

attempo

Physikalische Betrachtung des Magnetismus

Grundlagen, Anwendungsbereiche, Hintergründe und Historie

Attempo

induktive Bauteile,
Testhaus

PfäffingerStr. 6
72108 Rottenburg-
Wurmlingen

Tel.: +49 (0) 7472 9523 90
Fax: +49 (0) 7472 9523 92

eMail: info@attempo.com
www.attempo.com



- Induktive Bauteile
Berechnung, Simulation
und Test
Kleinserienfertigung
- Filtersysteme
- EMV –Test, Beratung
und Seminare
- Entwicklungsunter-
stützung
- Kommunikationstechnik
- Feldbusanalysen
- und Komponententest
- Umweltprüfverfahren
- Macroscopie
- Information

Version 1.0

16.06.09

Attempo

realisiere Deine Möglichkeiten

Attempo



EMV-Betrachtung

NF- Magnetfelder

Feldbus Test

Bibliothek

Umweltprüfverfahren

Feldtests

Materialprüfung REM

Netzwerkanalyse

Vorwort

Bereits schon 1820 ist dem dänische Entdecker Christian Oersted aufgefallen, dass in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters eine Kompassnadel verrückt spielt.

Das war eine Entdeckung von enormer Tragweite, die uns heute, 200 Jahre später beschäftigt und auch noch in Zukunft beschäftigen wird. Viele herausragende Wissenschaftler wie Faraday, Coulomb, Lorentz, Gauß, Biot, Savart, Herz, Einstein, Maxwell u.v.m. haben zum heutigen Wissen beigetragen.

Tatsächlich sind magnetische Erscheinungen Wechselwirkungen elektrischer Ströme, bzw. ein magnetisches Feld wird durch bewegte elektrische Ladungen erzeugt. Die auftretenden Kräfte lassen sich über magnetische Felder beschreiben. Magnetische und elektrische Erscheinungen sind miteinander mathematisch verknüpft.

Physiker beschreiben die magnetischen Stoffeigenschaften mithilfe eines Elementarmagneten, der kleinsten magnetischen Einheit. In Analogie zur elektrischen Elementarladung konnten jedoch bisher keine Teilchen mit einer einzigen magnetischen Elementarladung nachgewiesen werden.

- Wir leben in einem elektromagnetischen Umfeld, das wir in Galaxien, unserem Sonnensystem, der Erde, den Atomen bis zu den Quarks und noch kleiner, vorfinden
- Wir sind immer elektromagnetischen Feldern ausgesetzt
- Wir emittieren elektromagnetische Strahlung
- Wir funktionieren elektromagnetisch, werden elektromagnetisch gesteuert
- Wir brauchen elektromagnetische Strahlung als Energiespender und Lebensgrundlage
- Wir sind, neben anderen magnetischen Feldern, der Schumannwelle (Resonanzfrequenz der Erde) mit $20\text{-}50\mu\text{T}$ / $7,83\text{ Hz}$ dauernd ausgesetzt

Definitionen:

- Ein Elementarmagnet ist immer ein magnetischer Dipol.
- Der kleinste Stromkreis ist der Atomkern (+) mit Elektron(en) (-) im Orbital.
- Die Ursache des Magnetismus ist die Bewegung der elektrischer Ladungen der Elektronen (Bahndrehimpuls und Spin) in der Elektronenhülle der Atome zum Kern.
- Alle elektrisch geladenen Elementarteilchen mit Eigendrehimpuls oder Spin besitzen ein magnetisches Dipolmoment.
- Die beiden magnetischen Momente der Atome oder Moleküle sind durch Spin-Bahn-Wechselwirkungen miteinander verkoppelt.
- Das Kernmoment ist zwar sehr klein, es lässt sich aber dennoch nicht nur nachweisen (NMR, „Nuclear Magnetic Resonance“ = kernmagnetische Resonanz), sondern auch praktisch anwenden (z. B. Kernspintomografie).
-

Oder

- Eine bewegte elektrische Ladung erzeugt ein Magnetfeld
- Ein elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld
- Ein elektrischer Strom in einem Magnetfeld versucht eine Bewegung zu erzeugen
- Ein Magnetfeld, in dem ein elektrischer Leiter bewegt wird, erzeugt elektrischen Strom
- Ein Magnetfeld hat keinen Anfang und kein Ende

Oder

- Modelle aus der Quantenphysik

Oder

Wenn Energie bewegt wird, wird ein Magnetfeld erzeugt

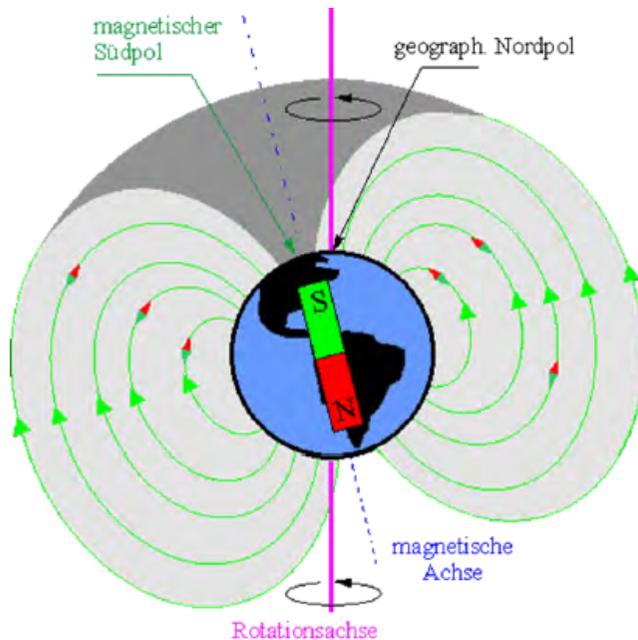
Energieerhaltungssatz – keine Energie geht verloren – sie ändert nur ihre Form

Was ist Magnetismus

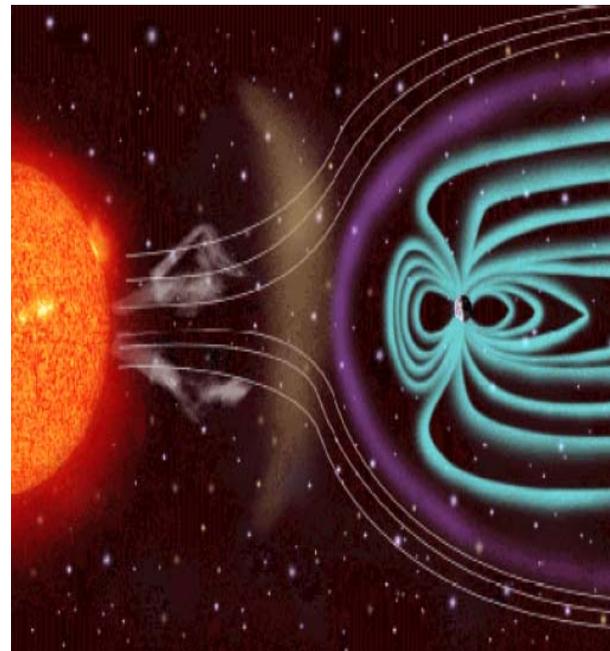
(griech. magnetis: eigentlich Stein aus Magnesia, mit Magnetit-Mineralien einer griechischen Landschaft)

Der **Magnetismus** ist schon seit der Antike durch die Entdeckung der Anziehungskräfte von Magneteisenstein bekannt. Die sogenannten Naturphänomene wie das Erdmagnetfeld mit seinen Auswirkungen, das Polarlicht, oder die Navigation mit dem Magnetkompass inspirierten Galilei, Kepler, Hook, Newton zu tiefergehender Forschung. Heute sind technische Anwendungen, vom Elektromotor über Magnetspeicherung bis zu elektromagnetischen Welle unverzichtbar. Im normalen Sprachgebrauch sind mit dem Begriff "magnetisch", ferromagnetische Eigenschaften gemeint.

Quelle: NASA



Erdmagnetfeld



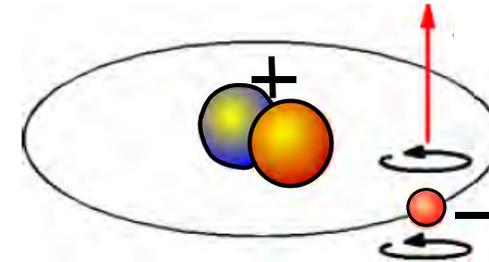
Ablenkung der Sonnenwinde (Protonen, Elektronen und Heliumkerne u.a.) durch das Erdmagnetfeld



Polarlicht , wenn Sonnenwinde auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre treffen (Anregung)

Magnetfelder durch elektrischen Strom

Bewegte Ladung ist gleichbedeutend mit elektrischem Strom. Die Bahnbewegung der Elektronen um die Atomkerne kann vereinfacht als Kreisstrom angesehen werden. Innerhalb dieser Kreisbahn zeigt das vom Strom induzierte Magnetfeld in eine Richtung. Das kreisende Elektron hat einen magnetischen Dipol erzeugt. Das Produkt aus Ladungsträgerstrom und der von ihm umflossenen Fläche wird magnetisches Dipolmoment genannt. Es besitzt einen Nord- und einen Südpol. Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, dann ist der Dipol bestrebt sich nach diesem auszurichten. Er erfährt ein Drehmoment. Ist das Feld inhomogen, so wirkt eine zusätzliche Kraft in Richtung zur größeren Feldliniendichte.



$$e = 1.602177 \times 10^{-19} \text{ C}$$

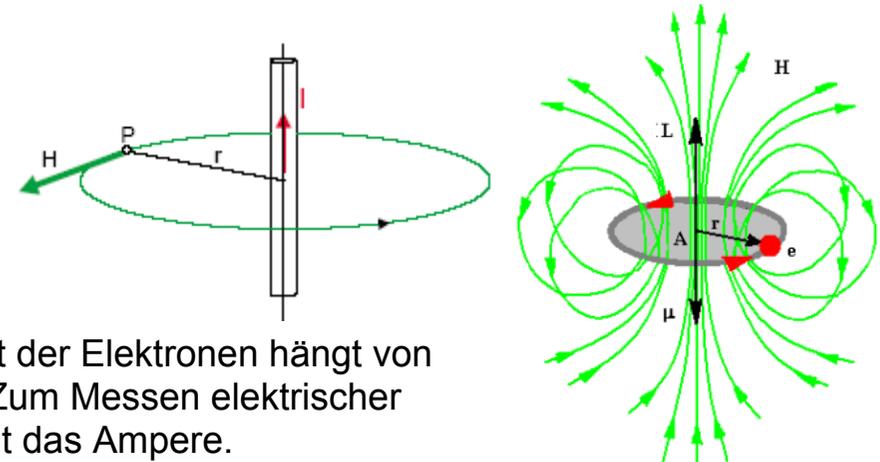
$$m_e = 9.1093897 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

Magnetfeld einer bewegten Ladung durch Stromfluss

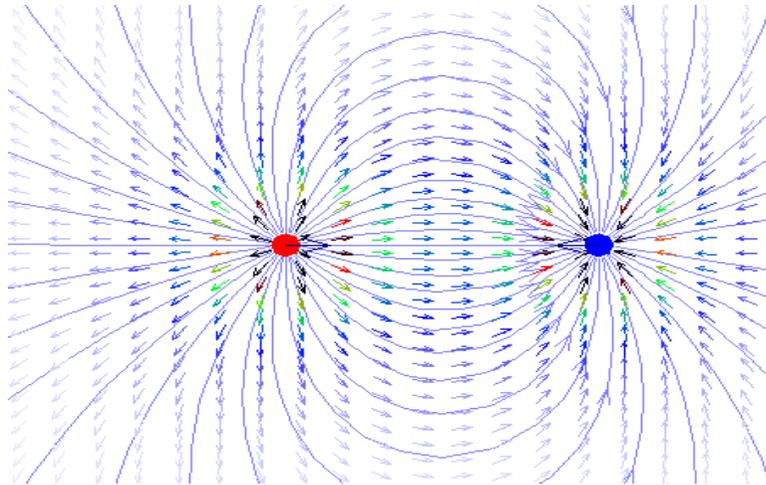
Um eine bewegte elektrische Ladung (elektrischer Strom) herrscht ein Raumzustand, der als **magnetisches Feld** bezeichnet wird. Bewegte Ladungen (Ströme) und Magnete erfahren in einem sie umgebenden Magnetfeld eine Kraftwirkung. In stromleitenden Materialien besteht der elektrische Strom aus der gerichteten Fortbewegung der freien Elektronen. Im Atomverband kommen die freien Elektronen nur mit wenigen Millimetern pro Sekunde vorwärts, aber sie setzen sich im gesamten Stromkreis fast gleichzeitig in Bewegung. Die Geschwindigkeit der Elektronen hängt von ihrer Beweglichkeit, von der Stromstärke und vom Leiterquerschnitt ab. Zum Messen elektrischer Stromstärken verwendet man meist die magnetische Wirkung, als Einheit das Ampere.

1 Ampere = 6×10^{18} Elektronenladungen/s.

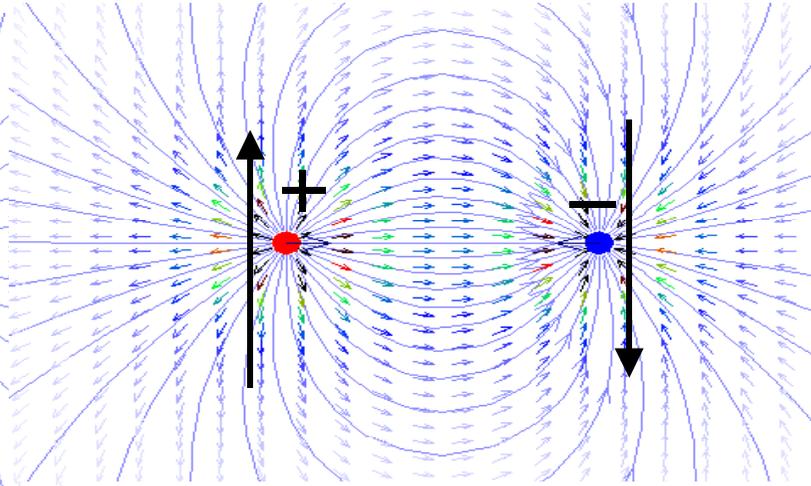
Mit Hilfe entsprechender Methoden hat man herausgefunden, dass der Betrag H der magnetischen Feldstärke bei jedem beliebigen Leiter proportional der Stromstärke I und im Falle des langen geraden Leiters umgekehrt proportional zum Abstand r vom Leiter ist. Für die Richtung der Feldlinien hat man verabredet, dass sie in Stromrichtung gesehen im Uhrzeigersinn umlaufen.



Das statische elektrische Feld



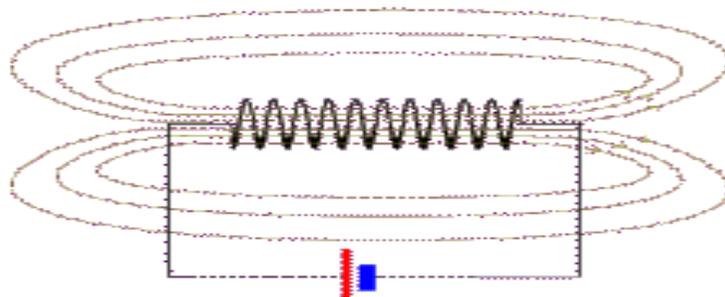
Das magnetische Feld



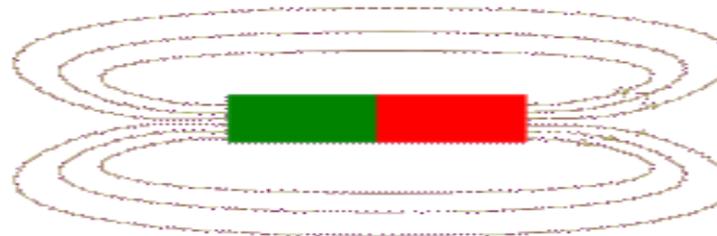
Die zwei Pole werden gegeneinander bewegt
Dadurch entsteht ein magnetisches Feld durch aufgewendete Bewegungsenergie.

**Energieerhaltungssatz:
Nichts geht verloren!**

Gleichbedeutende Magnetfelder
Mit Gleichstrom durchflossene Spule



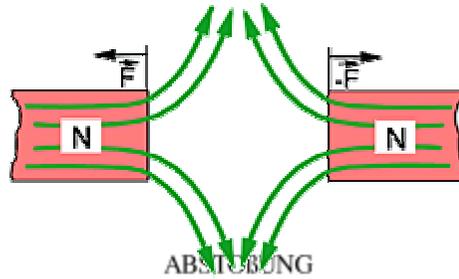
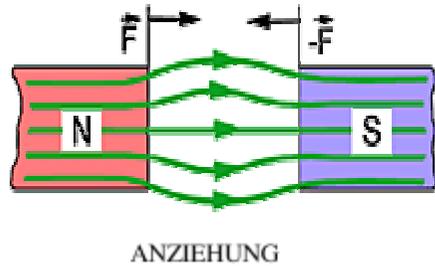
Dipol durch die Vorgeschichte des Materials magnetisiert



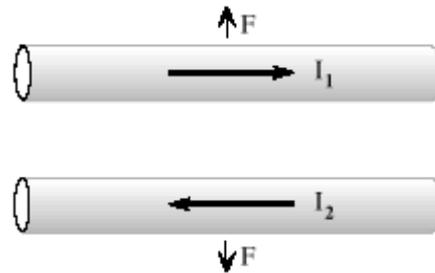
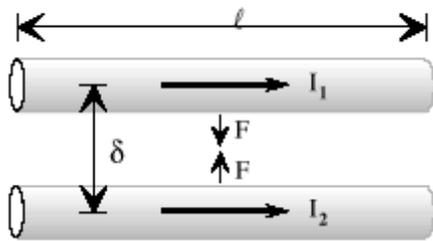
Die Kraftwirkung hängt ab von:

- der Größe des Stromes I [der Geschwindigkeit v der bewegten Ladung]
- der Stärke des Magnetfeldes B
- der wirksamen Länge l des Leiters im Magnetfeld bzw. der Windungszahl N der Spule ab

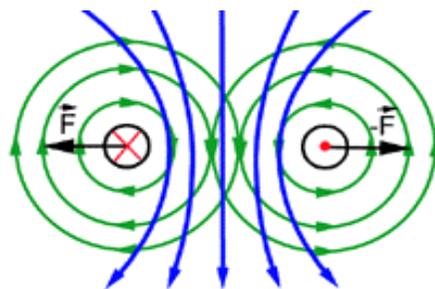
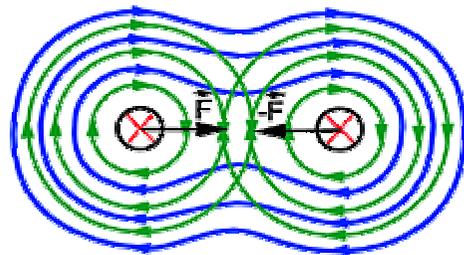
Auswirkungen des Magnetfeldes (Feldverteilung)



Ungleich gepolte Magnete ziehen sich an
Gleich gepolte Magnete stoßen sich ab
Die Feldverteilung ist ersichtlich



Zwischen Stromdurchflossenen Leitern treten Kraftwirkungen auf.
In gleicher Richtung durchflossene Leiter ziehen einander an
In gesetzter Richtung durchflossene Leiter stoßen einander ab.

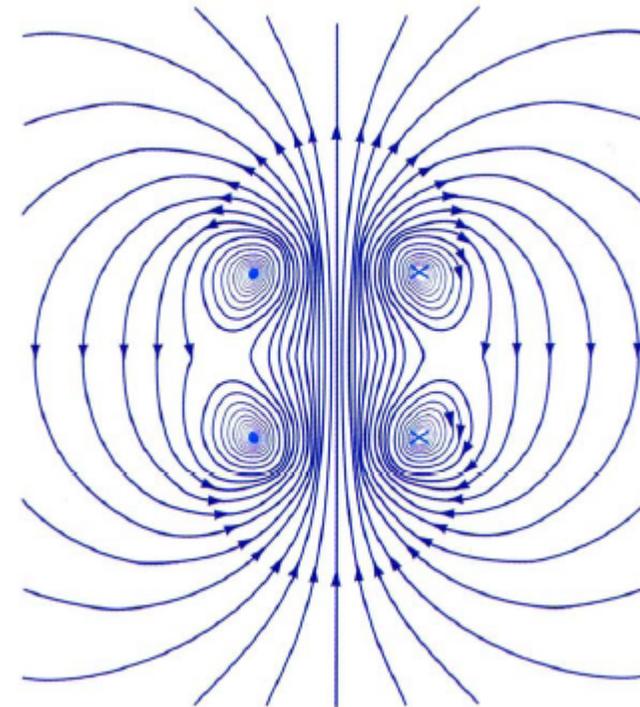
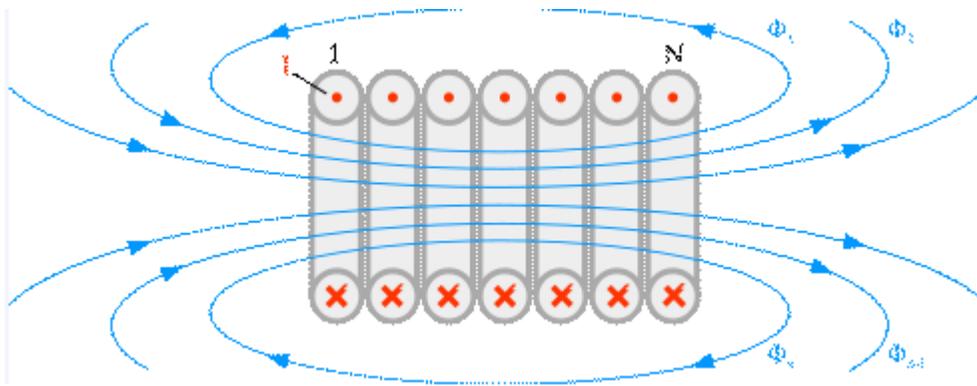


Feldverteilung:
Stromfluss in gleicher Richtung
⇒ Feldüberlappung, Anziehung
Stromfluss in entgegengesetzter Richtung
=> Feldkompression, Abstoßung

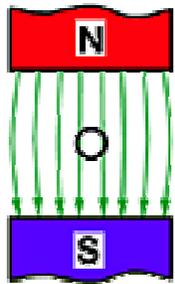
Magnetische Feldlinien geben in jedem Punkt die Richtung des Magnetfeldes bzw. des magnetischen Flusses an.
Der Abstand zwischen benachbarten Feldlinien ist ein Anhaltspunkt für die Stärke des Magnetfeldes:

Je dichter die Feldlinien, desto stärker das Feld

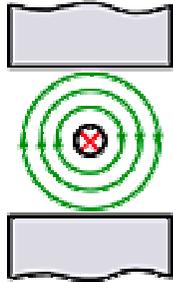
Magnetische **Feldlinien** haben keinen Anfang und kein Ende, sondern verlaufen als geschlossene Bahnen. In der Magnetostatik gibt es im Gegensatz zur Elektrostatik keine Ladungen – magnetische Monopole sind zwar mathematisch denkbar, alle experimentellen Tatsachen sprechen aber gegen ihre Existenz. Somit ist das Magnetfeld quellenfrei. Feldlinien haben zwar keinen Anfang und kein Ende, aber einen definierten Drehsinn. Feldlinien sind immer geschlossen. Der Strom steht stets im Zentrum eines Wirbels (Quelle, Ursache = Strom)



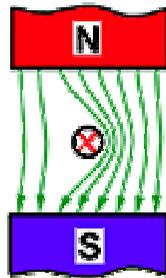
Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld



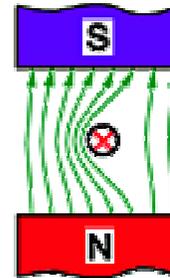
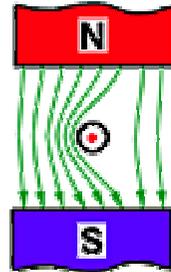
Polfeld



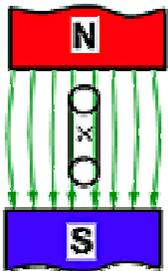
Leiterfeld



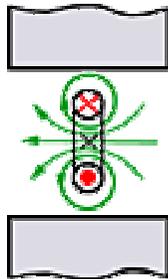
Resultierendes Feld mit Ablenkung nach links oder rechts



