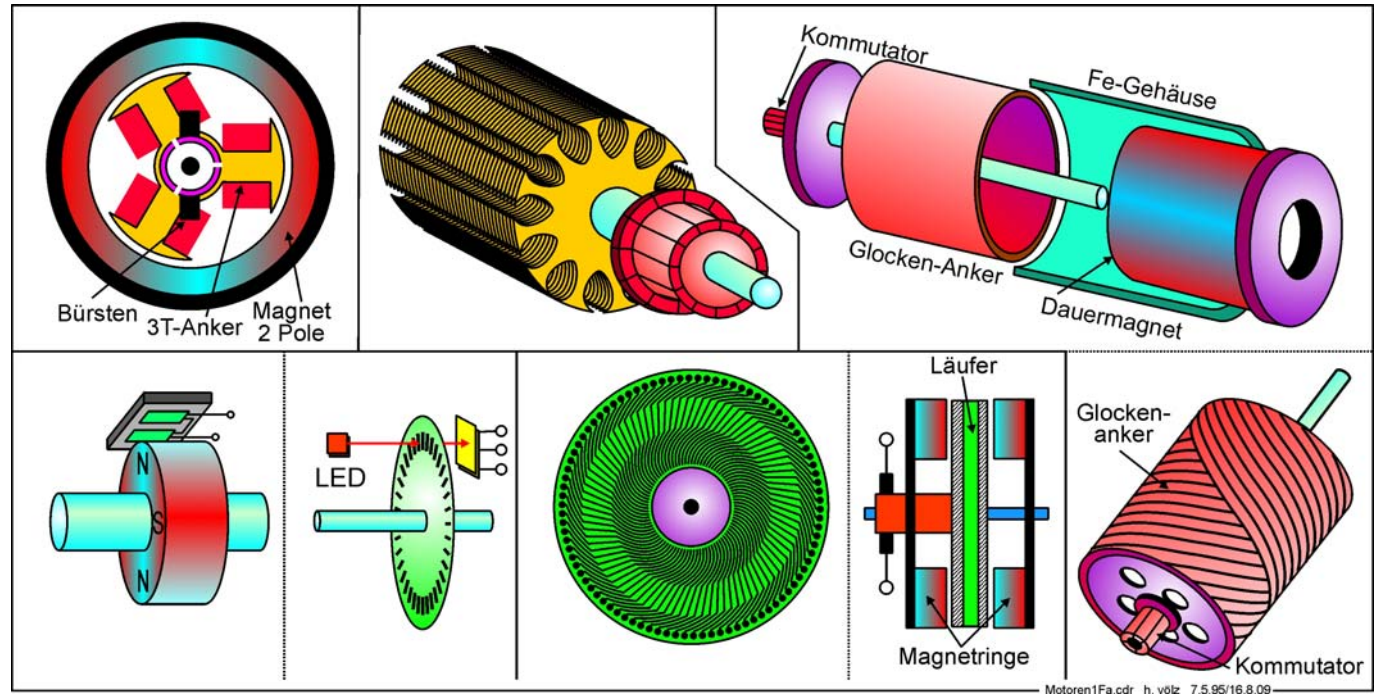
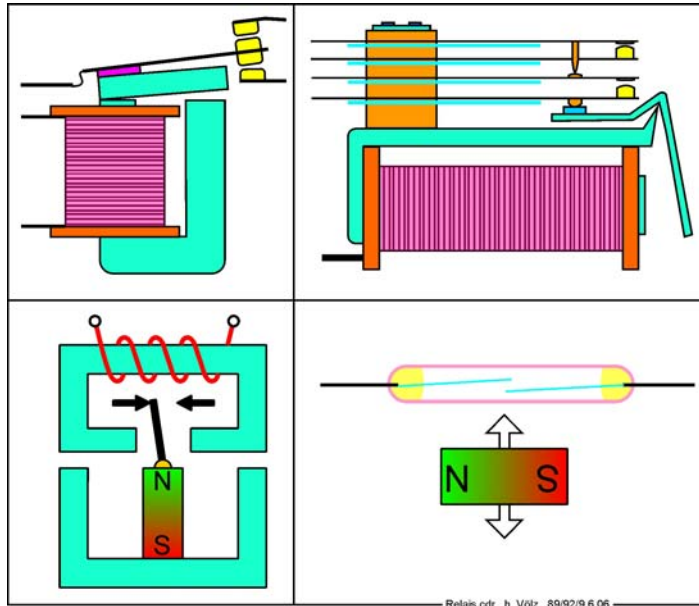
Als *Umkehrung der magnetischen Induktion* (Dynamo und Wandler) treten so Kraftwirkungen auf.