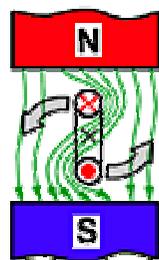
Pole vertauscht



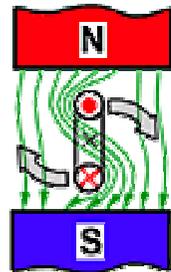
Polfeld



Spulenfeld



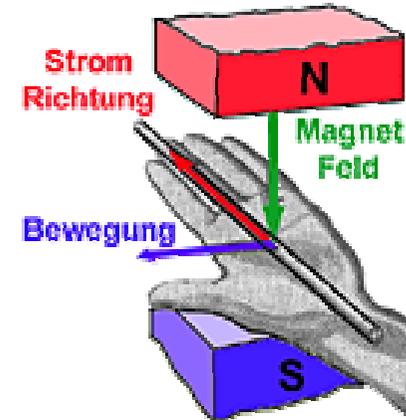
Resultierendes Feld Entstehung eines Drehmoments



abgelenkt



mehrere Spulen auf gemeinsamen Kern



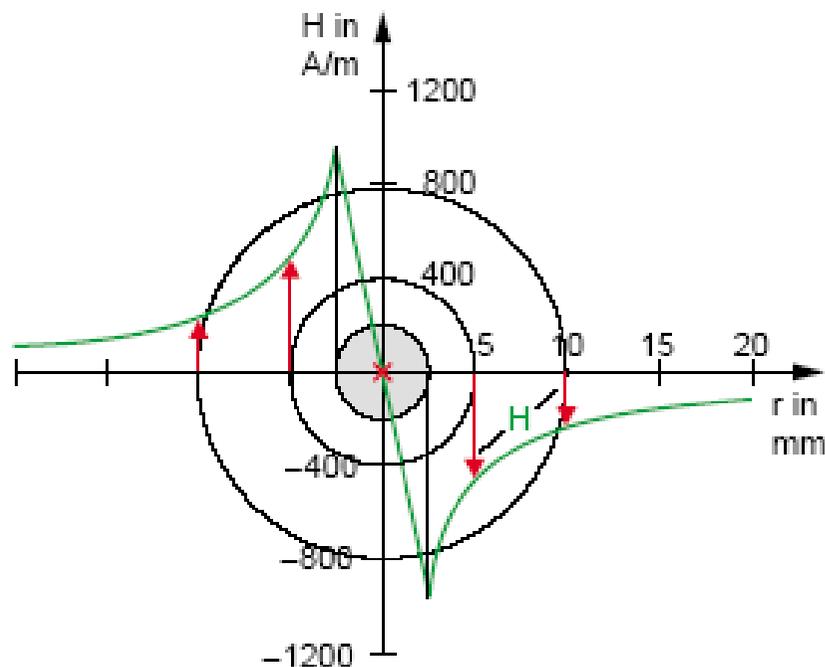
Ein stromdurchflossener Leiter wird im Magnetfeld abgelenkt. Die Richtung der Ablenkekraft ist abhängig von der Richtung des Polfeldes und von der Stromrichtung im Leiter (Leiterfeld)

Linke-Hand-Regel

Feldstärkeverteilung durch einen vom Strom durchflossenen Leiter

Feldstärkeverteilung eines Einzeleiters mit einfachem mathematischem Zusammenhang:

Grafischer Verlauf von H :



im Innenraum des Leiters gilt für $r \leq r_a$:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r_a^2} \cdot r = \frac{15 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot (2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} \cdot r = 3,82 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \cdot r$$

im Außenraum des Leiters gilt für $r \geq r_a$: $H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{15 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{2,39 \text{ A}}{r}$

H = Feldstärke H [A/m]

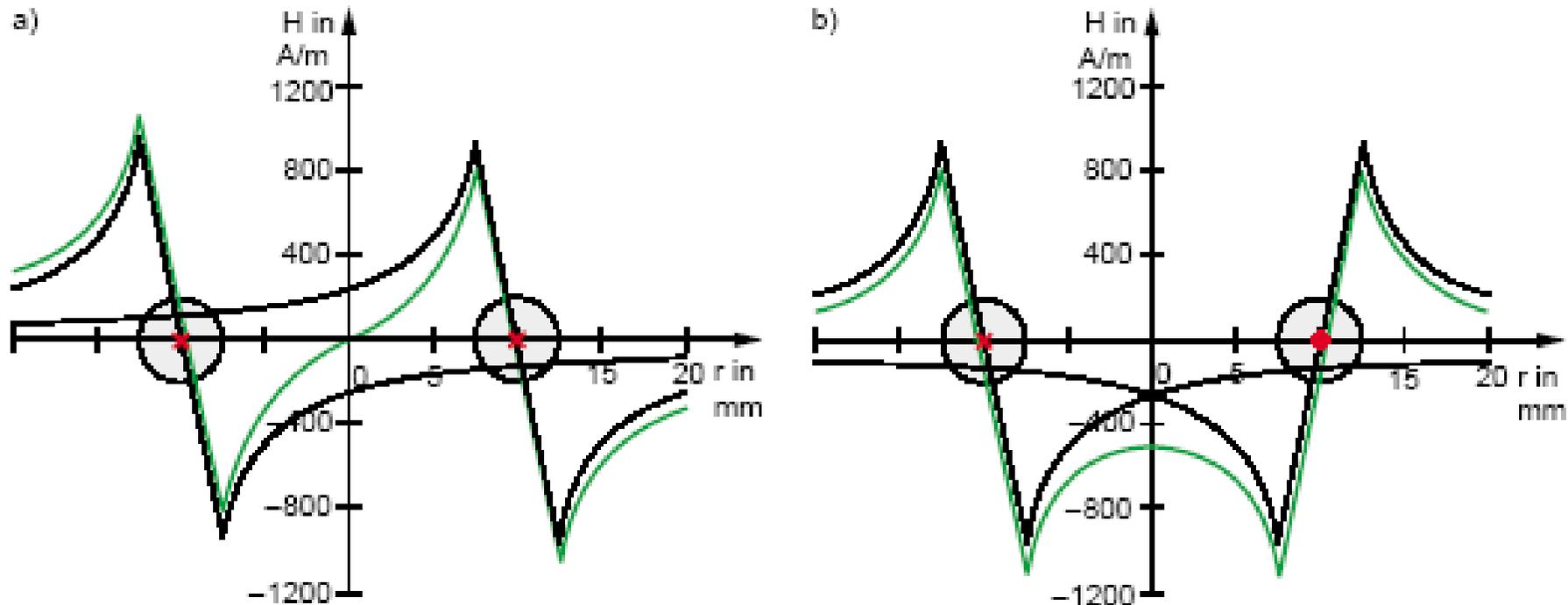
r = Radius [mm]

I = Strom 15 A

Im Innenraum des Leiters steigt H linear mit r an.

Außerhalb des Leiters ($r \geq 2,5 \text{ mm}$) erhält man für den Verlauf von H eine Hyperbel, die Feldstärke nimmt indirekt proportional zum Abstand vom Leiter ab.

Feldstärkeverteilung einer Doppelleitung (es die Berechnungsgrundlage oben gültig)

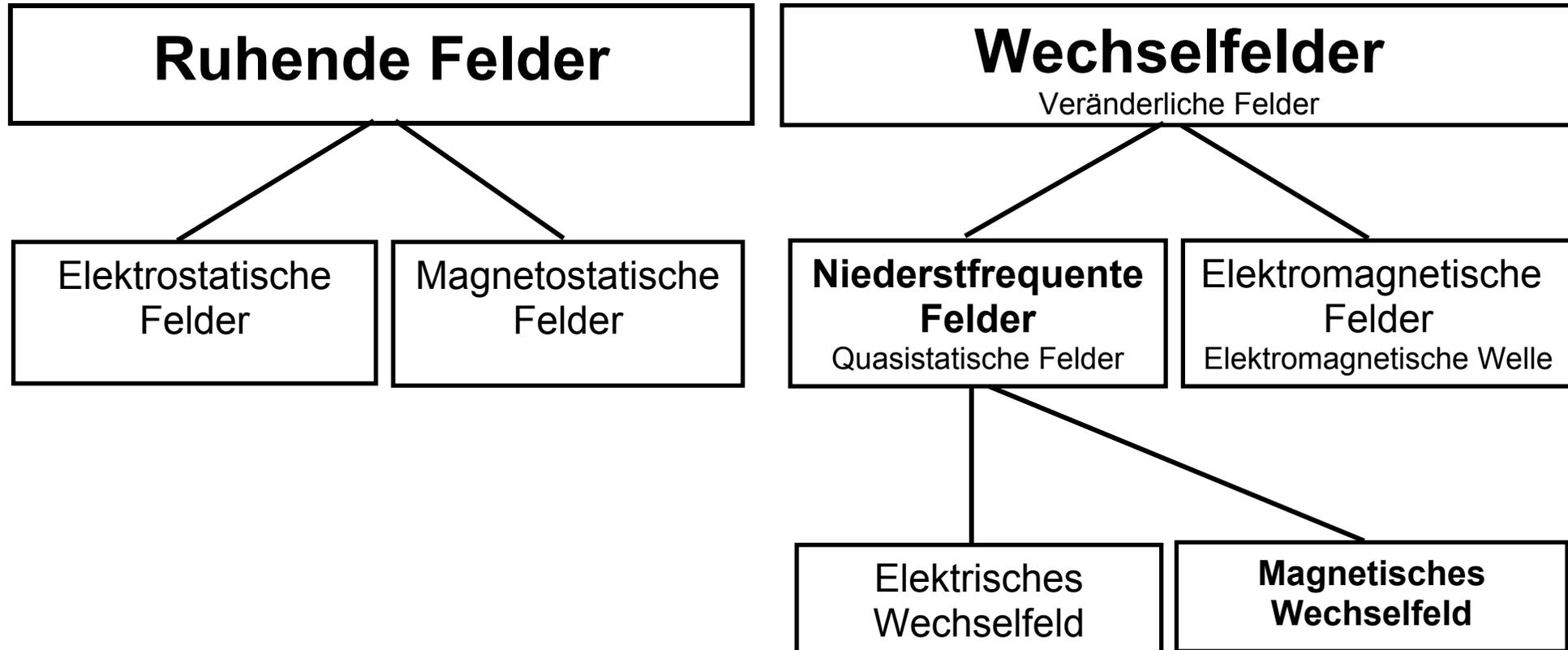


Zwei parallele gerade Leiter sind im Abstand von 20 mm angeordnet. Jeder der beiden Leiter hat einen Durchmesser von 5 mm und wird von einem Strom 15 A durchflossen.

Verlauf der magnetische Feldstärke in der durch die Mittellinie der beiden Leiter gebildeten Ebene, wenn

- a) links** die Stromrichtung in den Leitern ist unterschiedlich
b) rechts die Stromrichtung in beiden Leitern ist gleich.

Klassifizierung der elektrischen und magnetischen Energiefelder

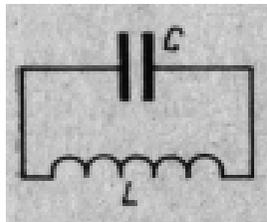


Grundsätzlich bestehen Wechselfelder immer aus einem magnetischen und einem elektrischen Anteil.
Bei niederfrequenten Feldern kann allerdings ein Anteil extrem klein und vernachlässigbar sein.

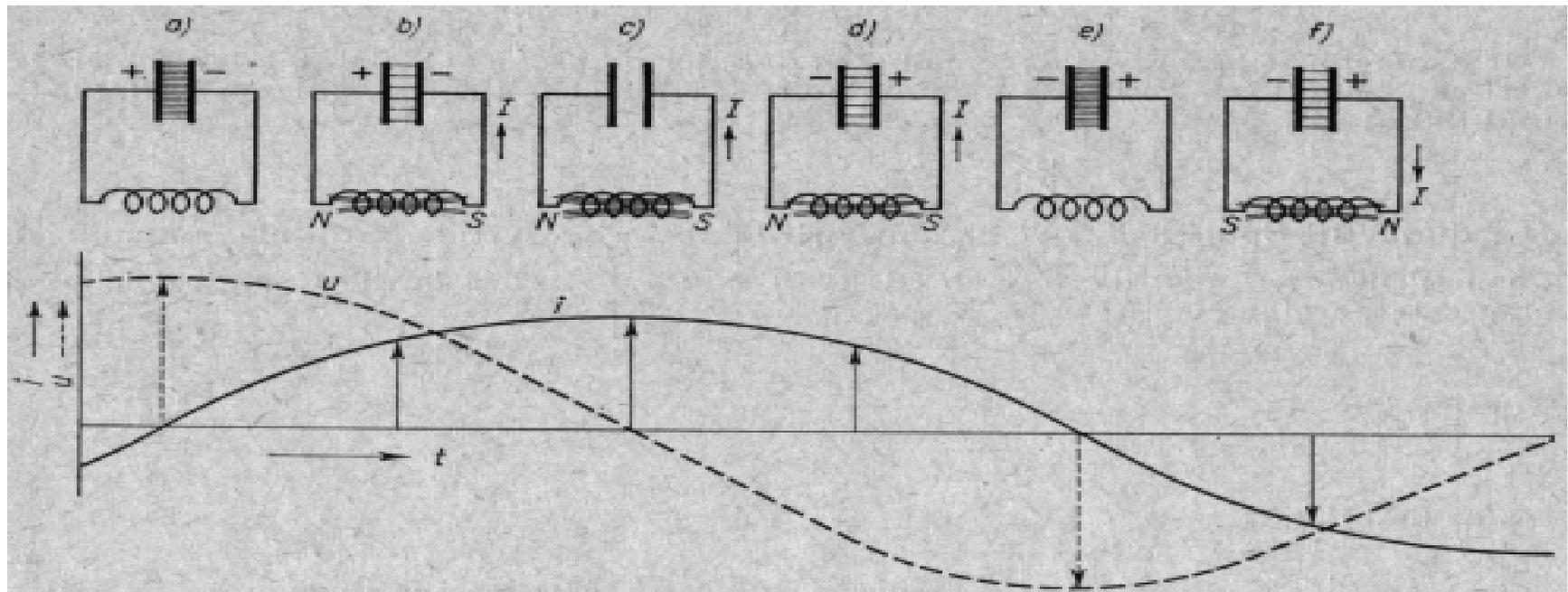
Der Schwingkreis elektromagnetische Schwingung

Die Wechselbeziehung zwischen dem magnetischen und elektrischen Kreis

Wenn man die Wechselbeziehung in rascher Aufeinanderfolge erzeugt und die Platten des Kondensators auseinanderzieht, entstehen **elektromagnetische** Schwingungen.



Geschlossener Schwingkreis

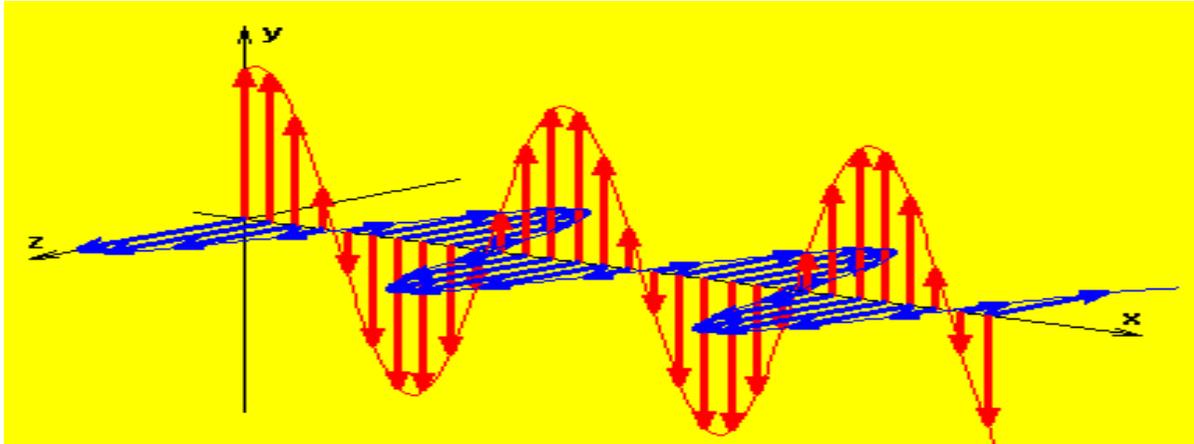


Vorgänge im Geschlossenen Schwingkreis, Verlauf von Strom i und Spannung u

Durch kurzes Verbinden mit einer Spannungsquelle wird der Kondensator aufgeladen. Der Strom pulsiert in raschem Wechsel von einer Belegung des Kondensators über die Spule zur anderen hin und her.

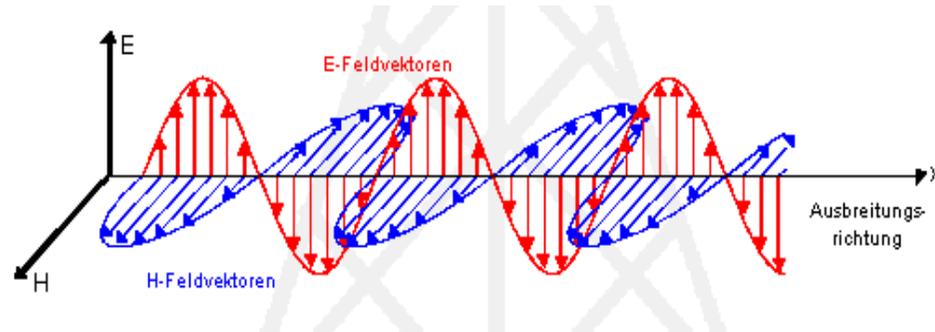
Das Prinzip der elektromagnetische Schwingung

Die elektromagnetische Welle



Eine TEM-Welle (Transversal ElektroMagnetische) zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl die resultierenden E-Feldvektoren als auch die resultierenden H-Feldvektoren senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen. Außerdem stehen die E- und die H-Feldvektoren senkrecht zueinander. Ausbreitungsrichtung, E-Feld und H-Feld stehen also zueinander in einem Winkel von 90 Grad (linear unabhängige Vektoren).

Hier in der Abbildung handelt es sich um eine lineare vertikal polarisierte Welle, da die roten E-Feldvektoren senkrecht zur "Erdoberfläche" stehen. Hier kann man sich durch das blauen H-Feldes sehr gut die räumliche Ausbreitung der Welle in x-Richtung vorstellen. Die Welle bewegt sich räumlich also in x-Richtung.



Maxwell'sche Gleichung

RELATIVISTIC QUANTUM ELECTRODYNAMICS with the subset maxwell's equations ⁴⁾

Re + i Im = 0 A = magnetic vector potential
q = electric charge, m₀ = mass in rest
φ_s = (electric) scalar potential ⁵⁾

Re: d'Alembert's space-time-Operator $\square \equiv \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \left(\frac{m_0 \cdot c}{\hbar} \right)^2 + \left(\frac{q \cdot \mathbf{A}}{\hbar} \right)^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{q \cdot \phi_s}{\hbar} \right)^2$ (Ia)

Im: $\left(\frac{q \cdot \mathbf{A}}{\hbar} \right) \cdot \nabla + \frac{1}{c^2} \left(\frac{q \cdot \phi_s}{\hbar} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial t} = \left[-\nabla \cdot \left(\frac{q \cdot \mathbf{A}}{\hbar} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \cdot \frac{1}{c^2} \left(\frac{q \cdot \phi_s}{\hbar} \right) \right]$ (Ib)

⁷⁾ $\phi_s = \phi - \mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$ (II) velocity (of light) $\mathbf{v} \ll c$ ⁶⁾ $\nabla \cdot \phi_{rot} = \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A} + \mathbf{A} \times \nabla \times \mathbf{v} + (\mathbf{A} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{v}$

\hbar = Planck's quantum constant = $h / 2\pi$, space: ∇ = Nabla, $\Delta = \nabla^2$ = Laplace-Operator, ∇ = vector gradient

Im Gegensatz zur transversalen Welle gibt es die longitudinale Welle (Schallwelle)

Bedeutung des Magnetismus in Materie oder magnetische Werkstoffe

Erst mit der Entwicklung der elektrotechnischen Industrie am Ende des 19. Jahrhunderts entstand eine ständig steigende Nachfrage nach Magnetwerkstoffen. Gegenwärtig finden Magnetwerkstoffe als unentbehrliche Komponenten in verschiedensten technischen Gebieten Anwendung:

- **Rundfunk-, Fernseh- und Nachrichtentechnik** (Lautsprecher, Mikrofone, Aufzeichnungstechnik, Mobilfunk, Entstörung, Abschirmung...)
- **Maschinenbau** (elektrische Antriebe/Aktoren, Transformatoren, Haftsysteme, Brems- und Dämpfungsanordnungen, Kupplungen, schaltbare Klebverbindung, Magnetlagerung, reibungsfreie Lagerung, kontaktfreie Transportsysteme,...)
- **Messtechnik** (Messwerke, Tachometer, Schalter, Relais, Sensoren, Maßverkörperungen, Sicherheitssysteme, Plagiatschutz, ...)
- **Druckindustrie** (Magnetfolien für Siebdruck, Spannelemente)
- **Büro- und Geschäftsbedarf** (Tafeln, Dekorationshilfen ...)
- **Medizintechnik** (Hilfsinstrumente für Katheder, Herzschrittmacher, Fremdkörperentfernung, Hyperthermie, Kernspintomografie...)

Die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten können in 5 Wirkprinzipien eingeordnet werden:

- **Erzeugung mechanischer Kräfte**
- **Energieumwandlung (elektromechanisch, Induktionserwärmung, Funk)**
- **Elektromagnetische Abschirmung/Abstrahlung/Kopplung**
- **Diagnose, medizinisch und Materialprüfung**
- **Materialentwicklung**

Jedes dieser Prinzipien erfordert magnetische Werkstoffe mit entsprechenden Eigenschaften, die dann die konstruktive Auslegung und die Größe/Masse des Bauteiles/Gerätes/Anlage bestimmen. Dieser Zusammenhang fixiert die Notwendigkeit der Entwicklung neuer und verbesserter Werkstoffe und damit auch die maschinenbautechnischen Anforderungen an die technischen Ausrüstungen zur Produktion, zum Handling und zur Qualitätssicherung von magnetischen Werkstoffen.

Beim **Magnetismus** unterscheidet man sehr unterschiedliche Erscheinungsformen.

Dem Magnetismus kommt eine große technische Bedeutung zu. Zum Beispiel spielt er eine sehr wichtige Rolle in:

- Elektrogeneratoren und -motoren, Transformatoren, Spintransistor
- Medizinische Test- und Diagnosesysteme
- Datenspeicherung und Datenverarbeitung, Langzeitstabilität, magnetisches RAM
- Elektrische, Magnetische und elektromagnetische Felder

Hier gibt es noch enorme Möglichkeiten hinsichtlich der Energieeinsparung und der Miniaturisierung bei der gezielten Erzeugung von Magnetfeldern. In den letzten Jahren ist der Magnetismus wieder zu einem äußerst spannenden und aktiven Forschungsgebiet geworden. Es gibt neue Herstellungs- und Analyseverfahren, mit denen "maßgeschneiderte" Materialien geschaffen und im Detail gezielt eingesetzt werden können.

Auch der Einfluss magnetischer Felder auf den menschlichen, biologischen Körper ist ein begehrtes Streit-Thema.

Mit dem Begriff „**magnetische Ordnung**“ definiert man eine bevorzugte Ausrichtung der atomaren, magnetischen Momente zueinander. Alle Festkörper, welche ein makroskopisches magnetisches Moment zeigen, besitzen eine magnetische Ordnung. Das Zustandekommen einer bevorzugten Ausrichtung liegt in der Austauschwechselwirkung der atomaren Drehmomente: Die magnetische Ordnung wird oberhalb einer kritischen Temperatur zerstört. Bei Ferromagneten heißt diese Curie-Temperatur, bei Antiferromagneten Néel-Temperatur. Oberhalb ihrer jeweiligen Grenze verhalten sich diese Stoffe paramagnetisch.

Jedes Atom hat 3 unterschiedliche Magnetmomente:

Kernmoment:	Proton	geringer magnetischer Anteil
	Neutron	geringer magnetischer Anteil
Bahnmoment	der um den Kern kreisenden Elektronen	
	geringer magnetischer Anteil	
	erzeugt Diamagnetismus	
Spinmoment	der um sich selbst drehenden Elektronen	
	Großer magnetischer Anteil, erzeugt Para- und Ferromagnetismus	

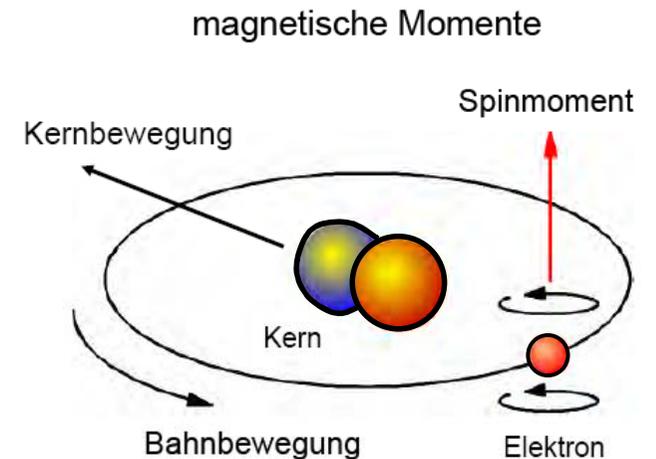
Größenvergleich

$$\mu = 1,410 \cdot 10^{-26}$$

$$\mu = 0,966 \cdot 10^{-26}$$

$$\mu = 4,490 \cdot 10^{-26}$$

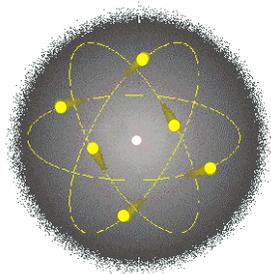
$$\mu = 9,285 \cdot 10^{-24}$$



Das Kernmoment ist zwar sehr klein, es lässt sich aber dennoch nachweisen

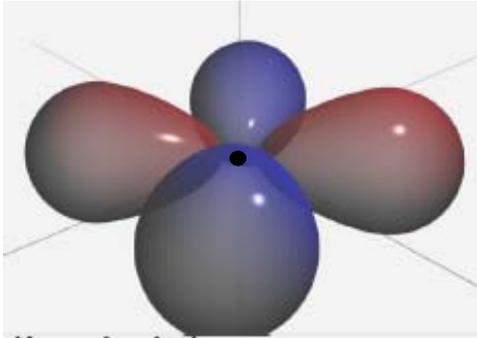
(NMR, „Nuclear Magnetic Resonance“ = kernmagnetische Resonanz), und auch praktisch anwenden (z. B. Kernspintomografie).

Elektronenspin



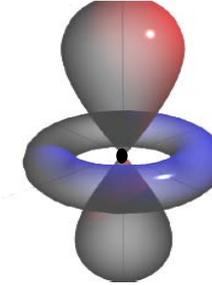
Bohr'sches Atommodell(veraltet)

Bahndrehimpuls



verschiedene Orbitale

Kernspin



Molekül

Definition der Energie(Quanten) der Elektronen - kleiner Ausflug in die Quantenmechanik:

- | | |
|--|--|
| 1. Hauptenergieniveau n (früher mit Schale k bezeichnet) | beschreibt die Größe |
| 2. Drehimpulsquantenzahl ℓ ($\ell=0(s), \ell=1(p), \ell=2(d), \ell=3(f)$) | beschreibt die elliptik/Form des Orbitals |
| 3. Magnetquantenzahl m ($-\ell$ bis $+\ell$) | beschreibt die Ausrichtung des Orbitals |
| 4. Spinquantenzahl s ($-\frac{1}{2}$ - $+\frac{1}{2}$) | beschreibt die Eigenrotation des Elektrons |
| Kernspin (Kernrotation, nicht Teil der Elektronenkonfiguration) | Orbital ist die Elektronenbahn |

Da in der Regel immer der niedrigstmögliche Energiezustand angestrebt wird, ist es für das Elektron oft günstiger, sich über den Bereich von zwei Atomen zu erstrecken

Bei der Betrachtung magnetischer Vorgänge ist hier nur ausschlaggebend:

- die Eigenrotation der Elektronen ca. 97 % des Magnetmoments
- die Ausrichtung/Auslenkung der Orbitale ca. 2 % „ „
- minimal der Kernspin (sehr klein) ca. 1 % „ „

Eine bestimmte Anordnung ist energetisch vorteilhafter und führt damit zu einer magnetischen Kopplung. Andere sind weniger vorteilhaft und wirken magnetisch (scheinbar) nicht. Viele vorteilhafte Anordnungen in einem Festkörper führen zu einer verstärkten magnetischen Wirkung.

Das ist auch der Grund, warum Eisen- oder Nickelverbindungen zum Teil nicht magnetisch wirken.

Zusammenhang zwischen Feldstärke und Induktion

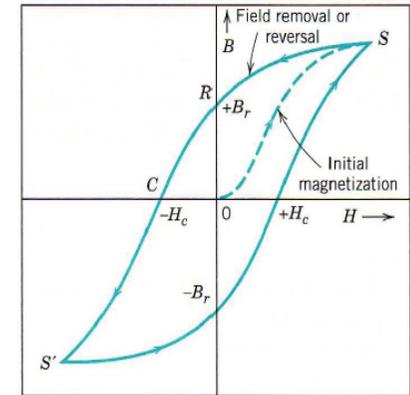
Der Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke H und magnetische Induktion (Flussdichte) B ist im Vakuum durch $\mathbf{B} = \mu_0 \times \mathbf{H}$ definiert. Im materiegefülltem Raum ist diese Beziehung nicht mehr erfüllt. Die Atome oder genauer deren Elektronen und der Kern wechselwirken mit dem Magnetfeld und verändern den Einfluss auf die Induktion. Dieser Einfluß wird durch den Faktor μ (magnetische Permeabilität) und μ_r (relative magnetische Permeabilität) korrigiert. Die magnetische Permeabilität ist ein komplexer, dreidimensionaler Tensor, allerdings für Induktivitäten reicht meistens die näherungsweise Betrachtung als Skalar vollkommen aus.

In Materie sind \mathbf{B} (Flussdichte bzw. Induktion) und \mathbf{H} (Feldstärke) nicht mehr proportional.

Es gilt die Beziehung:

$\mathbf{B} = \mu_r \times \mu_0 \times \mathbf{H}$

- μ_0 : magnetische Feldkonstante (Induktionskonstante) [$1,257 \times 10^{-6}$ oder $4 \times \pi \times 10^{-7}$ Vs/Am]
- μ_r : relative Permeabilität (Materialkonstante)
- B : Magnetische Flußdichte [Vs/m² bzw. T (Tesla)]
- H : magnetische Feldstärke [A/m]
- M : Magnetisierung [A/m] (fiktive Zusatzfeldstärke)
- J : Polarisation $J = B - \mu_0 H$ [Vs/m² bzw. T (Tesla)]



μ_r ist nur in kleinen Wertebereichen von B und H als Konstante anzusehen. Gerade im Fall des Ferromagnetismus ist μ_r eine komplizierte Funktion von H . Der nichtlineare Zusammenhang von B und H wird durch die Hysteresekurve dargestellt. Bei physikalische Betrachtung wird dieser Einfluss der Materie additiv mit Magnetisierung M oder der Polarisation J definiert.

Alternativ zu μ wird die Materialgröße χ (kappa) - Suszeptibilität - bei naturwissenschaftlicher Betrachtung verwendet. Das ist die Abweichung der relativen Permeabilität μ_r von 1

Suszeptibilität $\chi = \mu_r - 1$

Dadurch ergibt sich die Beziehung:

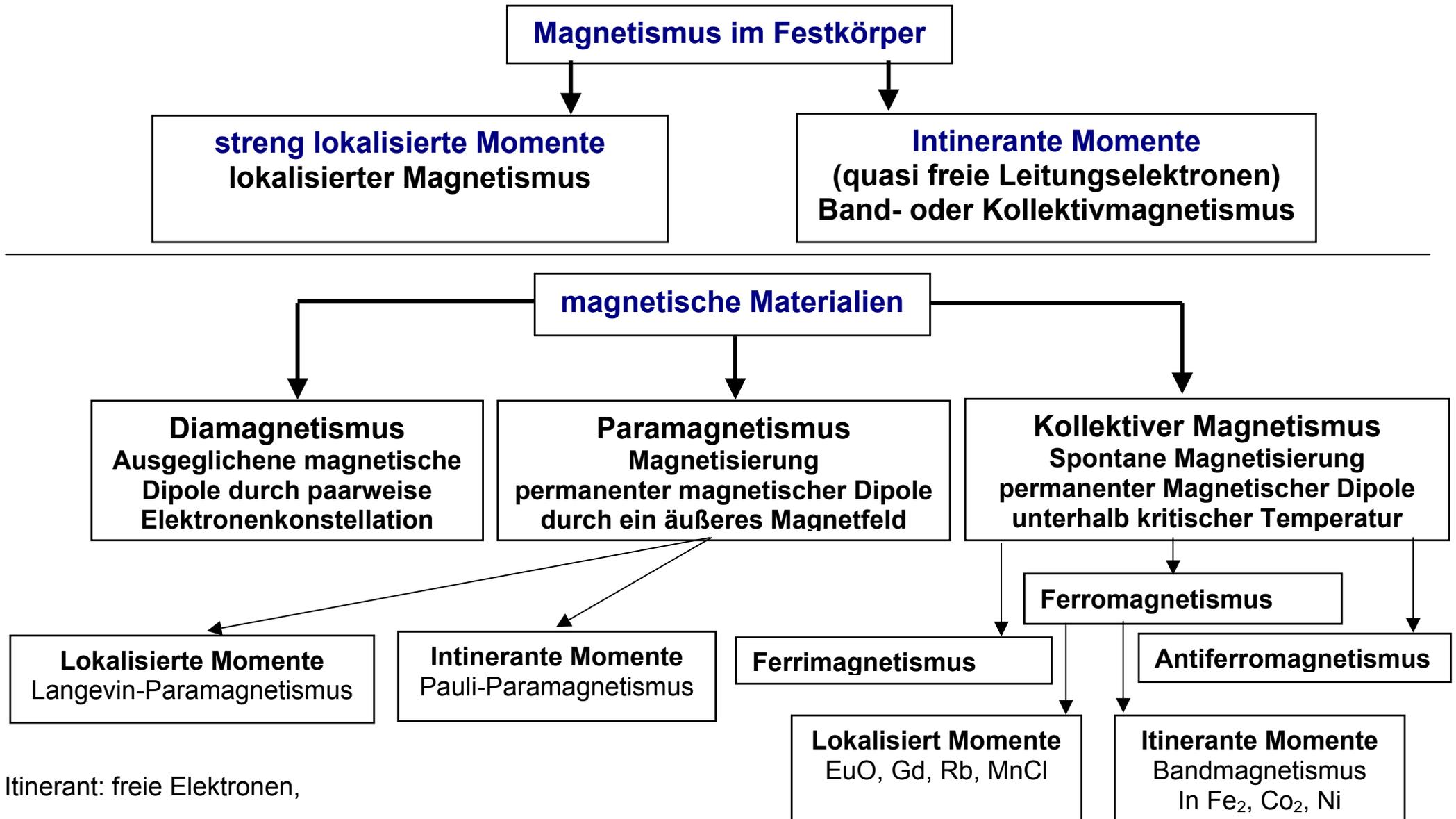
$\mathbf{B} = \mu_0 \times \mu_r \times \mathbf{H} = \mu_0 \times (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \times \mathbf{H} \times (1 + \chi)$

Auch die elektrische Suszeptilität ist direkt mit Atomaren Eigenschaften verknüpft (materialabhängig)

$\chi_{el} = \text{el. Suszeptibilität} = \rho_N \times \alpha / \epsilon_0$

Als weitere Größen zur Beschreibung der magnetischen Wirkung unter dem Einfluss eines Magnetfelds sind zwei Begriffe definiert. Die *magnetische Polarisation J* gibt den Zusatzfluss und die *Magnetisierung M* die fiktive Zusatzfeldstärke an.

Erscheinungsformen des Magnetismus im Festkörper:



Itinerant: freie Elektronen,

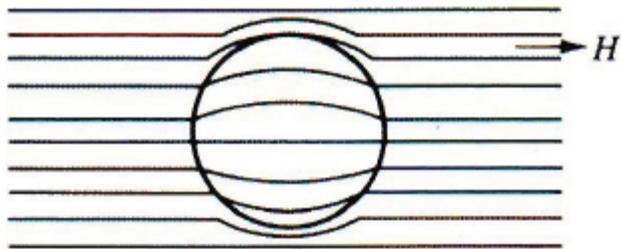
Erscheinungsformen des Magnetismus in Materie:

Die magnetischen Eigenschaften von Materie sind sehr unterschiedlich. Eine einfache Einteilung am Festkörper wird hier erklärt:

$\mu_r < 1$ **Diamagnetismus**

Effekt: Elektronenladung

$$\chi = - (7 \times 10^{-6} \dots 2 \times 10^{-4}) \quad / \quad \mu_r = (1 - 7 \cdot 10^{-6} \dots 1 - 2 \cdot 10^{-4})$$



Den Diamagnetismus gibt es bei allen Substanzen. Er wird allerdings durch andere Effekte überlagert. Durch ein Magnetfeld wird die Bahnbewegung durch die Induktion der Ringströme gestört. Diese wiederum induzieren Magnetfelder, die dem ursprünglichen Magnetfeld entgegengerichtet sind (Lenz-Regel).

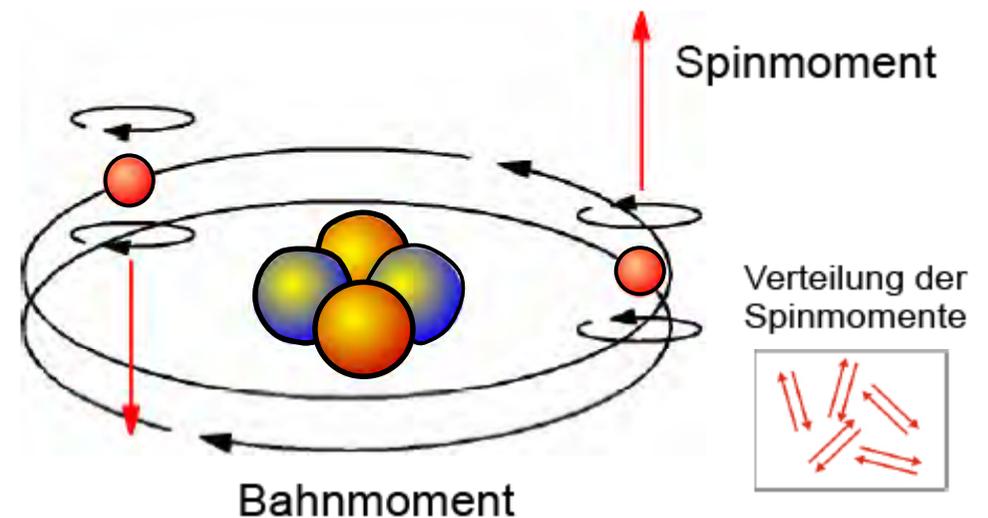
Diamagnetisch werden Materialien genannt, die die Tendenz haben, aus einem Magnetfeld herauszuwandern, bzw. bei denen die Dichte der Feldlinien eines extern angelegten Magnetfeldes in der Probe abnimmt.

Dieser Effekt wird teilweise zur Korrektur von Messwerten genutzt. Das am stärksten diamagnetische Element unter Normalbedingungen ist Wismut.

In Diamagnetischen Stoffen liegen die Elektronen ausschließlich paarweise vor.

Werden Diamagnete in ein magnetisches/elektrisches Feld gegeben, richten sich die Bahnmomente aus und erzeugen ein Magnetfeld dem erzeugenden Magnetfeld entgegengerichtet. Es kommt zu einer Schwächung des äußeren Feldes. Diamagnetismus ist eine Eigenschaft aller Materialien.

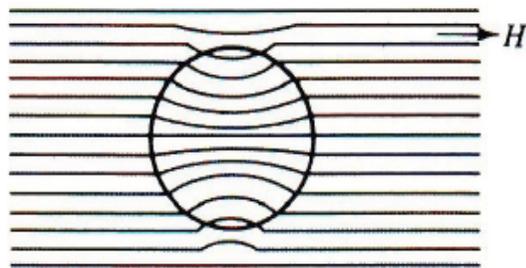
Z.B.: Silber, Gold, Kupfer, Graphit, Diamant, Blei
Silizium, Zink, Wismut, Wasser



$\mu_r = 1$ Paramagnetismus

$$\chi = 1 \cdot 10^{-8} \dots 4 \cdot 10^{-4} / \mu_r = (1 + 1 \cdot 10^{-8} \dots 1 + 4 \cdot 10^{-4})$$

Effekt: Spin- und Orbitaldrehung einzelner Atome oder nach Pauli freier Elektronen (ist kleiner 10^{-5})



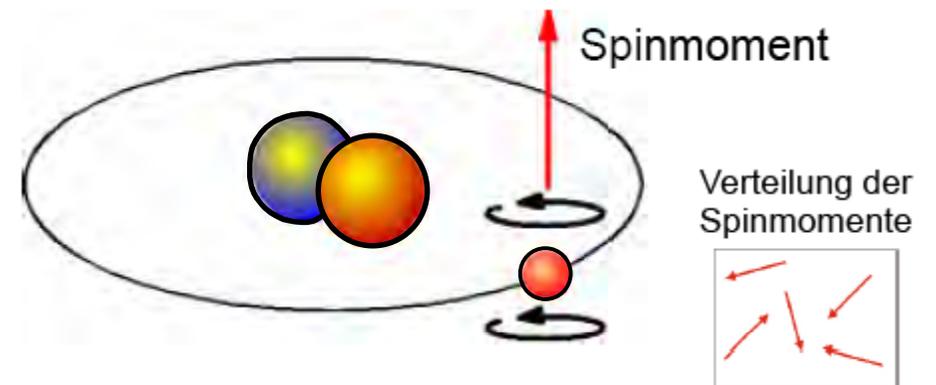
Magnetisiert sich in einem externen Magnetfeld so, dass das Magnetfeld in seinem Innern verstärkt wird.

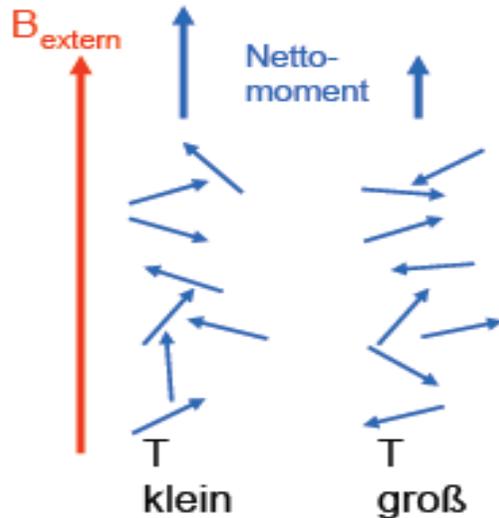
Para (Pauli-)Magnetismus beobachtet man in Metallen. Für Spin-up und Spin-down Elektronen kann man getrennte Energiebänder angeben. Durch Anlegen eines Magnetfeldes wird eines der Bänder leicht angehoben, so dass einige Elektronen ihren Spin und damit auch das Band wechseln. Durch die Ungleichverteilung von Up- und Down-Spins resultiert eine schwache Magnetisierung. Der Paramagnetismus ist an das Vorhandensein ungepaarter Elektronen gebunden. Das mit dem Spin- und Bahndrehimpuls verbundene magnetische Moment μ wird gemessen.

In paramagnetischen Materialien existieren unkompenzierte magnetische Spinmomente. Diese resultieren aus nicht voll besetzten inneren Atomschalen. Diese Spinmomente sind permanent aber völlig regellos.

Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, richten sich die Spinmomente solange das Magnetfeld anliegt, aus. Es entsteht ein Magnetfeld, das das innere Magnetfeld leicht verstärkt. Das Äußere Magnetfeld wird sehr gering geschwächt.

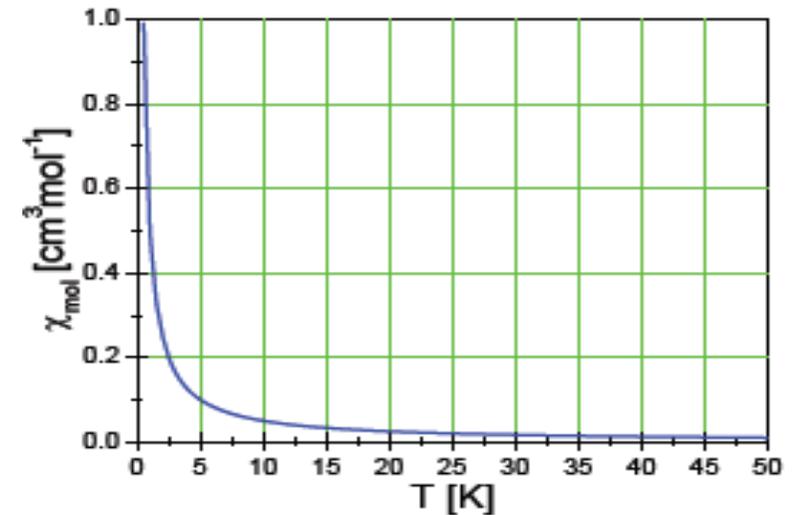
Z.B.: Aluminium, Chrom, Zinn, Magnesium, Mangan, Platin, Paladium, Natrium, Uran, Calcium, Luft, Salzsäure....



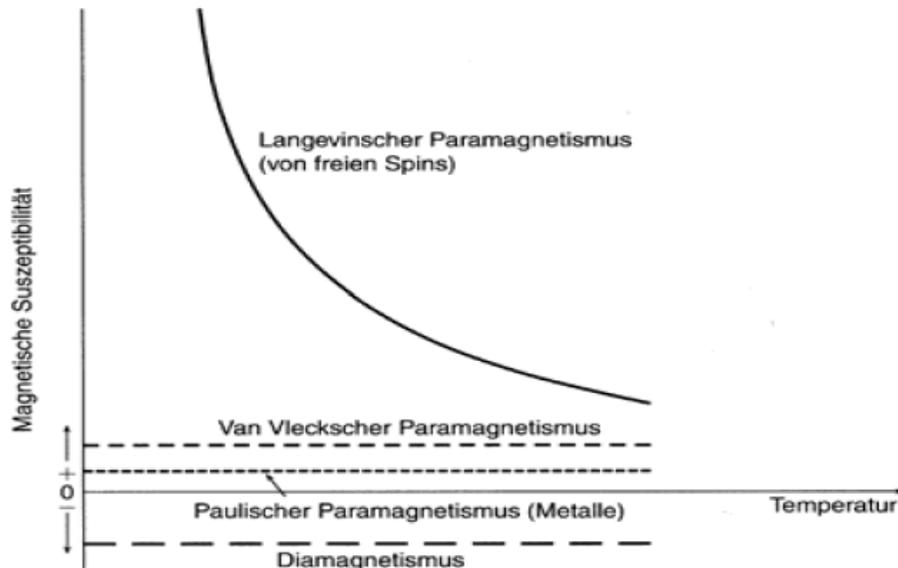


Die magnetischen Momente kann man sich wie kleine Stabmagnete vorstellen, die sich im äußeren Magnetfeld parallel zum Feld ausrichten wollen.

Dem entgegen wirkt die thermische Energie, die diese Ordnung stört. Der Grad der Ordnung (und damit die messbare Magnetisierung) nimmt also mit der Temperatur ab. Es gilt grundsätzlich das Curie Gesetz.



In einem größeren Magnetfeld richten sich die magnetischen Momente aufgrund des wirkenden Drehmomentes gegen die Temperaturbewegung in Feldrichtung aus. Es entsteht eine makroskopische Magnetisierung. Sie ist abhängig von der Größe der äußeren Feldstärke und der Temperatur des Stoffes.



Man unterscheidet drei Typen vom Paramagnetismus:

1. den Curie- oder Langevin-Paramagnetismus, der relativ stark und temperaturabhängig ist; er entsteht durch die Orientierung vorhandener Momente durch das angelegte Magnetfeld,
2. den temperaturunabhängigen Van-Vleck-Paramagnetismus, durch die Beimischung eines magnetischen angeregten Zustandes in den unmagnetischen Grundzustand eines Atoms oder Moleküls,
3. den temperaturunabhängigen Pauli-Paramagnetismus der Spinmomente der quasifreien Elektronen in Metallen.