Sie sind Grundlage von *technischen Anwendungen*: Motor, Lautsprecher, Drehspulinstrument, Relais, Aktuator und magnetischer Anziehung.

- a) Prinzip der Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld.
- b) Anzugsmagnet c) durch Änderung der Kernform mit h) unterschiedlichen Kraftkurven.
- d) Lautsprecher (voice coil) mit kurzer und e) langer Schwingspule.
- f) Prinzip der Drehspule für Messinstrumente und Aktuatoren.
- g) linearer auf gebaute Aktuator.



Links Beispiele für Relais.
Rechts Beispiele für Motoren.



Überblick zu den drei Bereichen

Stationärer Strom, Elektrostatik und Magnetismus

Am übersichtlichsten erscheint den meisten der Zusammenhang elektrische Spannung $\Leftrightarrow$ Strom

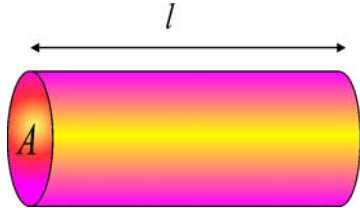
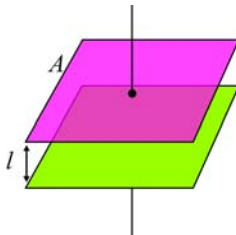
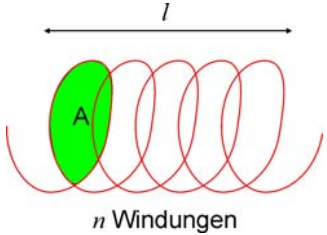
Hier helfen uns der tägliche Umgang mit dem Stromnetz und seine Geräte sowie die Batterie-Anwendungen.

Mit der Elektrostatik kennen wir fast nur die ungewollten Aufladungen und den damit verbundenen „Schlägen“.

Mit Magnetismus kommen wir zwar häufig in Berührung, aber von Feld und Induktion haben wir kaum Vorstellungen.

Aus diesen Gründen wurde die folgende Gegenüberstellung der drei Bereiche angefertigt.

Auch hier kann wieder ein Gummiband als Modell angenommen werden. Zug entspricht der Ursache, die Länge der Wirkung.

	Stationärer Strom	Elektrostatik	Magnetismus
Phänomen, Ursprung	bewegte Ladungen, z. B.: Elektronen, Löcher, Ionen	ruhende Ladungen	magnetische Dipole, bewegte Ladungen
Ursache (Feldstärke)	E in V/m	E in V/m	H in A/m
Feld-Wirkung	Stromdichte i [A/m ²]	Verschiebung D [C/m ²]	Flussdichte = Induktion B [T]
Kenngroßen	σ Leitfähigkeit = $1/\rho$ ρ spezifischer Widerstand	$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$; $\chi = \mu_r - 1$ $\mu_0 \approx 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Gesetze	$i = E \cdot \sigma = E/\rho$ $I = dQ/dt$	$D = \varepsilon \cdot E$ $I = dQ/dt$	$B = \mu \cdot H$ $U = d\Phi/dt$
Bezug auf Fläche A	Stromstärke $I = i \cdot A$ in Ampere = A	Ladung $Q = D \cdot A$ in Coulomb = C	Fluss $\Phi = B \cdot A$ in Weber = Wb = V·s
Bezug auf Länge oder Abstand l	Spannung $U = E \cdot l$ in Volt = V	Spannung $U = E \cdot l$ in Volt = V	Durchflutung $V = H \cdot l$ in Ampere = A
Bauelement, Maßeinheit	Draht: $R = \rho \cdot l/A$ Ohm = Ω	Kondensator: $C = \varepsilon \cdot A/l$ Farad = F	Induktivität: $L = n^2 \cdot \mu \cdot A/l$ Henry = H
Energie Energiedichte	$N = U \cdot I \cdot t$ $w = I \cdot E \cdot t$	$N = C \cdot U^2/2$ $w = D \cdot E/2$	$N = L \cdot I^2/2$ $w = B \cdot H/2$
Struktur des Bauelements			