$\mu_r \gg 1$ Ferromagnetismus $\chi \gg 1 - 5 \times 10^5$ / $\mu_r \gg 1$ (...100 ... 5×10^5)

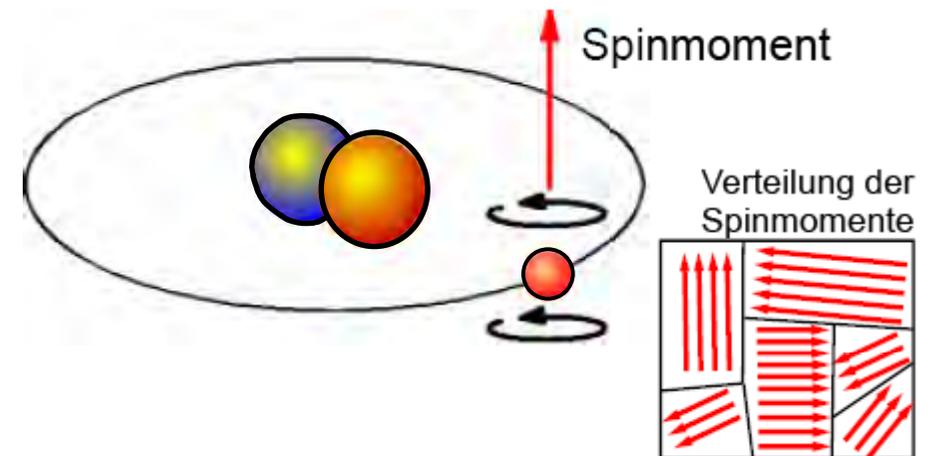
Effekt: gemeinsame Wirkung der magnetischen Momente von Atomen Collectivmoment

Ferromagnetismus findet man bei den Elementen nur für Eisen, Kobalt, Nickel und einige Lanthanoide (Gd, Tb). Diese Elemente haben viele ungepaarte Elektronen mit parallelem Spin. Statt der reinen Elemente setzt man meist Legierungen wie SmCo₅ oder Nd₂Fe₁₄B ein. Viele Übergangsmetalloxide zeigen ferromagnetisches Verhalten. Beim ferromagnetischen Übergang bis zur Curie-Temperatur (T_C) kommt es zum starken Anstieg der Magnetisierung, wobei die χ bzw. μ_r Werte z.T. um mehrere Zehnerpotenzen größer werden als in der paramagnetischen Phase. Ursache: Beim Paramagneten hat man im Grunde noch eine statistische Orientierung der Momente. Das äußere Magnetfeld erzeugt nur eine leichte Bevorzugung der parallelen Ausrichtung. Hier aber werden durch die räumliche Nähe die Spins, **lokale Felder** (Weiß'sche Bezirke) erzeugt, die um Größenordnungen höher sind als alle technischen Magnetfelder. Dadurch kommt es zu einer parallelen Stellung der magnetischen Momente in Domänen.

In ferromagnetischen Werkstoffen erfolgt eine Gleichrichtung der magnetischen Spinnomente in einzelnen Teilbereichen des Gitterverbundes (Weiß'sche Bezirke). Die einzelnen Weiß'schen Bezirke sind durch Bloch-Wände voneinander getrennt.

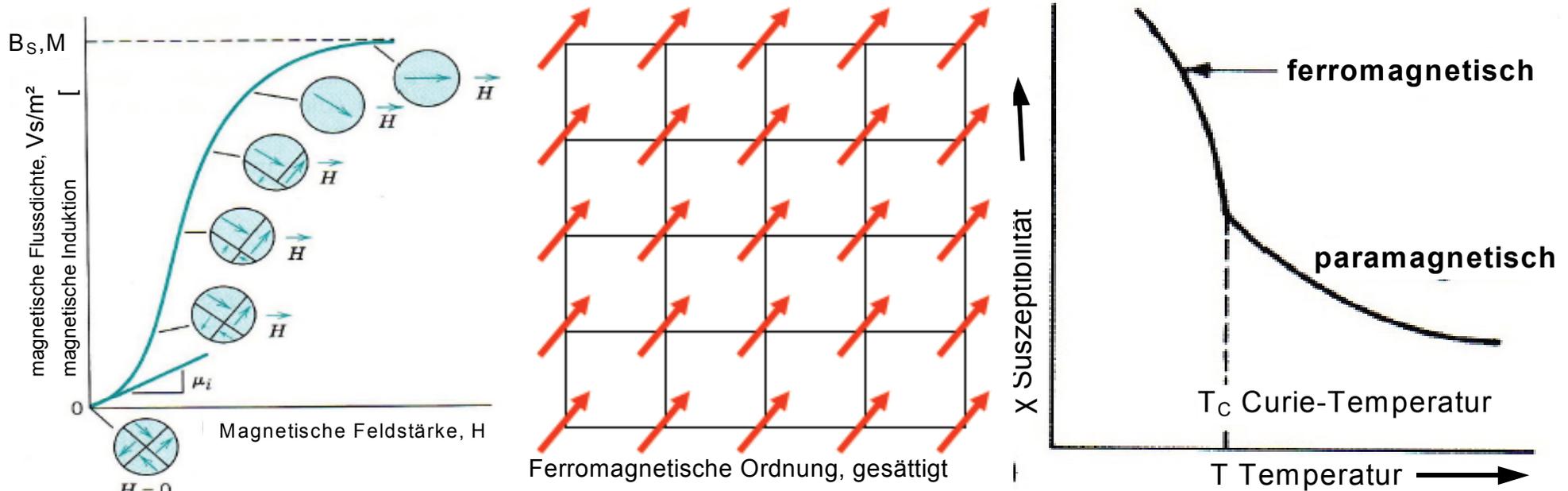
Ein äußeres magnetisches Feld erzwingt eine Vergrößerung der Weiß'schen Bezirke, die günstig zur Richtung der Magnetisierung orientiert sind.

Dieser Effekt bleibt auch nach Wegnahme des äußeren Magnetfeldes zu Teil erhalten – nicht alle Bezirke richten sich wieder auf das Ursprungs-Spinnmoment zurück. Die Ausrichtung der Spinnomente kann nicht beliebig erfolgen. Sie ist energetisch am günstigsten entlang von Vorzugsgitterrichtungen.



Z.B.: Eisen, Nickel, Kobalt, AlNiCo, SmCo, Nd₂Fe₁₄B, CrO₂, NiFe („PCrO₂ermalloy“), oder NiFeCo („Mumetal“) ...

Ausrichtung der Spins bei Ferromagnetismus

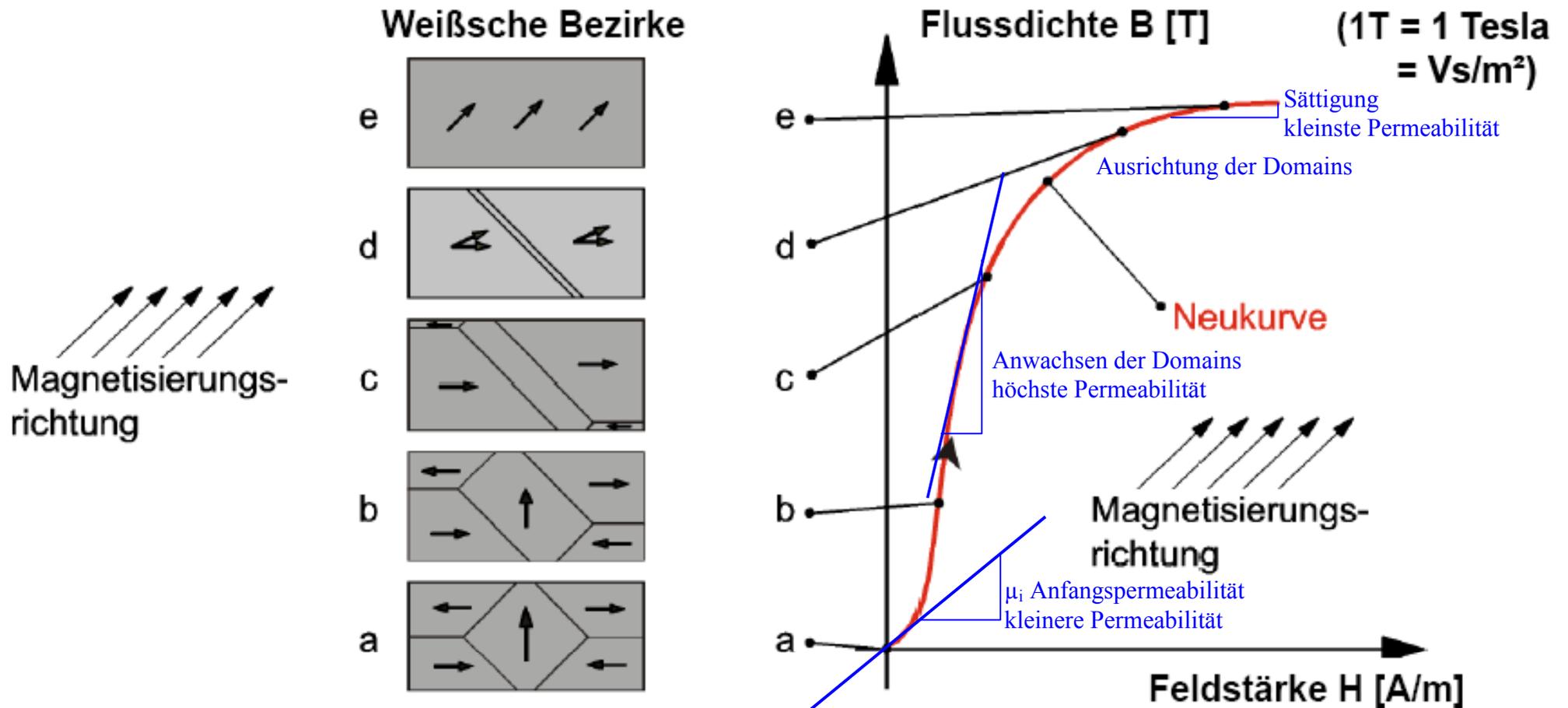


Die parallele Orientierung der Spins tritt nur innerhalb kleiner Domänen auf. Ohne äußeres Magnetfeld sind die Domänen ca. gleich groß, ihre Magnetischen Momente kompensieren sich und die äußere Magnetisierung ist 0. Mit zunehmendem Feld wachsen die Domänen mit paralleler Orientierung auf Kosten der übrigen. Sättigungsmagnetisierung ist erreicht, wenn alle magnetischen Momente parallel zum äußeren Feld ausgerichtet sind. Ferromagnetische Stoffe können auch ohne Einfluss eines äußeres Feld in eine spontane Magnetisierung übergehen (magnetisch geordneter Zustand).

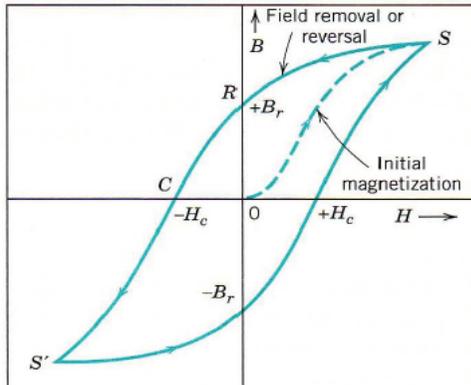
Folgende Bedingungen müssen für ferromagnetisches Verhalten erfüllt sein:

- Des Atom muss eine unvollständig besetzte Innere Elektronenschale haben. In dieser Elektronenschale müssen Spins vorhanden sein, die sich nicht kompensieren.
- Die Atome müssen ein Kristallgitter bilden, bei dem der Abstand der Atome mindestens dreimal so groß sein muss wie der Radius der unvollständig besetzten Elektronenschale.

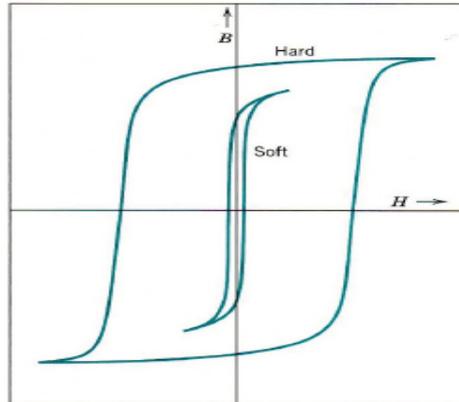
Vorgänge beim ersten Magnetisieren der Weiß'schen Bezirke bis zu Sättigung



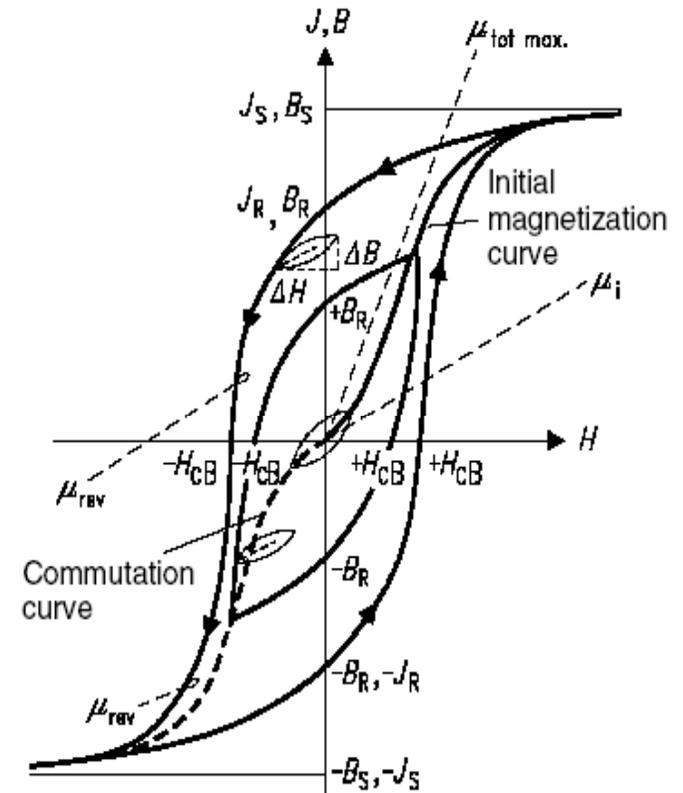
Magnetisierung eines Ferromagneten:



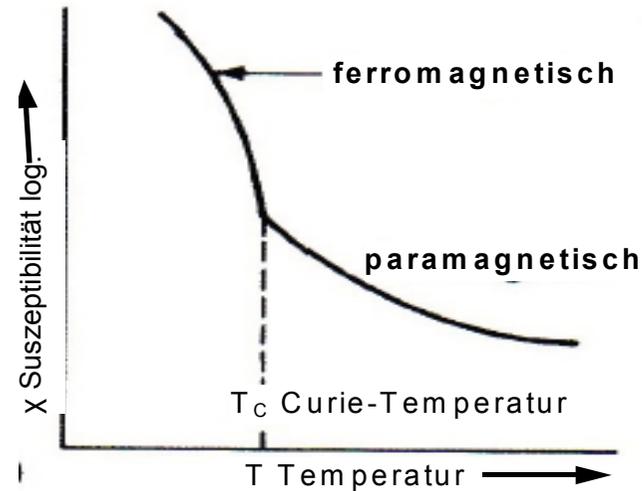
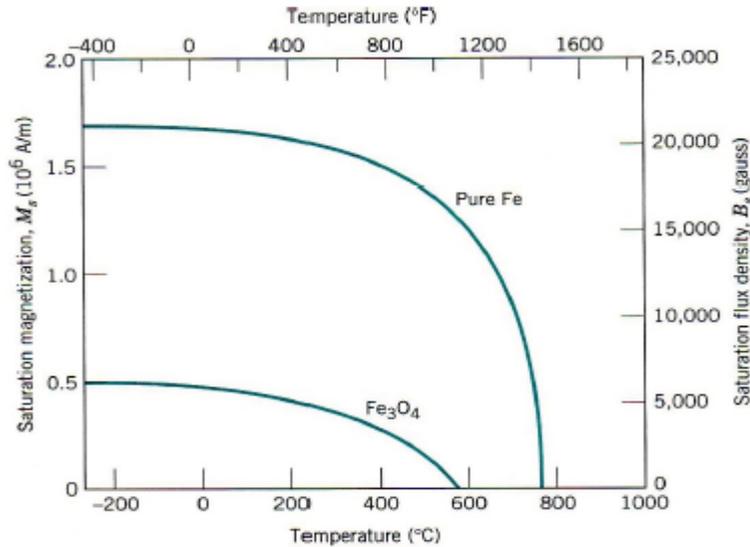
Neukurve: gestrichelte Linie
 Hysteresekurve: ausgezogene Linie
 Sättigungsmagnetisierung: S und S'
 Remanenz: die beim 0-Feld verbleibende Magnetisierung
 Koerzitivfeld: Feld zum Erreichen der Entmagnetisierung
 Restmagnetisierung: verbleibt beim Ausschalten der Magnetisierung



Je nach der Größe des Koerzitivfeldes werden weiche und harte Ferromagnetika unterschieden. Für Permanentmagnete und magnetische Speichermedien sind hohe Werte nötig. Für Transformatoren und Drosseln sind kleine Werte nötig, da die Breite des Koerzitivfeldes Energie- und Zeitverlust beim Umpolen bedeutet. Bei hartmagnetischen Stoffen wird die Bewegung der Blochwände behindert.



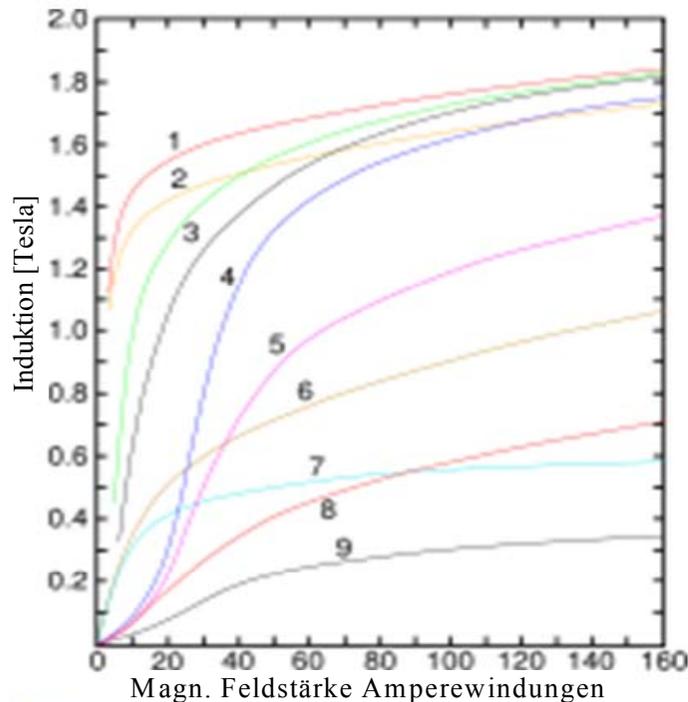
Die Hystereseschleife ist abhängig von der Material, der Form und der magnetischen Vorgeschichte. Eine hohe Konzentration an Kohlenstoff, Silizium usw. im Eisen bedeutet gleichzeitig eine hohe Dichte an Defekten bzw. Fremdatomen im Kristall. Diese Störungen bewirken eine Erschwerung der BLOCH – Wandverschiebungen sowie der Drehungen der Domänen. Somit muss mehr Energie aufgewendet werden, um die magnetischen Momente des Materials entsprechend des äußeren Magnetfeldes auszurichten, was sich in der Vergrößerung der Kurvenfläche äußert. Auch bei Ferromagneten wird die Ausrichtung der Momente durch die Temperatur gestört. Die Sättigungsmagnetisierung nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Oberhalb T_c (Curie-Temperatur) bricht die Ordnung zusammen – es wird paramagnetisch.



Temperaturabhängigkeit

Links:
reines Eisen und Ferrit

Rechts:
Übergang in den
Paramagnetischen Zustand



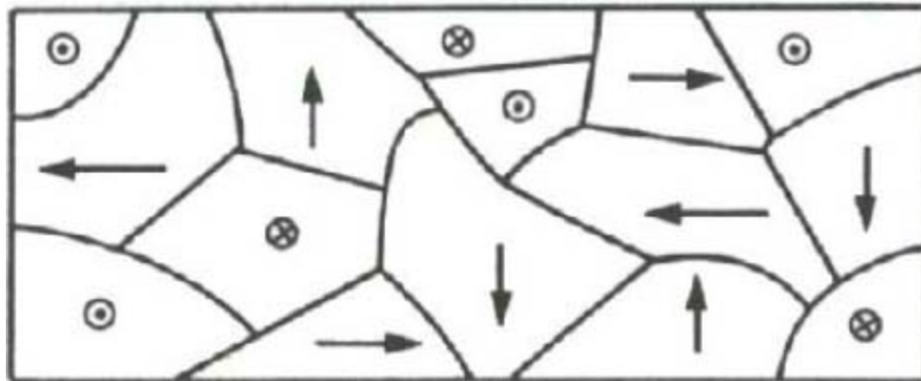
Magnetisierungskurven von 9 ferromagnetischen Stoffen mit Darstellung des Sättigungsbereiches.

1.Stahlblech	Material	Flussdichte in T
2.Siliziumstahl		Sättigungsbeginn
3.Gußstahl		
4.Wolframstahl		
5.Magnetstahl	<u>Cobalt-Eisen</u> Fe mit 47 bis 50 % Co	2,35 T
6.Guß Eisen	<u>Silicium-Eisen</u> Fe mit 3 bis 4 % Si	1,5-2 T
7.Nickel	<u>Nickel-Eisen</u> Fe mit 30 bis 50 % Ni	1,2-1,5 T
8.Cobalt	<u>Ferrit</u> (Mn - Zn)	0,4 T
9.Magnetit (Ferrit)	Ferrit (Ni - Zn)	0,2 T

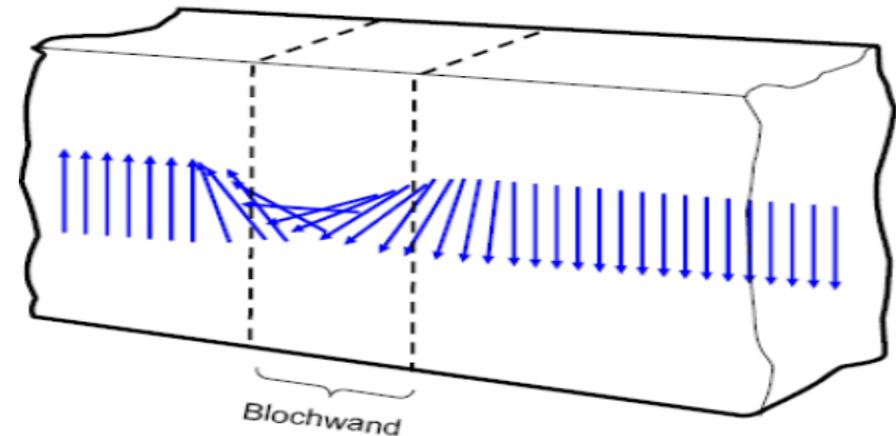
Ferromagnetika und Domänen

Infolge der quantenmechanischen Austauschwechselwirkungen zwischen den nicht abgesättigten Elektronenspins benachbarter Atome richten sich die magnetischen Momente auf atomarer Ebene über größere Bereiche (1 ... 100 μm), den **Weißschen Bezirken**, auch **Domäne** genannt, parallel aus.

Beispiel möglicher spontaner Domänen (Weiß'sche Bezirke)

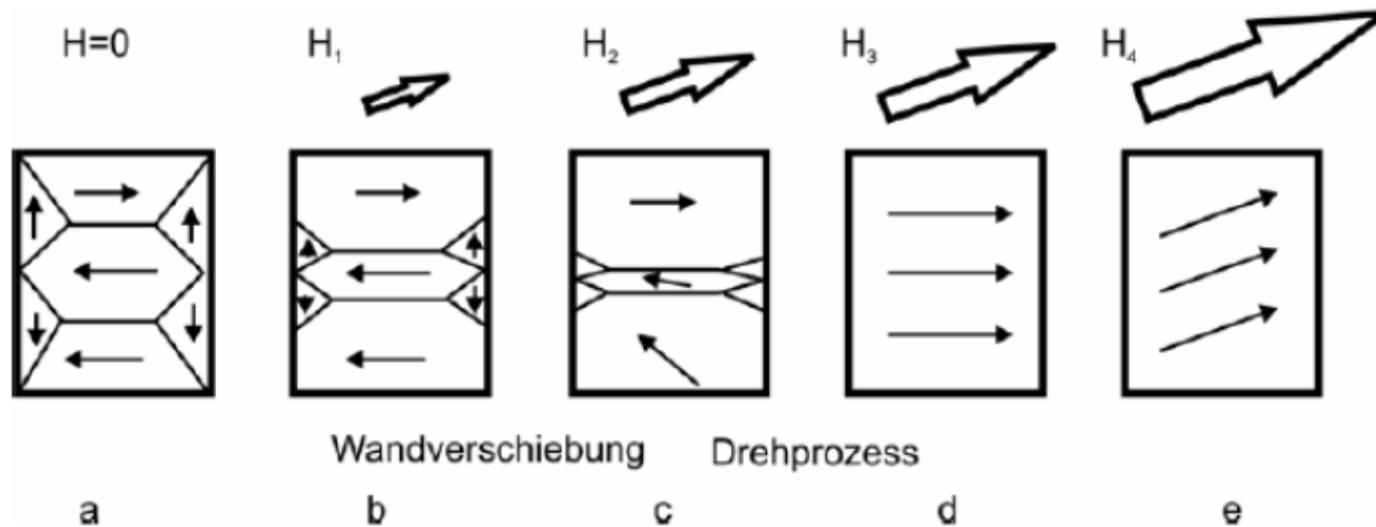


An den Rändern aneinanderliegender Domäne ändert sich die Magnetisierungsrichtung keineswegs sprunghaft, sondern schrittweise innerhalb einer **Bloch-Wand** Blochwand zwischen zwei 180° Domäne und Umkehr der atomaren Magnetisierungen



Da sich das Magnetfeld der spontane Domänenanordnung im Material schließt, **scheinen** auch ferromagnetische Materialien nach außen nicht magnetisch zu sein, solange kein äußeres Magnetfeld angelegt war oder ist.

Das Umbrechen der Bloch-Wände ist hörbar (Magnetostriktion). Auch kostet die Domänenwandänderung/-verschiebung Energie. Diese Ausrichtungsprozesse werden Barkhausensprünge genannt.



- mit wachsender Feldstärke
- a) nach außen unmagnetischer Zustand
 - b) reversible Wandverschiebung
 - c) weitere Wandverschiebung und Drehprozesse
 - d) Wandverschiebung beendet (magnetischer Einbereich in leichter Richtung)
 - e) reversible Drehprozesse, Sättigung

Das Anlegen eines sehr kleinen Magnetfeldes bewirkt Blochwandverschiebungen, die zu Anfang reversibel (b), nach Überschreiten bestimmter Potentialschwellen irreversibel (Barkhausensprünge) sind (c). Sind alle Weißschen Bezirke so orientiert, dass die Magnetisierungsrichtungen mit der einer Vorzugsrichtung zusammenfallen, die mit dem äußeren Feld den kleinstmöglichen Winkel bildet (d), so ist eine weitere Steigerung der Magnetisierung bei wachsendem äußerem Feld nur möglich, wenn die Magnetisierungsvektoren aus der Vorzugsrichtung heraus in die Richtung des äußeren Feldes gedreht werden. Diese Drehprozesse sind zunächst reversibel. Stehen schließlich sämtliche Momente parallel zum äußeren Feld, so wird das Material als magnetisch gesättigt bezeichnet (e). Bei Reduzierung des äußeren Magnetfeldes bis auf Null verschwindet die Magnetisierung nicht vollständig. Es bleibt eine Restmagnetisierung B_r bestehen. Diese verschwindet erst bei Anlegen eines entgegengesetzten Feldes in Höhe der Koerzitivfeldstärke B_{Hc} . (Achtung nur $B=0$!).

Bei weiterer Variation der äußeren Feldstärke kann die ganze Magnetisierungskurve durchfahren werden.

Den Zusammenhang beschreibt die **Hysteresekurve** oder $B(H)$ - Kennlinie.

Eine totale Entmagnetisierung ist durch das durchfahren der Hystereseschleifen praktisch nicht möglich, da nicht alle Domänen identisch reagieren und die Feldverteilung innerhalb der Geometrie differiert

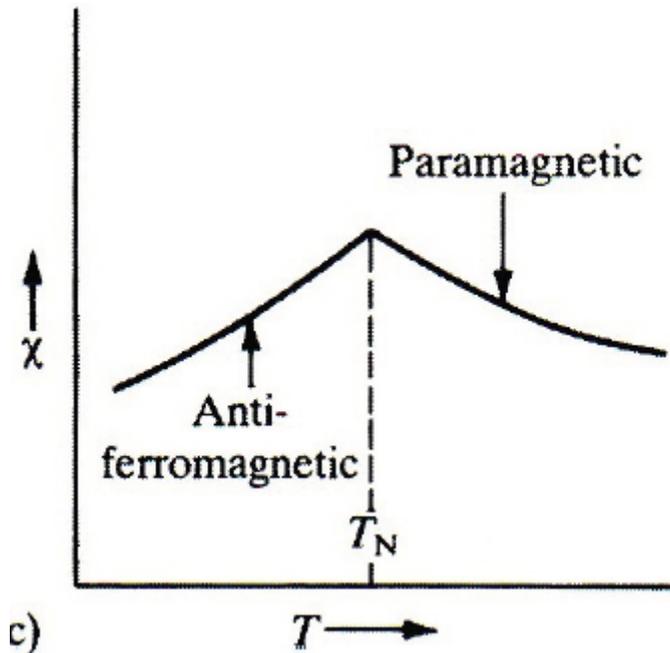
– ein relativer, minimaler Restmagnetismus bleibt immer.

Erwärmung über die Curie-Temperatur führt durch die Zerstörung der magnetischen Ordnung zur Entmagnetisierung.

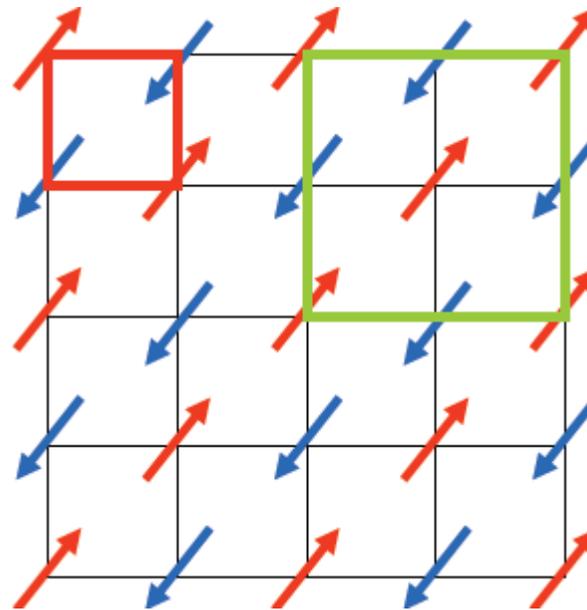
$\mu_r > 1$ Antiferromagnetismus

$\chi = 0 \dots 0,1 / \mu_r = (1 \dots 1,1)$

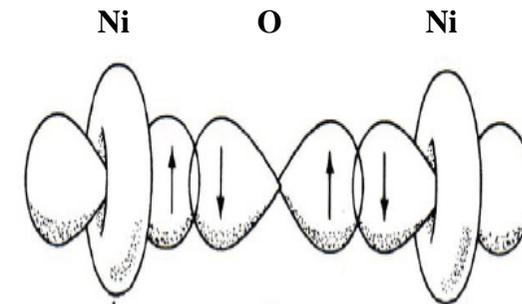
In Antiferromagneten besitzen die Spins unterhalb der Ordnungstemperatur (Néel-Temperatur T_N) eine antiparallele Ausrichtung. Als Folge bricht die Magnetisierung bei T_N stark ein. Die Ungleichartigkeit benachbarter Spins bewirkt i.d.R. eine Vergrößerung der magnetischen Wirkung.



rot: Einheitszelle im Kristall
grün: magnetische Einheitszelle



Die Elektronen des Sauerstoffatoms wechselwirken mit den Ni-Atomen. Durch die antiparallele Wechselwirkung Kommt es zu einer antiferromagnetischen Orientierung der Ni-Momente. (Superaustausch durch Fremdionen)



Es existieren mindestens 2 gleichwertige, entgegengerichtete magnetische Untergitter neben bzw. ineinander. Unterhalb der Neel-Temperatur kommt es zu spontaner Magnetisierung, aber beide Felder heben sich gegenseitig auf. Diese Werkstoffe weisen nach außen kein magnetisches Feld auf

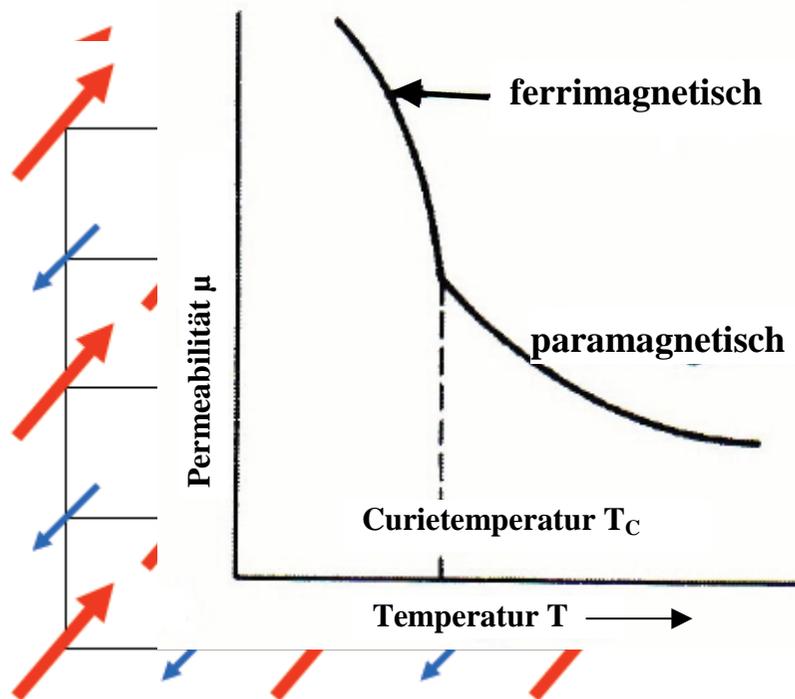
Z.B.: CrAl, MnO, FeO, NiO...

$\mu_r > 1$ **Ferrimagnetismus Ferrite**

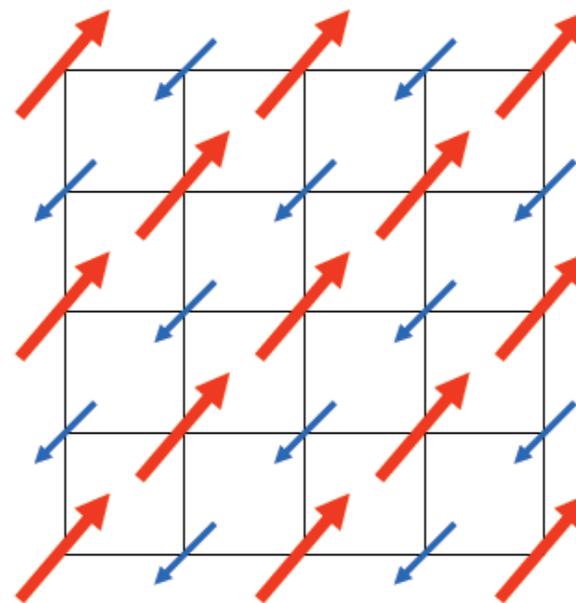
Ferrimagnete sind eine Mischform zwischen Ferro- und Antiferromagneten. Hier ist die Ausrichtung der magnetischen Momente zwar antiparallel, jedoch sind diese in eine Orientierung (Richtung) stärker. Also hier liegt eine antiferromagnetische Ordnung vor, dessen magnetische Momente aufgrund eines unsymmetrischen Gitteraufbaus unterschiedlich groß sind und deshalb sich nur teilweise kompensieren.

Ferrimagnete haben ähnliche Suszeptibilitäten, nur kleiner, wie Ferromagnete. Unterhalb der Curie-Temperatur steigt die Magnetisierung sprunghaft an.

Ein ferrimagnetischer Stoff ist im unmagnetisierten Zustand ohne Einwirkung eines Felds magnetisch neutral.



Ferrimagnetische Kopplung



Ursache ist eine antiferromagnetische Kopplung verschieden großer Momente. Es bleibt ein Nettomoment, das sich ähnlich verhält wie ein Ferromagnet. Die Aussteuerbarkeit ist allerdings kleiner, weil ein Feld entgegen wirkt. Beide Felder heben sich nicht restlos auf. Es bleibt eine permanente, wenn auch kleine, magnetische Polarisation bestehen.

Ferrimagnetismus (Ferrite) sind in der Technik nicht mehr wegzudenken. Der Vorteil liegt in ihrer Flexibilität.

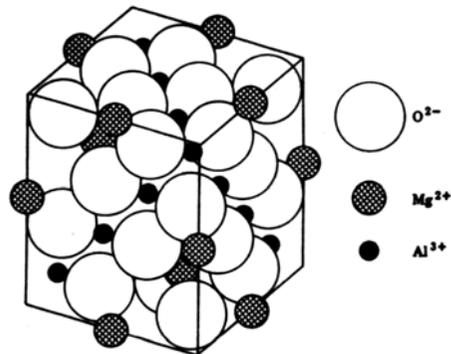
Ferrite sind chemische Verbindungen von Metallen und Oxiden. Verwendet werden hauptsächlich Mangan (Mn) Zink (Zn) Magnesium (Mg) und Aluminium (Al). MgZn-Verbindungen sind am stärksten verbreitet. Das aufbereitete Oxidpulver wird über einen Sinterprozess bei Temperaturen zwischen 1100 °C – 1400 °C in Form gepresst. Der daraus entstandene Keramikwerkstoff ist hart und spröde und kann nur noch durch Schleifen bearbeitet werden.

Ein weiterer großer Vorteil von Ferriten ist der hohe spezifische Gleichstromwiderstand von $0,1 - 10^7 \Omega\text{m}$ gegenüber reinen Metallen von 10^{-5} bis $10^{-4} \Omega\text{m}$. Dadurch werden Wirbelströme reduziert.

Die Ferrite unterschiedlichster Hersteller (EPCOS, Ferroxcube, Iskra, Kaschke ...) sind zumeist gegeneinander austauschbar (Vergleichstabellen). Hauptsächlich werden mittlerweile nur noch MnZn- und NiZn-Ferrite verwendet.

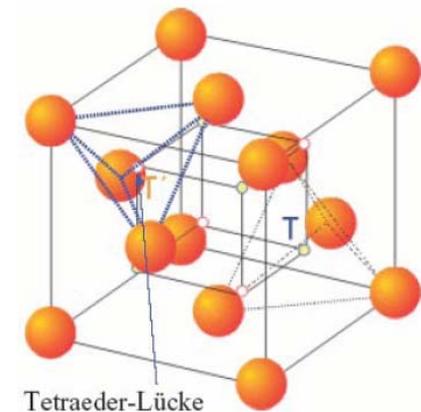
NiZn	HF-Bereich bis 500 MHz:	HF-Filter, HF-Transformer, Baluns, EMV....
MnZn	darunter bis einige 10MHz	Drosseln, Filter, Transformer

Beispiel der Kristallstruktur eines Ferrits (MgAl_2O_4)



Mangan und Aluminium können bei Ferriten durch andere Atome ausgetauscht werden.

	/Siemens/Epcos/	Kaschke
NiZn	= U17, K12, K1, K10	K40, K800
MnZn	= N30, T38, N67	K2000, K4000



Ferrit Werkstofftabellen nach EPCOS

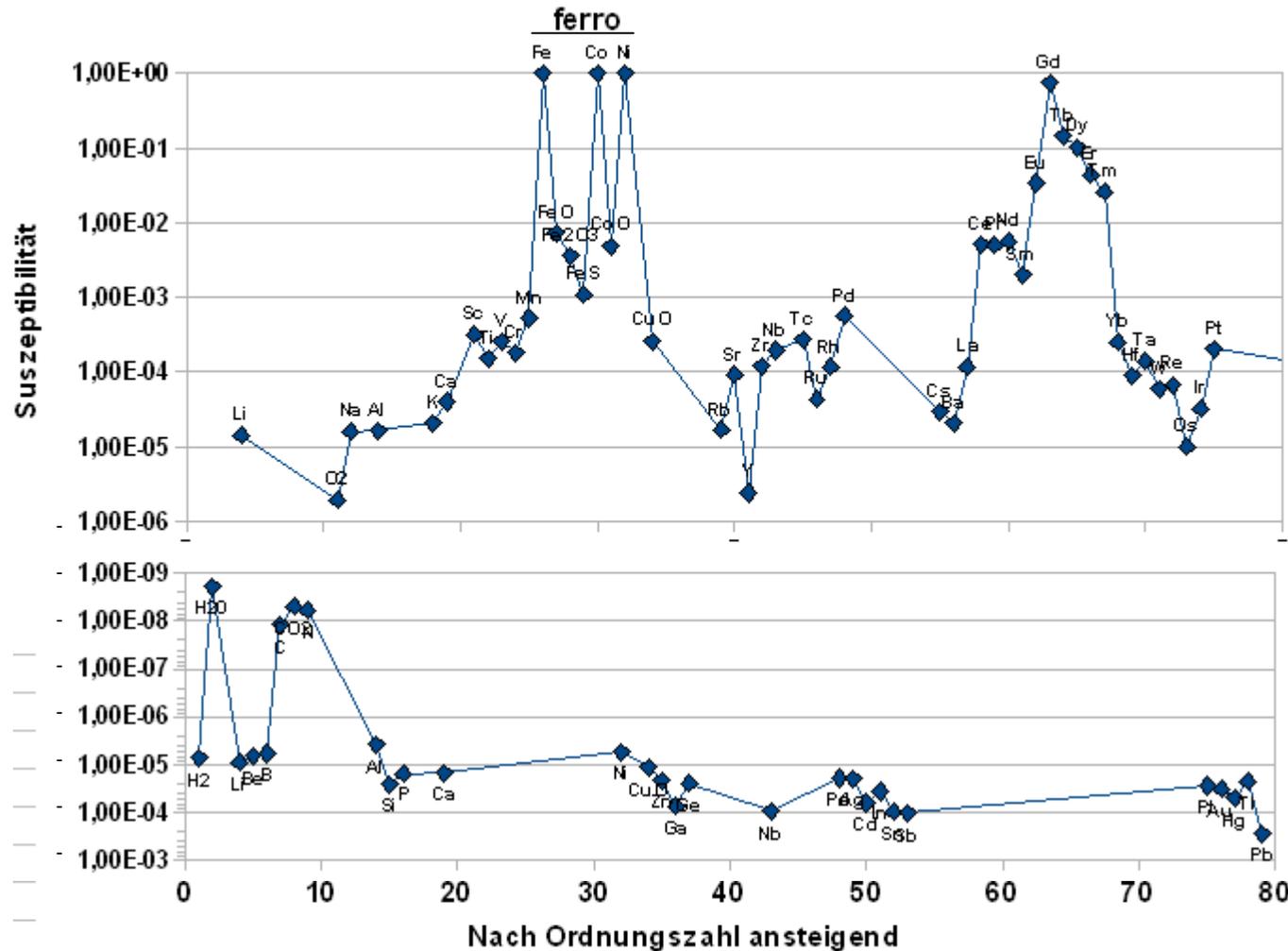
Bevorzugte Anwendung			Resonanz- kreise	Leitungs- dämpfung	Leistungs-Übertrager			Breitband-Übertrager	
Werkstoff			K1	M33	N27	N87	N41	T38	T46
Material			NiZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Einheit							
Anfangspermeabilität (T = 25°C)	μ_i		80 ± 25%	750 ± 25%	2 000 ± 25%	2 200 ± 25%	2 800 ± 25%	10 000 ± 30%	15 000 ± 30%
Messfeldstärke Induktion (nahe Sättigung) 10 kHz	H	A/m	5 000	2 000	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
	B_s 25°C	mT	310	400	500	480	490	380	400
	B_s 100°C	mT	280	310	410	380	390	240	240
Koerzitivfeldstärke (f = 10kHz)	H_c 25°C	A/m	380	80	23	16	22	9	7
	H_c 100°C	A/m	350	65	19	9	20	6	6
Günstiges Frequenzgebiet	1/s	kHz	1 500 ... 12 000	200 ... 1 000	25... 150	25... 500	25... 150	-- --	
Bezogener bei f_{min} Verlustfaktor bei f_{max}	$\tan \delta / \mu_i$	10^{-6} 10^{-6}	< 40 < 120	< 12 < 20					
Hysteresematerialkonstante	η_B	$10^{-6} / \text{mT}$	< 36	< 1,8	< 1,5	< 1,4	< 1,4	< 1,4	< 2,0
Curietemperatur	T_C	°C	> 400	> 200	> 220	> 220	> 220	> 130	> 130
Bezogener Temperaturbeiwert Bei 25 ... 55°C Bei 5 ... 25°C	α_F	$10^{-6} / \text{K}$	2 ... 8 7 ... 1	0,5...2,6 --					
Mittelwert von α_F Bei 25 ... 55 °C		$10^{-6} / \text{K}$	4	1,6	3	4	4	-0,4	-0,6
Dichte (Richtwert)	ρ	Kg/m^3	4650	4 500	4 750	4 800	4 800	4 900	5 000
Desakkomodationfaktor Bei 25 °C	DF	10^{-6}	20	8					
Spezifischer Gleichstromwiderstand	ρ	Ωm	10^5	5	3	8	2	0,1	0,01

Vergleichsliste Ferritmaterialien

Materialgruppe	kleine Verluste (Resonanzdrosseln)			hoch permeabel (Drosseln, Datenübertragung)					Leistung (Standardanwendungen für Schaltnetzteile)					
	750	2200	2200	4300	6000	10000	12000	15000	3000	2000	2300	2200	2200	1300
Permeabilität μ_i	750	2200	2200	4300	6000	10000	12000	15000	3000	2000	2300	2200	2200	1300
Epcos	M33	N26	N48	N30	T35	T38	T42	T46	N41	N27	N67	N87	N97	N49
Ferroxcube	3D3	3H1	3H3	2C11	3E25	3E5	3E6	3E7	3C81	3C80	3C85	2C90	3C96	3F35
Iskra	10G	16G	26G	19G	22G	12G	32G	52G	25G	15G	45G	35G	65G	75G
Magnetics	A	D	G	T	J	W			F		P			K
TDK	H6F	H6B	H6K	5H5	H5B	H5C2					PC30	PC40		PC47
FDK	3H1	3H21	3H20	2H04	2H06	2H10		2H15			6H10	6H20	6H40	

vergleichbar, entspricht ungefähr

Suszeptibilität X(kappa) im Vergleich



Die magnetische **Suszeptibilität** kann positive X und negative Werte annehmen. Für nicht **ferromagnetische** Metalle ist der Betrag von X meist sehr klein. Die meisten Festkörper sind ohne externes magnetisches Feld unmagnetisch.

In **diamagnetischen** Stoffen ist die magnetische Suszeptibilität negativ und damit die Magnetisierung dem von außen angelegten Feld entgegengerichtet. Diamagnetismus beruht auf Kreisströmen, die durch das äußere Feld induziert werden, denen magnetische Momente nach der Lenzschen Regel dem auslösenden Magnetfeld entgegengerichtet sind.

Paramagnetisch sind Stoffe, deren Gesamtbahn- und Spinnmoment die Entstehung eines permanenten magnetischen Moments zulassen. Ihre magnetische Suszeptibilität ist positiv. Durch die Wärmebewegung sind die magnetischen Momente paramagnetischer Stoffe meist regellos orientiert, sodass im Mittel kein resultierendes Moment vorhanden ist. Es entsteht eine Vorzugsrichtung parallel

zur Richtung des Magnetfeldes.

Charakteristisch für den Paramagnetismus ist die **Temperaturabhängigkeit** der magnetischen Suszeptibilität, die umgekehrt proportional mit der Temperatur abnimmt. Man bezeichnet die Beziehung $X = C/T$ als das Curiesche Gesetz. C ist eine Materialkonstante.