Memristor

Es existieren die 4 Grundgrößen:

- Spannung U
- Strom I
- Elektrische Ladung Q
- Magnetischer Fluss Φ

Aus ihrer Verkopplung folgen formal 4 Bauelemente, insbesondere R , C und L .

Ein mögliches viertes sagte 1971 von LEON CHUA als *Memristor* M voraus.

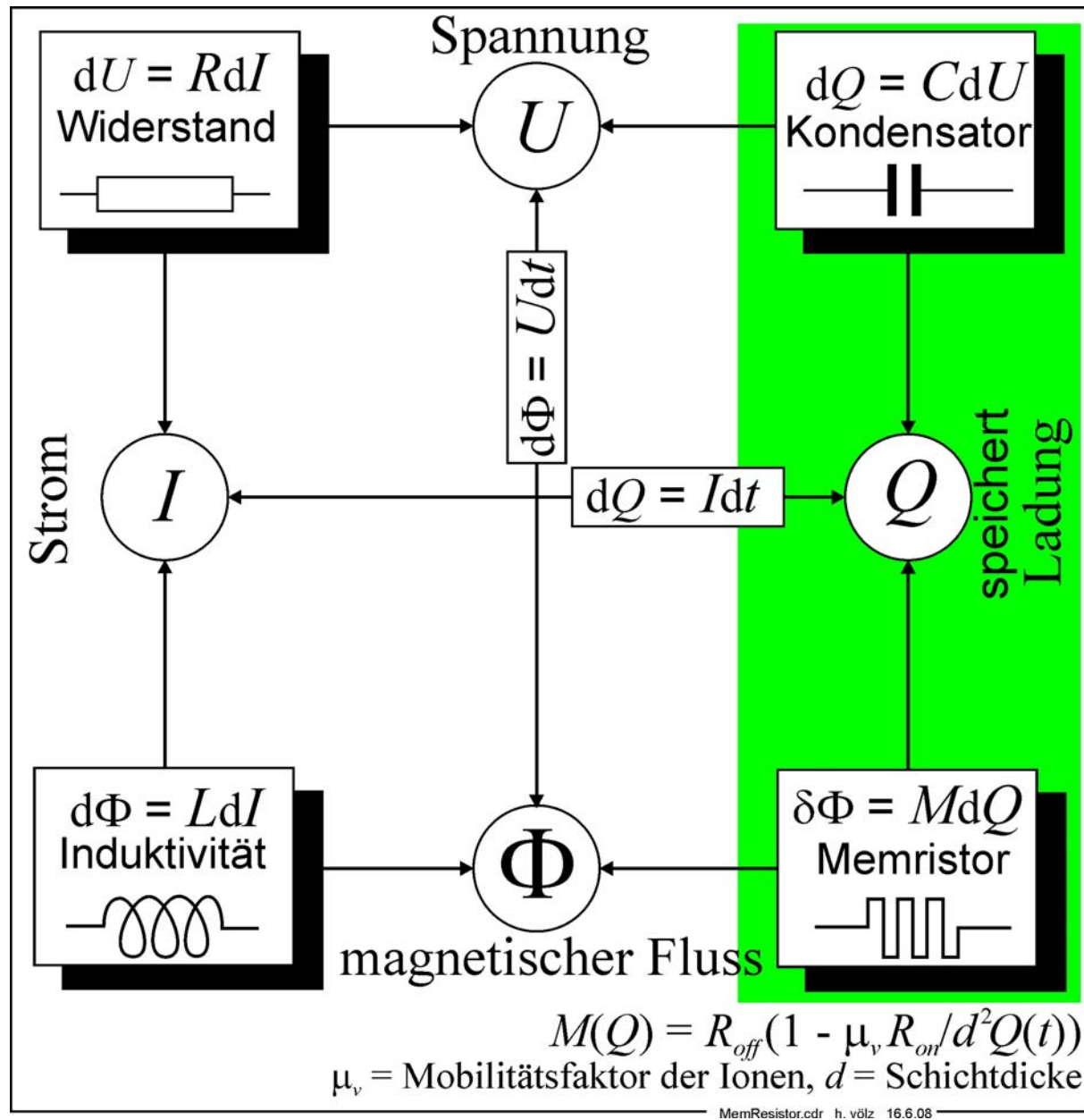
Es wurde erstmalig 2008 bei Hewlett Packard für eine Struktur aus 150 Atomlagen TiO_{2-x} nachgewiesen.

Inzwischen wird erwartet, dass hiermit ein *völlig neuer, effektiver Speicher* möglich ist.

Bei ihm wird mit eingebrachten Ladungen der ohmsche Widerstand dauerhaft verändert.

Dadurch bleibt auch ohne Betriebsspannung der Informationsinhalt erhalten.

Außerdem sind extrem kleine Abmessungen je Bit und eine sehr kurze Schaltzeit (ps) möglich.



Elektrische Ladung, elektrischer Strom und Magnetfeld

bedingen sich wechselseitig (Natursymmetrie):

Elektrische Ladung $\Rightarrow$ elektrisches Feld

Ladungen wirken aufeinander $\Rightarrow$ ziehen sich an oder stoßen sich ab.

Wirkungen $\Rightarrow$ Bewegungen.

Bewegte elektrische Ladungen $\Rightarrow$ elektrischer Strom.

Elektrischer Strom $\Rightarrow$ Magnetfeld.

Magnetische Felder wirken aufeinander $\Rightarrow$ ziehen sich an oder stoßen sich ab.

Veränderung vom magnetischen Feld $\Rightarrow$ induziert in Leitern elektrische Spannung.

Elektrische Spannung bei „geschlossenen“ Leitern $\Rightarrow$ elektrischen Strom.

Diese komplexen Verkopplungen erfassen die MAXWELL-Gleichungen (JAMES CLERK MAXWELL; 1831 - 1879)

MAXWELL-Gleichungen		
Formeln	Es bedeuten	
$\nabla E = 4 \cdot \pi \cdot \rho$ $\nabla B = 0$ $\nabla \times E + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = 0$ $\nabla \times B - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{4 \cdot \pi}{c} \cdot j$	$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z}$ ∇ sprich Nabla $\times$ = Vektorprodukt	E = elektrische Feldstärke B = magnetische Induktion c = Lichtgeschwindigkeit ρ = Ladungsdichte j = Stromdichte

Literatur

Gerthsen, H.: Physik. 19. Aufl. Springer - Verlag, Berlin u.a. 1997

Lindner, H. u.a.: Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik 8. Aufl. Fachbuchverlag, Leipzig 2004

Völz, H., Ackermann, P.: Die Welt in Zahlen und Skalen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford, 1996

Völz, H.: Elektronik - Grundlagen - Prinzipien - Zusammenhänge. 5. Aufl. Akademie Verlag, Berlin 1989.

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3. Shaker Verlag Aachen 2007

Internet-download 30.4.12:

Akkumulator - Wikipedia.mht

Alkali-Mangan-Batterie - Wikipedia.mht

Batterie (Elektrotechnik) - Wikipedia.mht

Brennstoffzelle - Wikipedia.mht

Doppelschichtkondensator - Wikipedia.mht

Elektrolytkondensator - Wikipedia.mht

Ferroelektrikum - Wikipedia.mht

Kondensator (Elektrotechnik) - Wikipedia.mht

Lithiumbatterie - Wikipedia.mht

Piezoelektrizität - Wikipedia.mht

Internet-download 14.5.12:

Elektromagnetische Induktion – Wikipedia.mht

Feldstärke – Wikipedia.mht

Magnetische Größen und Einheiten.mht