Suszeptibilität einiger Stoffe

Die Suszeptibilität oder die magnetische Feldkonstante χ_m in Materie ist temperaturabhängig. Hier sind einige typische Werte bei 20 °C ($\chi_m = \mu_r - 1$)

Diamagnetische Materialien haben eine negative Suszeptibilität

Paramagnetische Materialien haben eine positive Suszeptibilität und es gilt die [Néel-Temperatur](#)

Name	Zeichen	Suszeptibilität χ_m
Aluminium	Al	+16,5 x 10 ⁻⁶
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	-37,0 x 10 ⁻⁶
Antimonoxid	Sb ₂ O ₃	-69,4 x 10 ⁻⁶
Antimon	Sb	-99,0 x 10 ⁻⁶
Barium	Ba	+20,6 x 10 ⁻⁶
Bariumoxid	BaO	-29,1 x 10 ⁻⁶
Beryllium	Be	-9,0 x 10 ⁻⁶
Berylliumoxid	BeO	-11,9 x 10 ⁻⁶
Blei	Pb	-23,0 x 10 ⁻⁶
Bleioxide	PbO	-42,0 x 10 ⁻⁶
Bleisulfid	PbS	-84,0 x 10 ⁻⁶
Bor	B	-6,7 x 10 ⁻⁶
Bordioxid	B ₂ O ₃	-39,0 x 10 ⁻⁶
Cadmium	Cd	-19,8 x 10 ⁻⁶
Cadmiumoxid	CdO	-30,0 x 10 ⁻⁶
Cadmiumsulfide	CdS	-50,0 x 10 ⁻⁶

Calcium	Ca	+40,0 x 10 ⁻⁶
Calciumcarbonat	CaCO ₃	-38,2 x 10 ⁻⁶
Calciumoxid	CaO	-15,0 x 10 ⁻⁶
Kohlenstoff, Diamant	C	-5,9 x 10 ⁻⁶
Kohlenstoff, Graphit	C	-6,0 x 10 ⁻⁶
Kohlendioxid	CO ₂	-1,2 x 10 ⁻⁸
Cerium (alpha)	Ce	+5 160,0 x 10 ⁻⁶
Ceriumoxide	CeO ₂	+26,0 x 10 ⁻⁶
Cesium	Cs	+29,0 x 10 ⁻⁶
Cesiumoxid	CsO ₂	+1 534,0 x 10 ⁻⁶
Chrom	Cr	+180,0 x 10 ⁻⁶
Chromdioxide	Cr ₂ O ₃	+1 960,0 x 10 ⁻⁶
Cobalt	Co	ferro
Cobaltoxid	CoO	+4 900,0 x 10 ⁻⁶
Dysprosium	Dy	+103 500,0 x 10 ⁻⁶
Dysprosiumdioxid	Dy ₂ O ₃	+89 600,0 x 10 ⁻⁶
Eisen	Fe	ferro

Eisenoxid	FeO	+7 200,0 x 10 ⁻⁶
Eisenoxid (rot)	Fe ₂ O ₃	+3 586,0 x 10 ⁻⁶
Eisensulfid	FeS	+1 074,0 x 10 ⁻⁶
Erbium	Er	+44 300,0 x 10 ⁻⁶
Erbiumoxid	Er ₂ O ₃	+73 920,0 x 10 ⁻⁶
Europium	Eu	+34 000,0 x 10 ⁻⁶
Europiumdioxid	Eu ₂ O ₃	+10 100,0 x 10 ⁻⁶
Gadolinium	Gd	+755 000,0 x 10 ⁻⁶
Gadoliniumdioxid	Gd ₂ O ₃	+53 200,0 x 10 ⁻⁶
Gallium	Ga	-21,6 x 10 ⁻⁶
Galliumoxid	Ga ₂ O	-34,0 x 10 ⁻⁶
Germanium	Ge	-76,8 x 10 ⁻⁶
Germaniumoxid	GeO	-28,8 x 10 ⁻⁶
Germaniumsulfid	GeS	-40,9 x 10 ⁻⁶
Gold	Au	-28,0 x 10 ⁻⁶
Hafnium	Hf	~75.0- 104,0 x 10 ⁻⁶
Hafniumoxid	HfO ₂	-23,0 x 10 ⁻⁶
Holmiumdioxid	Ho ₂ O ₃	+88 100,0 x 10 ⁻⁶
Indium	In	-64,0 x 10 ⁻⁶
Indiumoxid	In ₂ O	-47,0 x 10 ⁻⁶
Indiumsulfid	InS	-28,0 x 10 ⁻⁶
Iridium	Ir	+32,1 x 10 ⁻⁶

Iridium oxide	IrO ₂	+224,0 x 10 ⁻⁶
Kalium	K	+20,8 x 10 ⁻⁶
Kaliumoxid	KO ₂	+3 230,0 x 10 ⁻⁶
Kaliumsulfid	K ₂ S	-60,0 x 10 ⁻⁶
Kupfer	Cu	-5,46 x 10 ⁻⁶
Kupferoxid	CuO	+259,6 x 10 ⁻⁶
Lanthan	La	+118,0 x 10 ⁻⁶
Lanthandioxid	La ₂ O ₃	-78,0 x 10 ⁻⁶
Lanthansulfid	La ₂ S ₃	-100,0 x 10 ⁻⁶
Lithium	Li	+14,2 x 10 ⁻⁶
Magnesium	Mg	>0,0 x 10 ⁻⁶
Magnesiumoxide	MgO	-10,2 x 10 ⁻⁶
Mangan (alpha)	Mn	+529,0 x 10 ⁻⁶
Mangan (beta)	Mn	+483,0 x 10 ⁻⁶
Molybdän	Mo	-96,5 x 10 ⁻⁶
Molybdänoxid	MoO ₂	+41,0 x 10 ⁻⁶
Molybdänsulfid	MoS ₃	-63,0 x 10 ⁻⁶
Natrium	Na	+16,0 x 10 ⁻⁶
Natriumoxid	Na ₂ O	-19,8 x 10 ⁻⁶
Natriumsulfid	Na ₂ S	-39,0 x 10 ⁻⁶
Neodym	Nd	+5 628,0 x 10 ⁻⁶
Neodymdioxid	Nd ₂ O ₃	+10 200,0 x 10 ⁻⁶

Neodymsulfid	Nd ₂ S ₃	+5 550,0 x 10 ⁻⁶
Nickel	Ni	ferro
Nickeloxid	NiO	+660,0 x 10 ⁻⁶
Nickelsulfid	NiS	+190,0 x 10 ⁻⁶
Niobium	Nb	+195,0 x 10 ⁻⁶
Niobiumoxid	Nb ₂ O ₅	-10,0 x 10 ⁻⁶
Osmium	Os	+9,9 x 10 ⁻⁶
Palladium	Pd	+567,4 x 10 ⁻⁶
Phosphor, black	P	-26,6 x 10 ⁻⁶
Phosphor, red	P	-20,8 x 10 ⁻⁶
Platin	Pt	+201,9 x 10 ⁻⁶
Platindioxid	Pt ₂ O ₃	-37,7 x 10 ⁻⁶
Praseodym	Pr	+5 010,0 x 10 ⁻⁶
Praseodymoxid	PrO ₂	+1 930,0 x 10 ⁻⁶
Praseodymsulfid	Pr ₂ S ₃	+10 770,0 x 10 ⁻⁶
Quecksilber (fest)	Hg	-24,1 x 10 ⁻⁶
Quecksilber (flüssig)	Hg	-33,4 x 10 ⁻⁶
Rhenium	Re	+67,6 x 10 ⁻⁶
Rheniumoxide	ReO ₂	+44,0 x 10 ⁻⁶
Rhodium	Rh	+111,0- +123,0 x 10 ⁻⁶
Rhodiumdioxid	Rh ₂ O ₃	+104,0 x 10 ⁻⁶
Rubidium	Rb	+17,0 x 10 ⁻⁶

Rubidiumoxid	RbO ₂	+1 527,0 x 10 ⁻⁶
Rubidiumsulfid	Rb ₂ S ₂	-90,0 x 10 ⁻⁶
Ruthenium	Ru	+43,2 x 10 ⁻⁶
Rutheniumoxid	RuO ₂	+162,0 x 10 ⁻⁶
Samarium	Sm	+1860,0- +2230,0 x 10 ⁻⁶
Samariumdioxid	Sm ₂ O ₃	+1 988,0 x 10 ⁻⁶
Samariumsulfid	Sm ₂ S ₃	+3 300,0 x 10 ⁻⁶
Sauerstoff	O ₂	+1,9 x 10 ⁻⁶
Scandium	Sc	+315,0 x 10 ⁻⁶
Schwefel (alpha)	S	-15,5 x 10 ⁻⁶
Schwefel (beta)	S	-14,9 x 10 ⁻⁶
Selen	Se	-25,0 x 10 ⁻⁶
Selenoxid	SeO ₂	-27,2 x 10 ⁻⁶
Silber	Ag	-19,5 x 10 ⁻⁶
Silberoxid	AgO	-19,6 x 10 ⁻⁶
Silizium	Si	-3,9 x 10 ⁻⁶
Siliziumcarbid	SiC	-12,8 x 10 ⁻⁶
Siliziumoxid	SiO ₂	-29,6 x 10 ⁻⁶
Stickstoff	N	-5,0 x 10 ⁻⁹
Stickstoff	N ₂	-6,0 x 10 ⁻⁹
Stickstoff acid	HNO ₃	-19,9 x 10 ⁻⁶
Stickstoffoxid (fest)	NO	+19,8 x 10 ⁻⁶

Strontium	Sr	+92,0 x 10 ⁻⁶
Strontiumoxid	SrO	-35,0 x 10 ⁻⁶
Tantal	Ta	+124,0- +154,0 x 10 ⁻⁶
Tantaloxid	Ta ₂ O ₅	-32,0 x 10 ⁻⁶
Technetium	Tc	+250,0- +290,0 x 10 ⁻⁶
Technetiumoxid	Tc ₂ O ₇	-40,0 x 10 ⁻⁶
Tellur	Te	-106,0 x 10 ⁻⁶
Terbium	Tb	+146 000,0 x 10 ⁻⁶
Terbiumdioxide	Tb ₂ O ₃	+78 340,0 x 10 ⁻⁶
Thallium (alpha)	Tl	-50,9 x 10 ⁻⁶
Thallium (beta)	Tl	-32,3 x 10 ⁻⁶
Thalliumdioxid	Tl ₂ O ₃	+76,0 x 10 ⁻⁶
Thalliumsulfid	Tl ₂ S	-88,8 x 10 ⁻⁶
Thorium	Th	+132,0 x 10 ⁻⁶
Thoriumoxid	ThO ₂	-16,0 x 10 ⁻⁶
Thulium	Tm	+25 500,0 x 10 ⁻⁶
Thuliumdioxid	Tm ₂ O ₃	+51 444,0 x 10 ⁻⁶
Titan	Ti	+150,0- 153,0 x 10 ⁻⁶
Titancarbid	TiC	+8,0 x 10 ⁻⁶
Titanoxid	TiO ₂	+5,9 x 10 ⁻⁶
Vanadium	V	+255,0 x 10 ⁻⁶
Vanadiumdioxid	V ₂ O ₃	+1,976,0 x 10 ⁻⁶

Wasser	H ₂ O	-7,2 x 10 ⁻⁶
Wasserstoff	H ₂	-2,1 x 10 ⁻⁹
Wismuth	Bi	-280,1 x 10 ⁻⁶
Wismuthoxid	BiO	-110,0 x 10 ⁻⁶
Wolfram	W	+59,0 x 10 ⁻⁶
Wolframcarbid	WC	+10,0 x 10 ⁻⁶
Wolframoxide	WO ₂	+57,0 x 10 ⁻⁶
Ytterbium	Yb	+249,0 x 10 ⁻⁶
Yttrium	Y	+2,4 x 10 ⁻⁶
Yttriumdioxid	Y ₂ O ₃	+44,4 x 10 ⁻⁶
Zinc oxide	ZnO	-46,0 x 10 ⁻⁶
Zinc sulfide	ZnS	-25,0 x 10 ⁻⁶
Zink	Zn	-11,4 x 10 ⁻⁶
Zinn (gray)	Sn	-37,0 x 10 ⁻⁶
Zinnoxide	SnO	-19,0 x 10 ⁻⁶
Zinnoxide	SnO ₂	-41,0 x 10 ⁻⁶
Zirconium	Zr	+119,0- 122,0 x 10 ⁻⁶
Zirconiumcarbid	ZrC	-26,0 x 10 ⁻⁶
Zirconiumoxid	ZrO ₂	-13,8 x 10 ⁻⁶

Ferromagnetische Materialien:Es gilt die [Curie-Temperatur](#)

Eisen Fe	μ_r	500 – 10 000
Mumetal 76% Ni	μ_r	ca. 150 000
Mumetal 50% Ni	μ_r	ca. 45 000
Mumetal 36% Ni	μ_r	ca. 45 000
DIN V250-35A	μ_r	ca. 9 000
DIN V270-35A	μ_r	ca. 8 000
DIN V330-35A	μ_r	ca. 6 500
DIN V530-50A	μ_r	ca. 6 500
Cobalt	Co μ_r	80 – 200

Ferrimagnetische Materialien Ferrite:Vorzugsweise Industrieferrite. Es gilt die [Curie-Temperatur](#)

FE ₂ O ₃			μ_i	500
EPCOS	U17	NiZn	μ_i	10
EPCOS	K1	NiZn	μ_i	80
EPCOS	M33	MnZn	μ_i	750
Ferroxcube	3F3	MnZn	μ_i	2 000
EPCOS	N67	MnZn	μ_i	2 100
Ferroxcube	3C90	MnZn	μ_i	2 300
Ferroxcube	3E6	MnZn	μ_i	12 000
EPCOS	T56	MnZn	μ_i	15 000

Es gibt weitere ferromagnetische seltene Erden

Auch manche Legierungen haben eine hohe relative Permeabilität

Antiferromagnetische MaterialienEs gilt die [Néel-Temperatur](#)

Salze	MnO
Ilmenite Fe ₂ TiO ₃	μ_r 0,3 – 3,5
Wüstite	

 μ_i = Anfangspermeabilität μ_r = relative Permeabilität

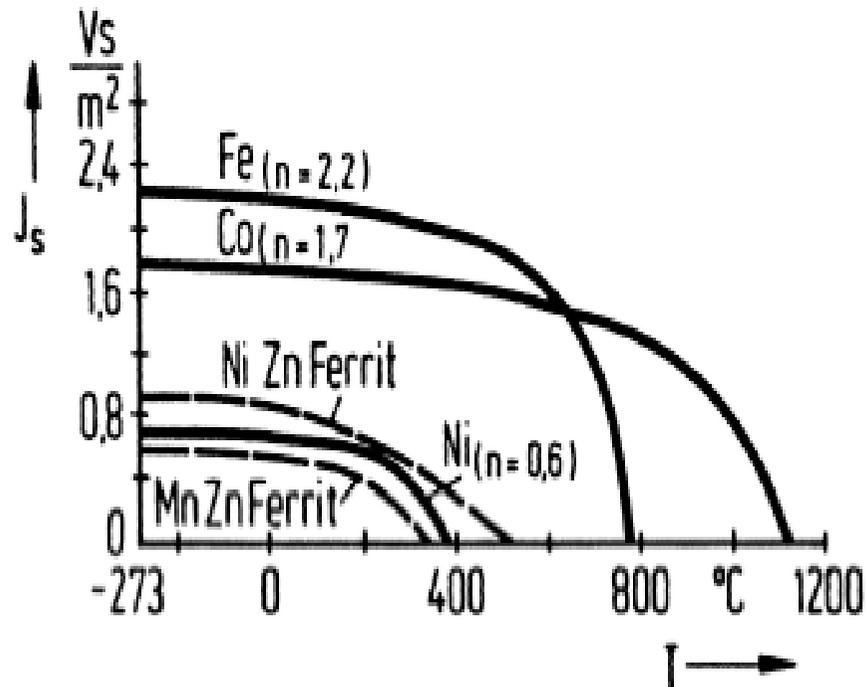
Vergleich der magn. Flussdichte (Induktion)

unterschiedlicher Materialien

Polarisation $J = B - \mu_0 H$ [Vs/m² bzw. T Tesla]

MS bzw. Sättigungspolarisation J_s nimmt über T ab

Fe und Co haben die höchsten Curietemperaturen



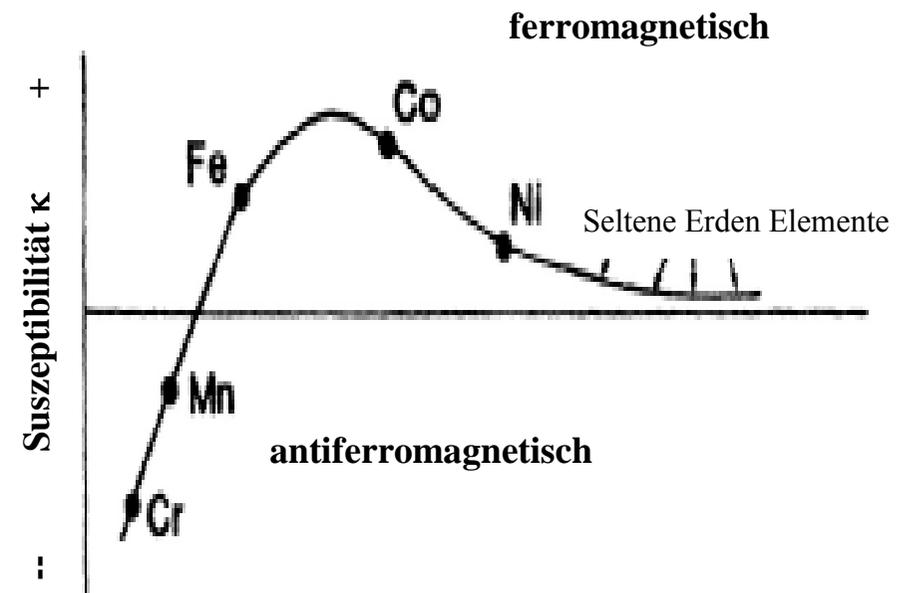
Magnetisierung unterschiedlicher Elemente

$0 = \chi$ (kappa) = $\mu_r = 1$

Logarithmische Darstellung

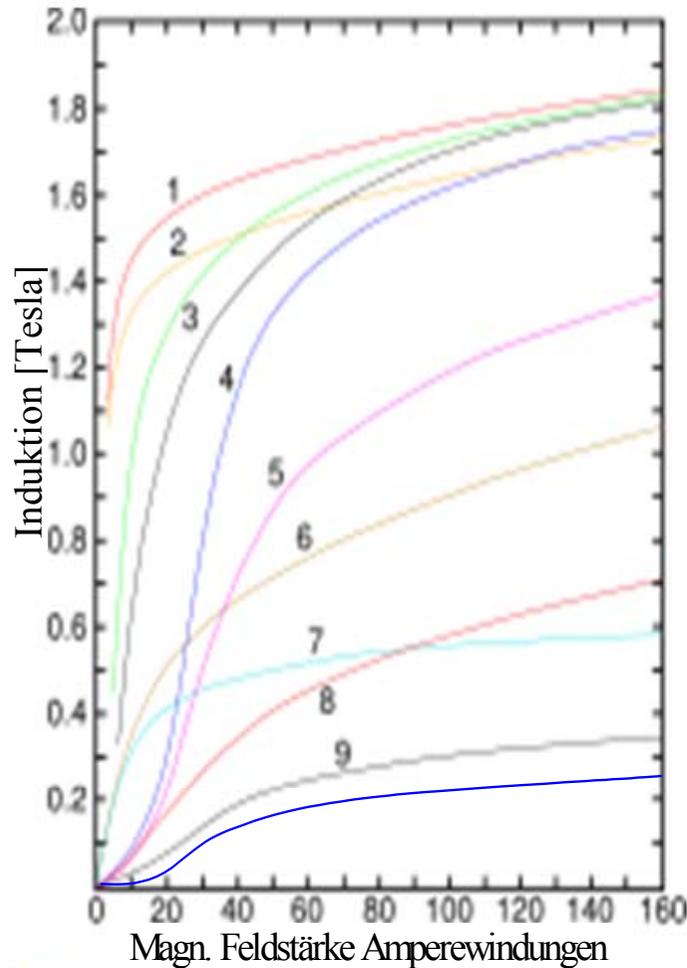
>0: parallele Momente sind energetisch bevorzugt

<0: Antiparallelausrichtung energetisch günstiger



Mangan: Vergrößerung des interatomaren Abstandes:
 Übergang vom Antiferromagneten zum Ferromagneten durch
 Einbau von Stickstoffatomen in das Mangan Gitter, oder
 Einbau von Wasserstoff.

Magnetisierungskurven von 9 ferromagnetischen Stoffen mit Darstellung des Sättigungsbereiches.



- 1. Stahlblech
- 2. Siliziumstahl
- 3. Gußstahl
- 4. Wolframstahl
- 5. Magnetstahl
- 6. Gußeisen
- 7. Nickel
- 8. Cobalt
- zum Vergleich Ferrit
- 9. Ferrit, Magnetit) MnZn
- 10. Ferrit NiZn

Material	Flussdichte in T	Sättigungsbeginn
Cobalt-Eisen Fe mit 47 bis 50 % Co	2,35	T
Silicium-Eisen Fe mit 3 bis 4 % Si	1,5-2	T
Nickel-Eisen Fe mit 30 bis 50 % Ni	1,2-1,5	T
Ferrit (Mn - Zn)	0,4	T
Ferrit (Ni - Zn)	0,3	T

Magnetostriktion

Magnetostriktion bezeichnet den Effekt der spontanen Längen- bzw. Volumenänderung magnetischer Substanzen bei der Änderung der Magnetisierungsachsen.

Relative Längenänderung $\Delta L/L_0 = 10^{-6}$ bis 10^{-3}

Einsatz zum Bau von Ultraschallanlagen mit reinem Nickel, Eisen-Aluminium- oder Terbium-Eisen-Legierungen

Das Brummen von Transformatoren geht fast ausschließlich auf Magnetostriktion zurück.

Diese Transformatoren sind zumeist schlecht verklebt oder getränkt.

Auch bei Kernen mit Mittelsteg wie E-, RM oder Schalenkernen kann der mittlere Steg gegeneinander schlagen.

Bei Netztransformatoren schwingen die einzelnen Bleichpakete bei großer Aussteuerung (auch mit der Umgebung)

Die Umkehrung der Magnetostriktion ist der Villari-Effekt.

Vormagnetisierte Substanzen können durch mechanische Verformung entmagnetisiert werden.

Weitere Begriffe:

Superparamagnetismus:

Diese Erscheinung setzt bei ferro- bzw. ferrimagnetischen Partikeln ein, wenn die Partikelgröße einen kritischen Wert unterschreitet. Die thermische Energie ist dann größer als die Kristallanisotropieenergie und die Magnetisierungsrichtung folgt der thermischen Fluktuation. Solche Partikel besitzen keine Remanenz. Das Vorstadium sind eindomänige Partikel.

Pyromagnetismus

ist ein Wissenschaftszweig der Physik und Elektrotechnik, der sich mit dem Phänomen von Wärme und Magnetismus beschäftigt. Wärme ist nichts anderes als die kinetische Bewegungsenergie eines Teilchens (siehe Brownsche Bewegung), bewegte Ladungen im Raum erzeugen Magnetfelder. Der Wissenschaftszweig, der den Pyromagnetismus studiert, untersucht Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen wie Wärme (Temp.), elektrischen Widerstand (Ohm), elektrische Stromstärke (Ampere) und der magnetischen Flussdichte (Tesla) bei sehr hohen Temperaturen.

Ein bekanntes Phänomen ist, dass starke Wärme den Widerstand eines Materials erhöht (es wird diamagnetisch), und somit die Stromstärke und die Stärke eines Magnetfeldes schwächt. Ein anderes Phänomen hat mit dem Erdmagnetfeld zu tun. Es entsteht dadurch, dass im äußeren Erdkern flüssiges Eisen durch Wärme in Bewegung gesetzt wird. Diese Bewegungen der Eisenatome rufen elektrische Ströme hervor, durch welche das Erdmagnetfeld entsteht.

Amagnetismus

Ein amagnetischer Stoff ist im Allgemeinen unbeeinflussbar durch magnetische Felder. Häufig findet man auch die Bezeichnungen nicht- oder unmagnetisch. Zu beachten ist jedoch, dass es bei sehr hohen Magnetfeldstärken auch bei amagnetischen Materialien zu Anziehungs- oder im noch geringeren Maße zu Abstoßungseffekten kommen kann. Diese Effekte sind jedoch wesentlich schwächer als es zum Beispiel bei ferromagnetischen Stoffen (wie z.B. Eisen) der Fall wäre. Die Bezeichnung amagnetisch ist nicht einheitlich und der Grad des Magnetismus kann beobachtbar schwanken.

Metamagnetismus

Metamagnetische Materialien weisen bei sehr kleinen äußeren Magnetfeldern verschwindend kleine Magnetisierungen auf, bei größer werdender Feldstärke nimmt die Magnetisierung unverhältnismäßig stark zu, und geht gegen einen Sättigungswert. Dieses Verhalten lässt sich darin begründen, dass sich der Kristall für kleine Felder antiferromagnetisch, und für starke Felder ferromagnetisch verhält.

Magnetismus in der Biologie

Magnetische Wechselfelder können über Induktion elektrische Ströme im Gewebe auslösen und so einen (schwachen) Einfluss auf das Nervensystem haben. Beispielsweise sind bei entsprechenden Feldern so genannte Magnetophosphene, gemeint sind optische Sinneswahrnehmungen, zu beobachten. Auch der motorische Cortex kann derartig mit Hilfe der Transkraniellen Magnetstimulation (TMS) stimuliert werden, dass es zu unwillkürlichen Muskelkontraktionen kommt. Des Weiteren ist seit langem bekannt, dass magnetische Wechselfelder die Sekretion von Hormonen (Beispiel Melatonin) beeinflussen können.

Viele Vögel, Meeresschildkröten und weit ziehende Fische verfügen über einen Magnetsinn und können sich mittels des Erdmagnetfelds orientieren.

Die Experimente mit Magnetismus sind ziemlich alt – hier ein Beispiel:

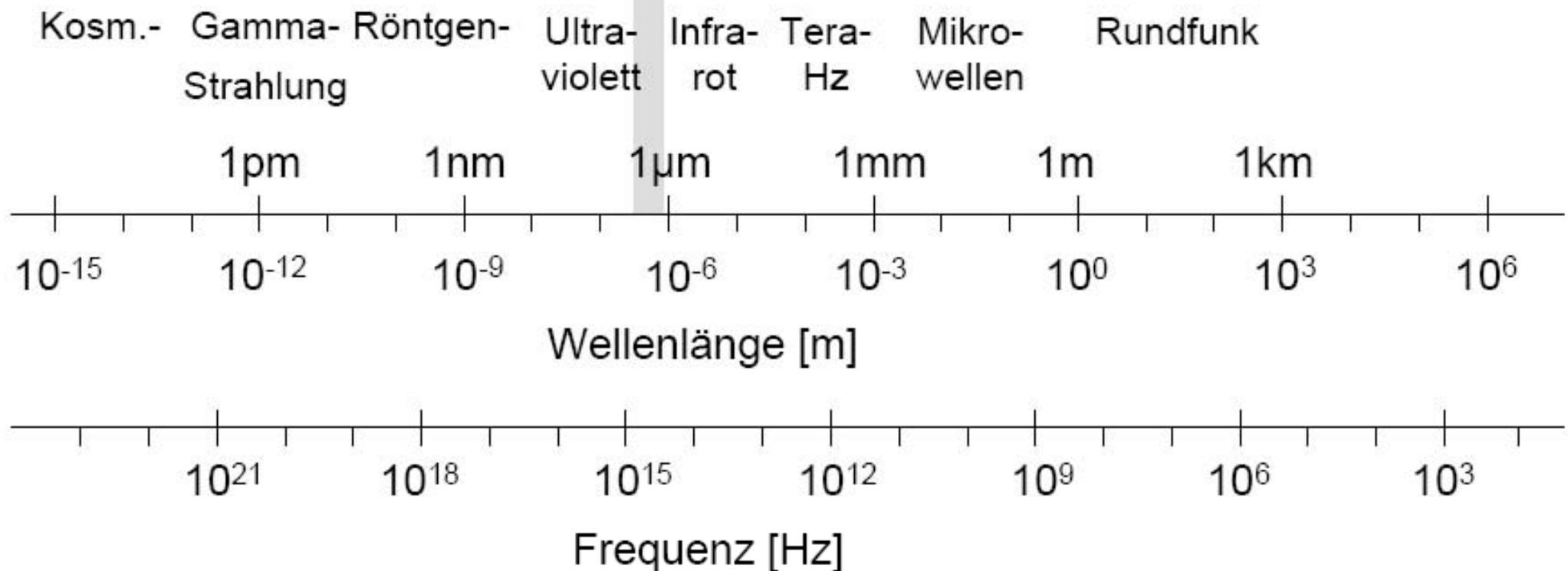
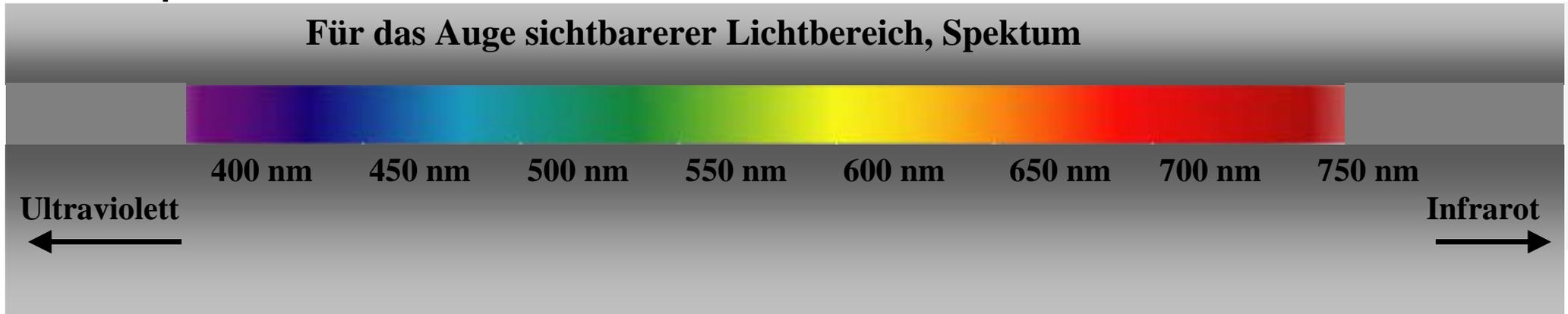
Der Arzt Franz Anton Mesmer entwickelte eine Theorie, die 1784 von der französischen Akademie der Wissenschaften geprüft und verworfen wurde, nach der ein Fluid, das Mesmer als Magnetismus animalis bezeichnete, von Mensch zu Mensch übertragbar sei und bei der Hypnose und bestimmten Heilverfahren (*Mesmersche Streichungen*) eine Rolle spielen sollte.

Supraleiter unterhalb der Sprungtemperatur T_c haben eine Suszeptibilität $\chi = -1$, d.h. das Feld wird vollständig aus dem Material verdrängt (**Meißner-Ochsenfeld-Effekt**).

Magnetfeldstärken im Vergleich

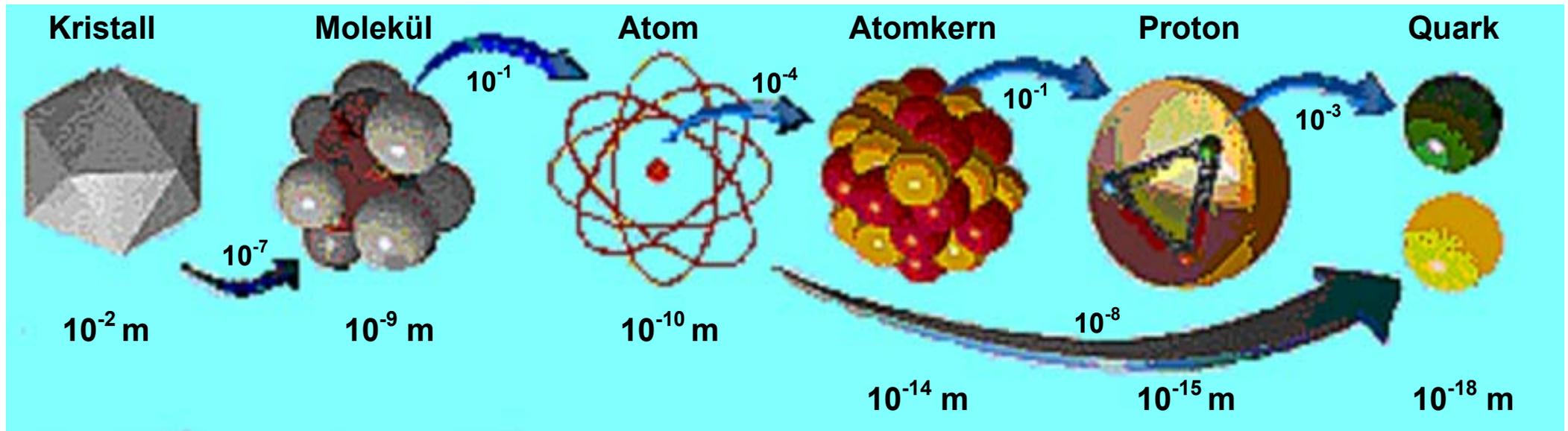
Relative Magnetfeldstärke Bezogen auf Magnetfeld Der Erde mit $B = 20\text{-}50 \mu\text{T}$	Absolute Magnetfeldstärke in T	Absolut in Kurzform	Feldquellen
1 000 000 000 000	50 000 000	50 MT	Neutronensterne
100 000 000 000	5 000 000	5 MT	Pulsare
10 000 000 000	500 000	500 kT	
1 000 000 000	50 000	50 kT	
100 000 000	5 000	5 kT	Forschung (kurzzeitig)
10 000 000	500	500 T	
1 000 000	50	50 T	Forschung (Dauerbetrieb)
100 000	5	5 T	Technik, Sterne
10 000	0,5	500 mT	Sonnenflecken
100	0,005	5 mT	Normgrenzwert
10	0,0005	500 μT	Planetenfeld Jupiter
1	0,000 05	50 μT	Planetenfeld der Erde
0,1	0,000 005	5 μT	gute Elektrogeräte
0,01	0,000 000 5	500 nT	Magnetsturm der Sonne
0,001	0,000 000 05	50 nT	Planetenfeld Mars, Fernsehen
0,000 1	0,000 000 005	5 nT	
0,000 01	0,000 000 000 5	500 pT	Mond, Interplanetares Feld
0, 000 001	0,000 000 000 05	50 pT	Herz
0,000 000 1	0,000 000 000 005	5 pT	interstellare Feld
0,000 000 01	0,000 000 000 000 5	0,5 pT	Gehirn
0,000 000 001	0,000 000 000 000 05	0,05 pT	Augen, intergalaktisches Feld

Das Frequenzband



Frequenz	Wellenlänge	Bezeichnung		Anmerkungen
0,3Hz . 3 Hz		Craniosacrale Frequenz Delta-Frequenzen		Hauptsächlich biologisch relevante Frequenzen
3Hz – 30 Hz	$10^5 \text{ km} - 10^4 \text{ Km} / 10^8 \text{ m} - 10^7 \text{ m}$	ELF Extremely Low Frequency Delta-Frequenzen	NF	biologisch relevant Bahn 16 2/3 Hz
30 Hz - 300 Hz	$1 \cdot 10^4 \text{ km} - 1 \cdot 10^3 \text{ km} / 10^7 \text{ m} - 10^6 \text{ m}$	SLF Super Low Frequency Theta, Alpha, Beta-Frequenzen	NF	Längstwellensender der US NAVY und ZEVS
300 Hz - 3 kHz	$10^3 \text{ km} - 100 \text{ km} / 10^6 \text{ m} - 10^5 \text{ m}$	ULF Ultra Low Frequency	NF	Sprachfrequenz Voice Frequency
3 kHz - 30 kHz	$100 \text{ km} - 10 \text{ km} / 10^5 \text{ m} - 10^4 \text{ m}$	VLF Very Low Frequency	NF	
30 kHz - 300 kHz	$10 \text{ km} - 1 \text{ km} / 10^4 \text{ m} - 10^3 \text{ m}$	LF Low Frequency	HF	Langwelle
300 kHz - 3 MHz	$1 \text{ km} - 100 \text{ m} / 10^3 \text{ m} - 10^2 \text{ m}$	MF Medium Frequency	HF	Mittelwelle
3 MHz -30 MHz	$100 \text{ m} - 10 \text{ m} / 10^2 \text{ m} - 10^1 \text{ m}$	HF High Frequency	HF	Kurzwelle
30 MHz -300 MHz	$10 \text{ m} - 1 \text{ m} / 10^1 \text{ m} - 1 \text{ m}$	VHF Very High Frequency	HF	Ultrakurzwelle
300 MHz -3 GHz	$1 \text{ m} - 10 \text{ cm} / 1 \text{ m} - 10^{-1} \text{ m}$	UHF Ultra High Frequency	HF	Mikrowelle
3 GHz -30 GHz	$10 \text{ cm} - 1 \text{ cm} / 10^{-1} \text{ m} - 10^{-2} \text{ m}$	SHF Super High Frequency	HF	cm-Welle
30 GHz -300 GHz	$1 \text{ cm} - 1 \text{ mm} / 10^{-2} \text{ m} - 10^{-3} \text{ m}$	EHF Extremely High Frequency	HF	mm-Welle
300 GHz – 300 THz	$10^{-3} \text{ m} - 10^{-6} \text{ m}$	Wärmestrahlung / Infrarot		tera
300 THz – 3 PHz	$10^{-6} \text{ m} - 10^{-7} \text{ m}$	Sichtbares Licht -UV-Strahlung		peta
3 PHz – 300 PHz	$10^{-7} \text{ m} - 10^{-9} \text{ m}$	UV-Strahlung		
300 PHz – 3 EHz	$10^{-9} \text{ m} - 10^{-11} \text{ m}$	Röntgen-Strahlung		exa
3 EHz – 300 EHz	$10^{-11} \text{ m} - 10^{-13} \text{ m}$	Radioaktive γ -Strahlung		eta Kernphysik
300 EHz -	$10^{-13} \text{ m} - 10^{-xx} \text{ m}$	kosmische Strahlung		Kernphysik

Größenverhältnisse vom Kristall bis zum Elektron bzw. Quark

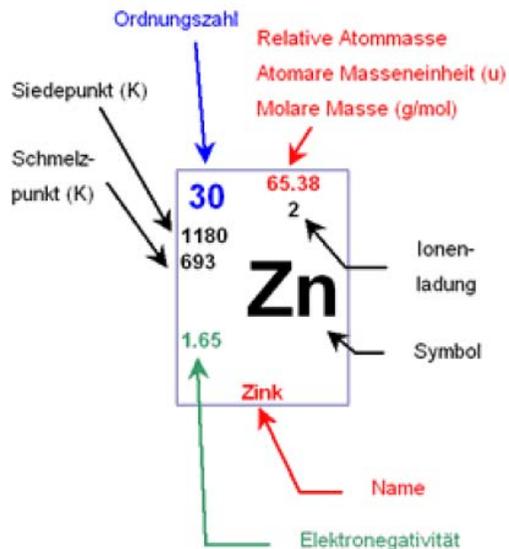


Atomgröße der Elemente

Die Größe eines Atoms ist auch von den Anziehungskräften abhängig. Je mehr Protonen sich im Kern befinden, umso größer ist die Anziehungskraft auf die Elektronen in der Hülle.



Innerhalb einer Periode nimmt der Atomradius von links nach rechts ab. In einer Periode nimmt die Protonenzahl stetig zu, die hinzukommenden Elektronen beginnen keine neuen Schalen. Dadurch wird die Anziehung auf die Elektronenhülle größer und es tritt eine Schrumpfung des Atomradius ein. (Der Kern ist so winzig, dass er keinen Einfluss auf die Atomgröße hat.) Innerhalb einer Gruppe nimmt der Atomradius von oben nach unten zu, da hier immer eine neue Schale hinzukommt. Bei Natrium bis Argon ist die Valenzschale die Nummer 3. 18 Elektronen passen dort maximal drauf, d.h. nach dem Argon muss zwangsläufig eine neue Schale besetzt werden.



Es wird zwischen Elementen und Elementarstoffen unterschieden. Im PSE sind die Symbole der Elemente aufgelistet.

- Die Ordnungszahl ist die Anzahl der Protonen, die sich im Atomkern befinden
- Die Atommasse entspricht grob der Summe von Protonen und Neutronen
- Ionenladung
- Elektronenaktivität
- Schmelzpunkt
- Siedepunkt

Periodensystem der Elemente (PDE) Kristallisation

Die aus „kugelförmigen“ Metallatomen aufgebauten Metalle kristallisieren in der Regel in der kubisch- bzw. hexagonal-dichtesten Kugelpackung. Ausnahme: raumzentrierte (kubisch-innenzentrierte) Kugelpackung (weniger dicht).

2	3 6,94	4 9,01											13 26,98
L	Li Lithium [He]2s ¹	Be Beryllium [He]2s ²	Nebengruppen (Übergangsmetalle)										Al Aluminium [Ne]3s ² 3p ¹
M	Na Natrium [Ne]3s ¹	Mg Magnesium [Ne]3s ²	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II			
4	19 39,10	20 40,08	21 44,96	22 47,90	23 50,94	24 52,00	Mn	26 55,85	27 58,93	28 58,71	29 63,55	30 65,38	
N	K Kalium [Ar]4s ¹	Ca Calcium [Ar]4s ²	Sc Scandium [Ar]3d ¹ 4s ²	Ti Titan [Ar]3d ² 4s ²	V Vanadium [Ar]3d ³ 4s ²	Cr Chrom [Ar]3d ⁵ 4s ¹		Fe Eisen [Ar]3d ⁶ 4s ²	Co Cobalt [Ar]3d ⁷ 4s ²	Ni Nickel [Ar]3d ⁸ 4s ²	Cu Kupfer [Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	Zn Zink [Ar]3d ¹⁰ 4s ²	
5	37 85,47	38 87,62	39 88,91	40 91,22	41 92,91	42 95,94	43 98,91	44 101,1	45 102,9	46 106,4	47 107,9	48 112,4	
O	Rb Rubidium [Kr]5s ¹	Sr Strontium [Kr]5s ²	Y Yttrium [Kr]4d ¹ 5s ²	Zr Zirkon [Kr]4d ² 5s ²	Nb Niob [Kr]4d ⁴ 5s ¹	Mo Molibdän [Kr]4d ⁵ 5s ¹	Tc Technetium [Kr]4d ⁵ 5s ¹	Ru Ruthenium [Kr]4d ⁷ 5s ¹	Rh Rhodium [Kr]4d ⁸ 5s ¹	Pd Palladium [Kr]4d ¹⁰	Ag Silber [Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	Cd Cadmium [Kr]4d ¹⁰ 5s ²	
6	55 132,9	56 137,3	57-71	72 178,5	73 180,9	74 183,9	75 186,2	76 190,2	77 192,2	78 195,1	79 197,0	81 204,4	82 207,2
P	Cs Caesium [Xe]6s ¹	Ba Barium [Xe]6s ²	Lantha- noide	Hf Hafnium [Xe]4f ¹⁴ 5d ²	Ta Tantal Xe 4f ¹⁴ 5d ³	W Wolfram [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴	Re Rhenium [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁵	Os Osmium [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁶	Ir Iridium [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁷	Pt Platin [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁹	Au Gold [Xe]4f ¹⁴	Tl Thallium [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰	Pb Blei [Xe]4f ¹⁴
				6s ²	6s ²	6s ²	6s ²	6s ²	6s ²	6s ¹	5d ¹⁰ 6s ¹	6s ² 6p ¹	5d ¹⁰ 6s ² 6p ²

	W-Typ
	Mg-Typ
	Cu-Typ

kubisch innenzentrierte Kugelpackung
 hexagonal dichteste Kugelpackung
 kubisch dichteste Kugelpackung

Hauptgruppe Periodensystem der Elemente														Hauptgruppen											
I		II		feste Elemente		Be		Metalle				III		IV		V		VI		VII		VIII			
1	1	1,008																				2	4,003		
K	H						Hg		Nichtmetalle													He			
		Wasserstoff					He		Halbmetalle														Helium		
		1s ¹					Tc		Übergangsmetalle														1s ²		
2	3	6,94	4	9,01	Ordnungszahl-Relative Atommasse	16	32,06	Alle anderen diamagnetisch					5	10,81	6	12,01	7	14,01	8	16,00	9	19,00	10	20,18	
L	Li		Be		Elementsymbol	S		paramagnetisch					Mn	B	C	N	O	F	Ne						
		Lithium	Beryllium			Schwefel		ferromagnetisch					Fe	Bor	Kohlenstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Fluor	Neon						
		[He]2s ¹	[He]2s ²		Elektronenkonfiguration	[Ne]3s ² 3p ⁴								[He]2s ² 2p ¹	[He]2s ² 2p ²	[He]2s ² 2p ³	[He]2s ² 2p ⁴	[He]2s ² 2p ⁵	[He]2s ² 2p ⁶						
3	11	22,99	12	24,31										13	26,98	14	28,09	15	30,97	16	32,06	17	35,45	18	39,95
M	Na		Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar						
		Natrium	Magnesium											Aluminium	Silicium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Argon						
		[Ne]3s ¹	[Ne]3s ²											[Ne]3s ² 3p ¹	[Ne]3s ² 3p ²	[Ne]3s ² 3p ³	[Ne]3s ² 3p ⁴	[Ne]3s ² 3p ⁵	[Ne]3s ² 3p ⁶						
4	19	39,10	20	40,08										21	44,96	22	47,90	23	50,94	24	52,00	25	54,94	26	55,85
N	K		Ca											III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II				
		Kalium	Calcium											Scandium	Titan	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Cobalt	Nickel	Kupfer	Zink		
		[Ar]4s ¹	[Ar]4s ²											[Ar]3d ¹ 4s ²	[Ar]3d ² 4s ²	[Ar]3d ³ 4s ²	[Ar]3d ⁴ 4s ¹	[Ar]3d ⁵ 4s ¹	[Ar]3d ⁶ 4s ²	[Ar]3d ⁷ 4s ²	[Ar]3d ⁸ 4s ²	[Ar]3d ⁹ 4s ¹	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²		
5	37	85,47	38	87,62										27	58,93	28	58,71	29	63,55	30	65,38				
O	Rb		Sr											29	63,55	30	65,38								
		Rubidium	Strontium											Yttrium	Zirconium	Niob	Molibdän	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silber	Cadmium		
		[Kr]5s ¹	[Kr]5s ²											[Kr]4d ¹ 5s ²	[Kr]4d ² 5s ²	[Kr]4d ³ 5s ¹	[Kr]4d ⁴ 5s ¹	[Kr]4d ⁵ 5s ¹	[Kr]4d ⁶ 5s ¹	[Kr]4d ⁷ 5s ¹	[Kr]4d ⁸ 5s ¹	[Kr]4d ⁹ 5s ¹	[Kr]4d ¹⁰ 5s ²		
6	55	132,9	56	137,3										31	69,72	32	72,59	33	74,92	34	78,96	35	79,90	36	83,80
P	Cs		Ba											III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II				
		Caesium	Barium											Scandium	Titan	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Cobalt	Nickel	Kupfer	Zink		
		[Xe]6s ¹	[Xe]6s ²											[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p							
7	87	(223)	88	226,0										49	114,8	50	118,7	51	121,8	52	127,6	53	126,9	54	131,3
Q	Fr		Ra											49	114,8	50	118,7	51	121,8	52	127,6	53	126,9	54	131,3
		Francium	Radium											Indium	Zinn	Antimon	Tellur	Iod	Xenon						
		[Rn]7s ¹	[Rn]7s ²											[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶						
8	111		112											81	204,4	82	207,2	83	209,0	84	(209)	85	(210)	86	(222)
														81	204,4	82	207,2	83	209,0	84	(209)	85	(210)	86	(222)
														Thallium	Blei	Bismut	Polonium	Astat	Radon						
														[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶						

Sämtliche uns umgebende Materie besteht aus Atomen.

- Jedes Atom besteht aus einem Atomkern und einer Elektronenhülle.
- Jeder Atomkern enthält positiv geladene Protonen (mindestens eines und derzeit bekannt bis 118), die Anzahl der Protonen wird als „Kernladungszahl“ bezeichnet und dient als Ordnungszahl (OZ) für die betreffende Atomsorte.
- Bei mehr als einem Proton ist ein Neutron im Atomkern vorhanden.
- Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks (Quarksee), die wiederum durch Energien (Gluonen) zusammengehalten werden, diese werden wiederum unterteilt?
- Jeder Atomkern ist von einer Elektronenhülle umgeben. Wenn diese Hülle genau so viele (negativ geladene) Elektronen enthält, wie im zugehörigen Kern Protonen vorhanden sind, befindet sich das Atom im „elektrisch neutralen“ Zustand, da die einander entgegen gesetzten elektrischen Ladungen von Proton und Elektron gleich groß sind.
- Das „Periodensystem“ bezieht sich nur auf Atome in diesem elektrisch neutralen Zustand. Nach diesem System können Elektronen sich im Atom nur auf solchen Bahnen befinden, die bestimmte Abstände vom Atomkern haben; für solche zu einem Abstand gehörigen Bahnen wird auch der Begriff Schale benutzt.
- Diese Schalenbelegung ist nicht identisch mit der Elektronenbelegung der Orbitale

Auch ist zu bedenken: es handelt sich hier um ein Modell, das allerdings mathematisch durch die Gesetze der Quantenmechanik nachvollziehbar ist.

Neue Erkenntnisse in der Atomphysik können allerdings jederzeit zu einer Modeländerung führen!

Erklärung des Periodensystems (Schalen)

- Jede dieser Schalen bietet nur für eine ganz bestimmte Anzahl Elektronen Platz:
- In die innerste Schale passen nur zwei Elektronen, also gibt es auch nur zwei chemische Elemente, die nur diese innerste Elektronenschale haben, das sind die mit den ersten beiden Ordnungszahlen: 1 (Wasserstoff) und 2 (Helium). Sie bilden deshalb in der Darstellung des Periodensystems die oberste Reihe.
- Bei dem nächstfolgenden Atom mit drei Protonen und folglich drei Elektronen befindet sich das dritte Elektron einzeln in einer weiter außen liegenden Elektronenschale (Lithium mit der Ordnungszahl 3). Diese nächste Schale hat Platz für

maximal acht Elektronen. Diesem Aufbau entsprechend werden diese acht Elemente (mit insgesamt drei bis zehn Elektronen) im Periodensystem als nächste Reihe dargestellt. Bei der Ordnungszahl 11 (Natrium) wird eine weitere Elektronenschale angefangen und mit einem Elektron besetzt, hier ist wiederum für maximal acht Elektronen Platz; somit bilden die Elemente bis zur Ordnungszahl 18 (Argon) auch die nächstfolgende Reihe (Zeile) bei der Darstellung im Periodensystem.

- Betrachtet man nur die Elektronen der jeweils äußersten Schale, so spricht man von den Außenelektronen; in der innersten Schale gibt es ein oder zwei, in den nächsten beiden ein bis acht Außenelektronen. Vergleicht man nun die Stoffeigenschaften von Elementen mit der gleichen Anzahl Außenelektronen (oder deren chemischen Verbindungen mit jeweils einem beliebigen anderen Element), so finden sich viele Übereinstimmungen, die genau darauf beruhen, dass es sich um Elemente mit der gleichen Anzahl von Außenelektronen handelt. So sind z. B. die Elemente mit nur dem ersten von acht Außenelektronen Alkalimetalle, die Elemente mit sieben Außenelektronen Halogene und die mit voll aufgefüllten Elektronenschalen Edelgase. Die Außenelektronen bestimmen also im Wesentlichen die chemischen Eigenschaften und die wiederholen sich periodisch, was zur Darstellung der Elemente in Reihen und ihrer Benennung mit dem Begriff Periode geführt hat. Die einander ähnlichen Elemente stehen somit im Periodensystem untereinander und bilden jeweils eine Gruppe; das gilt auch für die jeweils darunter stehenden weiteren Elemente; bei den bisher besprochenen Spalten handelt sich um die Hauptgruppen.
- Diese Systematik des Aufbaus wird in den höheren Perioden unterbrochen. In den nächsten beiden Perioden bilden zwar auch zunächst die ersten beiden Elektronen eine neue äußere Schale; bevor dort jedoch das dritte bis achte Elektron hinzu kommt, wird zunächst eine darunter liegende neue Elektronenschale mit zehn Plätzen gebildet und aufgefüllt (OZ 21 bis 30 und 39 bis 48); hier untereinander stehende Elemente werden Nebengruppen genannt.
- In den dann folgenden beiden Perioden entsteht sogar zunächst eine noch tiefer liegende (drittäußerste) Schale mit 14 Plätzen (OZ 57 bis 71 und 89 bis 103); der Einbau der jeweils zusätzlichen Elektronen in so tief liegende Schalen führt – erwartungsgemäß - dazu, dass diese Elemente auch untereinander sehr ähnlich sind.

Die Anordnung der Atome im Periodensystem ist somit vollständig durch die Elektronenkonfiguration erklärbar.

Anhang Tabellen

Vorsatz	Zeich	Potenz	in Ziffern	in Buchstaben	USA
Atto	a	10^{-18}	0,000 000 000 000 000 001	Trillionstel	
Femto	f	10^{-15}	0,000 000 000 000 001	Billiardstel	
Piko	p	10^{-12}	0,000 000 000 001	Billionstel	
Nano	n	10^{-9}	0,000 000 001	Milliardstel	
Mikro	m	10^{-6}	0,000 001	Millionstel	
Milli	m	10^{-3}	0,001	Tausendstel	
Zenti	c	10^{-2}	0,01	Hundertstel	
Dezi	d	10^{-1}	0,1	Zehntel	
Deka	da	10^1	10	Zehn	
Hekto	h	10^2	100	Hundert	
Kilo	k	10^3	1000	Tausend	
Mega	M	10^6	1 000 000	Million	
Giga	G	10^9	1 000 000 000	Milliarde	Billion
Tera	T	10^{12}	1 000 000 000 000	Billion	Trillion
Peta	P	10^{15}	1 000 000 000 000 000	Billiarde	
Exa	E	10^{18}	1 000 000 000 000 000 000	Trillion	

Universelle Konstanten aus der Physik

Bezeichnung der Konstanten	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
Atomare Masseneinheit	u	$1,660531 \times 10^{-27}$	kg
Bohrscher Bahnradius des Wasserstoffatoms	r	$52,92 \times 10^{-12}$	m
Elektronenradius (klassisch)	r_e	$2,817939 \times 10^{-15}$	m
Ruhemasse des Elektrons	m_e	$0,9109558 \times 10^{-30}$	kg
Ruhemasse des H-Atoms	m_H	$1,6734 \times 10^{-27}$	kg
Ruhemasse des Deuterons	m_D	$3,3429 \times 10^{-27}$	kg
Ruhemasse des Protons	m_p	$1,6726485 \times 10^{-27}$	kg
Ruhemasse des Neutrons	m_N	$1,6749543 \times 10^{-27}$	kg
Ruheenergie des Elektrons	$(W_e)_o$	$0,511 \times 10^6$	eV
Ruheenergie des Protons	$(W_p)_o$	$0,938 \times 10^9$	eV
spezifische Ladung des Protons	e/m_p	$95,7929 \times 10^6$	C/kg; As/kg
spezifische Ladung des Elektrons	e/m_e	$0,175888 \times 10^{12}$	C/kg; As/kg
Absolute Dielektrizitätskonstante (Vakuum)	ϵ_0	$8,85418743 \times 10^{-12}$	F/m; Vs/Am
magnetische Feldkonstante, absolute	m_0	$1,256637061 \times 10^{-6}$	H/m; Vs/Am
Induktionskonstante (Vakuum)		$= 4 \times \pi \times 10^{-7}$	
Lichtgeschwindigkeit	c_0	$0,299792458 \times 10^9$	m/s
Wellenwiderstand des leeren Raumes (Vakuum)	Z_0	$\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376,7304$	W
Schallgeschwindigkeit (Luft)	v	331,45	m/s

elektrische Elementarladung	e	$0,160221917 \times 10^{-18}$	C
Faraday-Konstante	F	$96,48670 \times 10^3$	C/mol; As/mol
Boltzmann-Konstante	k	$13,80662 \times 10^{-24}$	J/K
Stefan-Boltzmann-Konstante	s	$56,6961 \times 10^{-9}$	W/(K ⁴ m ²)
Compton-Wellenlänge des Elektrons	l_c	$2,4263096 \times 10^{-12}$	m
Rydberd-Frequenz	R_y	$3,2899 \times 10^{-15}$	1/s
Absoluter Nullpunkt der thermodynamischen Temperatur	t_0	- 273,15	° C
Avogadro-Konstante	N_A	$602,205 \times 10^{21}$	1/mol
Avogadrosche Zahl	$1/V_0$	$26,872 \times 10^{18}$	1/cm ³
Fallbeschleunigung	g	9,80665	m/s ² ; N/kg
Gravitationskonstante	G	$66,732 \times 10^{-12}$	Nm ² /kg ²
Loschmidt-Konstante	N_L	$26,86754 \times 10^{24}$	1/m ³
Loschmidtsche Zahl	L	$0,60249 \times 10^{24}$	Moleküle/mol
Molvolumen idealer Gase	V_0	22,41383	m ³ /(K mol)
Planksches Wirkungsquantum	h	$0,6626196 \times 10^{-33}$	J × s
Universelle Gaskonstante	R	8,31434	J/(mol K)
Jahr, tropisches	a	$31,556926 \times 10^6$	s

Umrechnung von Temperatureinheiten

Eine in Großbritannien und der USA übliche Temperatureinheit ist das Grad Rankine (° R). Sie steht im gleichen Verhältnis zum Grad Fahrenheit, wie das Kelvin zum Grad Celsius. Daher gilt:

Absoluter Nullpunkt:	-273,2 °C	-218,6 °R	0 °K	479,7 °F
Trippelpunkt des Wassers:	0 °C	0 °R	273,2 °K	32 °F
Dampfpunkt:	100 °C	80 °R	373,2 °K	212 °F

Temperaturskalen

°C = Grad Celsius ist bekannt in Mitteleuropa

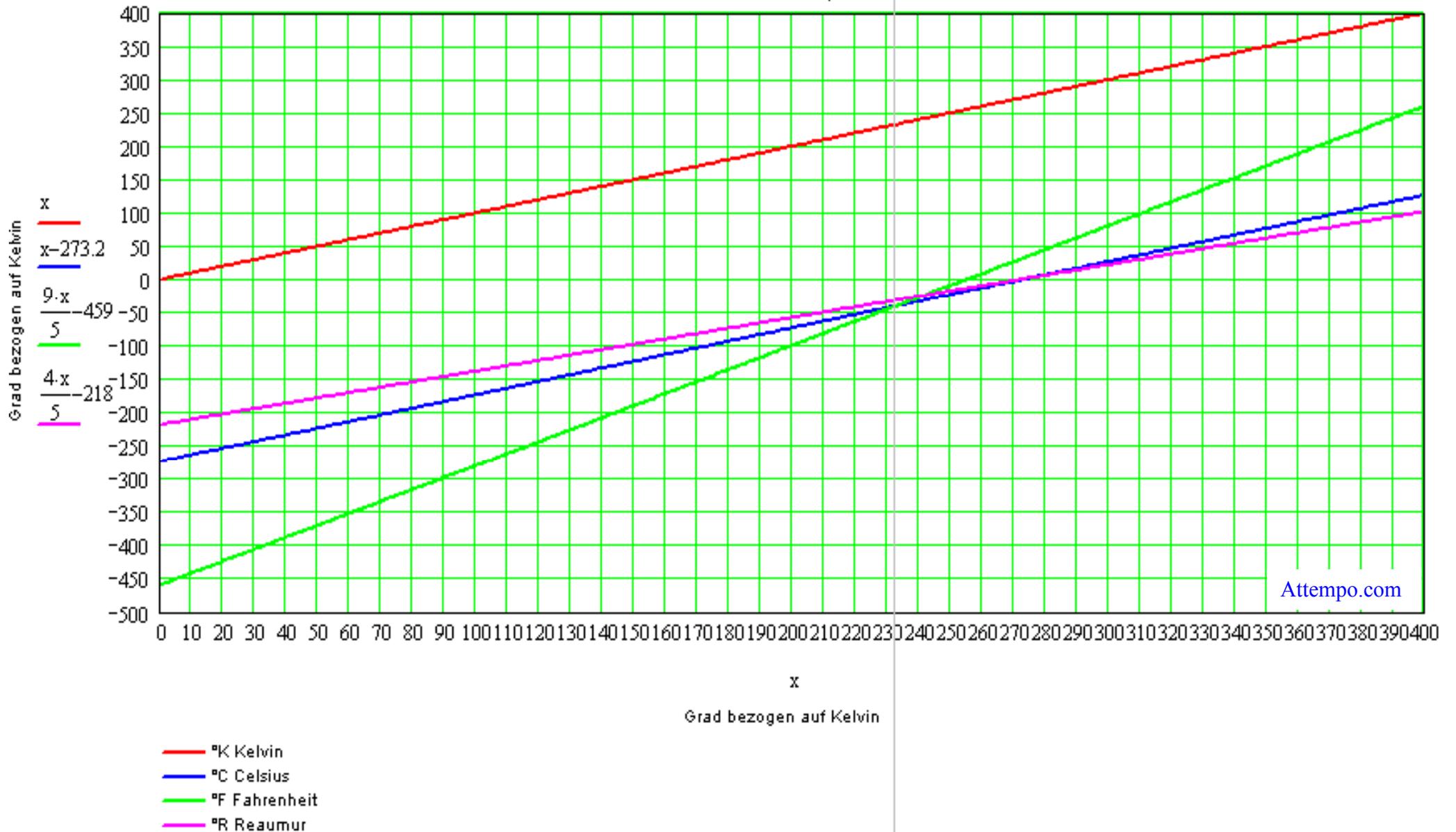
°R = Grad Reaumur ist gebräuchlich in England

°F = Grad Fahrenheit ist gebräuchlich in USA

°K = Grad Kelvin ist gebräuchlich in der Physik und den Naturwissenschaften

	C	F	K	R
C	1	$F := 9 \cdot \frac{C}{5} + 32$	$K := C + 273.2$	$R := \frac{4}{5} \cdot C$
F	$C := \frac{5 \cdot (F - 32)}{9}$	1	$K := \frac{5 \cdot F}{9} + 255.4$	$R := \frac{4 - (F - 32)}{9}$
K	$C := K - 273.2$	$F := \frac{9K}{5} - 459.7$	1	$R := \frac{4 \cdot K}{5} - 218.5$
R	$C := 5 \cdot \frac{R}{4}$	$F := \frac{9 \cdot R}{4} + 32$	$K := \frac{5 \cdot R}{4} + 273.2$	1

Unterschiedliche Temperaturskalen



Abkürzungen

A	magnetische Fläche bzw. Spulenquerschnitt	[mm ² ; cm ² , m ² , inch ²]
A _e	effektiver magnetischer Querschnitt	[mm ² , cm ² , m ² , inch ²]
A _L	Induktivitätsfaktor, AL = L/N ²	[nH, Vs/A x 10 ⁻⁹]
A _{L1}	Mindestinduktivitätswert bei vorgegebener Aussteuerung B = Applikationsabhängig, aber Standard ist Sinus	[nH, Vs/A x 10 ⁻⁹]
A _{min}	Minimaler Kernquerschnitt	[mm ² ; cm ² , m ² , inch ²]
A _N	Wickelquerschnitt	[mm ² ; cm ² , m ² , inch ²]
A _R	Widerstandsfaktor, AR = Rcu/N ²	[μΩ, 10 ⁻⁶ Ω]
a	Dämpfung	[Verhältnis; dB]
a	Beschleunigung	[m/ s ²]
α	Temperaturbeiwert TK	[1/K]
α _F	bezogener Temperaturbeiwert des Werkstoffs	[1/K]
α _E	Temperaturbeiwert der effektiven Permeabilität	[1/K]
B	Stromverstärkung	[Verhältnis; dB]
B	Bandbreite	[Hz]
B	magnetische Flussdichte / magnetische Induktion 1 T (Tesla) = 1 Vs/m ² = 10 ⁻⁴ Vs/cm ² = 10 ⁴ G 1 G (Gauss) = 100 μT = 10 ⁻⁸ Vs/cm ²	[T, Vs/m ² ; Vs/cm ²] [T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
ΔB	delta	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B [^]	Scheitelwert der magn. Flussdichte, Induktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
ΔB [^]	Scheitelwert der Hubs der Flussdichte, Induktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B ₋	Gleichfeldflussdichte, Gleichstrommagnetisierung	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B _R	Remanente Flussdichte, Induktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B _S	Sättigungsmagnetisierung, Sättigungsinduktion	[T (Tesla), mT, Vs/m ² , G(Gauss)]
B	Blindleitwert	[S; A/V; 1/Ω]
B _C	kapazitiver Blindleitwert	[S; A/V; 1/Ω]
B _L	induktiver Blindleitwert	[S, A/V; 1/Ω]

C_0	Wicklungskapazität	[F, As/V]
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 2,99792458 * 10^8$ [m/s]	[m/s]
CDF	Klirrfaktor	
D	elektrische Flussdichte, Verschiebungsdichte	[C/m ² (Coulomb)]
DF	Desakkommodationsbeiwert $DF=d/\mu_i$	
e	Elektrische Elementarladung; $e = 1,6021892 * 10^{-19}$	[As]
E	Elektrische Feldstärke	[V/m]
E_a	Aktivierungsenergie	[J, Ws, VAs]
ET	Feldstärke in Oe, Angabe in amerikanischen Unterlagen	[Oe, 79,58 A/m]
ET100	Feldstärke in Oe bei einer Induktion von 100 Gauss bzw. 10mT	[Oe, 79,58 A/m]
ϵ_0	absolute Dielektrizitätszahl im Vakuum $8,85418782 * 10^{-12}$ F/m	[F/m; As/Vm]
$\bar{\epsilon} \quad \epsilon' \quad \epsilon''$	komplexe Dielektrizitätskonstante, Real- und Imaginärteil	
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante	
\vec{F}	Kraft zwischen zwei parallelen Leitern	[N; kg*m/s ²]
F	Kraft auf einen Leiter im homogenen Magnetfeld	[N; kg*m/s ²]
F	Faraday-Konstante, $F = 9,648456 * 10^4$	[C/mol]
F_{Cu}	Kupferfüllfaktor	
f	Frequenz	[Hz, 1/s]
f_0, f_R	Resonanzfrequenz	[Hz, 1/s]
f_{grenz}	Grenzfrequenz	
$f_{max}, f_{gro}, f_{go}, f_o$	obere Grenzfrequenz	[Hz, 1/s]
$f_{min}, f_{gru}, f_{gu}, f_u$	untere Grenzfrequenz	[Hz, 1/s]
G Gauss	Magnetische Flussdichte, Induktion 1 Gauss = 10^{-4} T = $10^{-4} \cdot Vs/m^2$	[Gauss, $10^{-4} \cdot Vs/m^2$, T· 10^{-4}]
G	Ohm'scher Leitwert, elektrischer Leitwert, Wirkleitwert	[S; A/V; 1/Ω]
g	Luftspalt	[mm, inch]
η eta	Wirkungsgrad eines Trafos	

η_B	eta	Hystereseematerialkonstante	[1/mT, 1/10G]
η_i	eta	Hysterekernkonstante	[A ⁻¹ H ^{-1/2}]
H		magnetische Feldstärke 1 A/m = 10 ² A/cm, 1 Oe = (1/0,4 · π) · 10 ² = 79,554 A/m 1 A/m = 0,4 · π · 10 ⁻² = 0,01257 Oe	[A/m, A/cm, Oe]
H [^]		Scheitelwert der magn. Feldstärke	[A/m, A/cm, Oe]
H ₋		Gleichfeldstärke Gleichstrommagnetisierung	[A/m, A/cm, Oe]
H _C		Koerzitivfeldstärke	[A/m, A/cm, Oe]
h		Hysteresebeiwert des Materials	[10 ⁻⁶ cm/A]
h/μ _i ²		bezogener Hysteresebeiwert	[10 ⁻⁶ cm/A]
Θ	theta	Durchflutung	[A]
I		Stromstärke	[A]
I ₋		Gleichstromanteil	[A]
I [^]		Scheitelwert des Stromes	[A]
J		Polarisation	[Vs/m ² , T (Tesla)]
J, S		elektrische Stromdichte	[A/m ² , A/mm ² · 10 ⁻⁶]
K	Kelvin	thermodynamische Temperatur Absoluter Nullpunkt 0 K = -273,16 °C	[K]
k		Bolzmannkonstante, k = 1,380662 * 10 ⁻²³	[J/K; Ws/K]
k		Gesamtklirrfaktor	
k ₁		Grundschiwingung, Grundwelle	
k ₂ ; k ₃ ... k _n		Teilkirrfaktoren, x. Harmonische k bzw. k ₁ = Grundwelle, k ₂ , k ₃ ... = Oberwellen	
L		Induktivität (frequenzabhängig)	[H, Vs/A, Ωs, Wb/A]
ΔL/L		relative Änderung der Induktivität	
L ₀		Induktivität der Spule ohne Kern	[H, Vs/A, Ωs]
L _H		Hauptinduktivität	[H, Vs/A, Ωs]
L _p		Primärinduktivität, Hauptinduktivität	[H, Vs/A, Ωs]
L _p		Parallelinduktivität	[H, Vs/A, Ωs]

L_{rev}		reversible Induktivität	[H, Vs/A, Ω s]
L_s		Streuinduktivität	[H, Vs/A, Ω s]
L_s		Serieninduktivität	[H, Vs/A, Ω s]
l_e		effektive magn. Weglänge, wirksame Feldlinienlänge	[m, cm, mm, inch]
l_N		mittlere Windungslänge	[m, cm, mm, inch]
Lw/DC		Induktivität mit Gleichstrombelastung	[H, Vs/A, Ω s]
Lw/oDC		Induktivität ohne Gleichstrombelastung	[H, Vs/A, Ω s]
Λ	lamda	magnetischer Leitwert	[1/H, A/V, 1/ Ω s]
λ, λ_0	lamda	Wellenlänge, Vakuumwellenlänge Bezogen auf Lichtgeschwindigkeit c/f	[m]
λ_S	lamda	Magnetostriktion bei Sättigungsmagnetisierung	
μ	my	relative komplexe Permeabilität	
μ_0	my	Magnetische Feldkonstante, Induktionskonstante $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,25663706 \cdot 10^{-6}$	[Vs/Am; T·m/A; Vs/Am] [Vs/Acm·10 ² , H/m]
μ_{app}		relative wirksame Permeabilität	
μ_a		relative Anfangspermeabilität	
μ_i		relative Anfangspermeabilität	
μ_e		relative effektive Permeabilität	
μ'_p		relativer Real-(Induktivitäts-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ''_p		relativer Imaginär-(Verlust-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ_r		relative Permeabilität – Faktor	
μ_{rev}		relative reversible Permeabilität	
μ'_s		relativer Real-(Induktivitäts-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ''_s		relativer Imaginär-(Verlust-)Anteil von $\bar{\mu}$	
μ_p, μ_n		Beweglichkeit von Ladungsträgern	[cm ² /Vs]
μ_{tot}		relative totale Permeabilität abgeleitet aus der statischen B/H.Magnetisierungskurve	

N		Windungszahl	
η	eta	Wirkungsgrad $\eta = P_a / P_i$	
η_B	eta	Hysteresematerialkonstante	[$10^{-6}/mT$]
P		Leistung	[W, VA, J/s, Nm/s]
P_{Cu}		Kupferverlustleistung	[W, VA, J/s, Nm/s]
P_{trans}		übertragbare Leistung	[W, VA, J/s, Nm/s]
PF		Leistungsfaktor	
P_V		Kernverlustleistung	[W/g, mW/g]
ρ		spezifischer Gleichstromwiderstand	
Oe	Oersted	Feldstärke in Oersted	[Oe, A/m]
		$1 \text{ Oe} = 79,58 \text{ A/m} = (1/0,4 \cdot \pi) \cdot 10^2$	
Q		Güte, Gütefaktor ($Q = \omega L / R_s = 1 / \tan \delta_L$)	
Q		Ladung im elektrischen Feld	[As, C Coulomb]
Q		Wärmemenge	[J, Nm, Ws]
Φ	phi	magnetischer Fluss	[Vs, W(Weber)]
σ	sigma	Dichte, Richtwerte zumeist für Kernmaterial	[g/cm^3 ; kg/m^3]
R		Widerstand	[Ω , V/A]
R_{Cu}		Kupferwiderstand (DC; $f = 0$)	[Ω]
		$R_{Cu} \text{ mm}^2/m = 0,01724 \text{ } \Omega \text{ bei } 20^\circ\text{C}$	
R_h		Hysterese-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
ΔR_h		Änderung von R_h Hysterese-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
R_i		Innenwiderstand	[Ω]
R_P		Parallel-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
R_P		Parallelwiderstand allgemein	[Ω]
R_S		Serien-Verlustwiderstand eines Kerns	[Ω]
R_S		Serienwiderstand allgemein	[Ω]
		(Stromquelle, Spannungsquelle, Generator)	
R_{th}		thermischer Widerstand	[K/W, K/VA]

R_V		effektiver Verlustwiderstand einer Spule	[Ω]
S		Stromdichte	[A/m ²]
s		Luftspalt	[mm]
$\Sigma I/A$		magnetischer Formfaktor	[1/mm]
T	Tesla	Magnetische Flussdichte, Induktion 1 T = 10 ⁴ Gauss, 1 Gauss = 10 ⁻⁴ Vs/m ² = 10 ⁻⁴ T	[T, Vs/m ² , Gauss · 10 ⁴]
ΔT		Temperaturdifferenz, °C ist proportional zu °K	[K]
T_C		Curietemperatur	[°C , K , R]
t		Zeit	[s]
t_V		Tastverhältnis	
$\tan \delta$	delta	Verlustfaktor	
$\tan \delta_e$			bezogener Verlustfaktor
$\tan \delta_h$		Hysteresse-Verlustfaktor	
$\tan \delta_L$		Verlustfaktor der Spule	
$\tan \delta_r$		(Rest-)Verlustfaktor bei H -> 0	
$\tan \delta/\mu_i$		bezogener Verlustfaktor des Materials bei H -> 0	
τ		Zeitkonstante	[s]
τ_{Cu}		Gleichstrom Zeitkonstante $\tau_{Cu} = L/R_{Cu} = A_L/A_R$	[s]
U		Effektivwert der elektrischen Spannung	[V, RI, W/A]
U [^]		Scheitelwert der Spannung	[V]
v		Geschwindigkeit 1 m/s = 3,6 km/h, 100 km/h ≈ 28 m/s	[m/s, km/h]
V_e		effektives magnetisches Volumen	[mm ³ , cm ³ , m ³]
W		Energie, Arbeit	[J, Nm, Ws]
X		Blindwiderstand	[Ω]
Z		komplexer Scheinwiderstand, komplexe Impedanz	[Ω]
Z		Betrag des Scheinwiderstandes	[Ω]

Z_0	Innenwiderstand einer Messspannungsquelle	[Ω]
Z_E	Abschlusswiderstand des Messempfängers	[Ω]
Z_n	spezifischer Widerstand $ Z _n = Z /N^2 \times \varepsilon(l_e/A_e)$	[Ω/mm]
ω omega	Kreisfrequenz; $2 \times \pi \times f$	[s^{-1}]