

**attempo**

# Einfache Physikalische Betrachtung des Magnetismus

Grundlagen, Anwendungsbereiche, Hintergründe und Historie

## Attempo

induktive Bauteile,  
Testhaus

Steinbruchstr. 15  
72108 Rottenburg

Tel.: +49 (0) 7472 9623 90  
Fax: +49 (0) 7472 9623 92

eMail: [info@attempo.com](mailto:info@attempo.com)  
[www.attempo.com](http://www.attempo.com)



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

Version 1.0

16.06.09

## Einführung

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

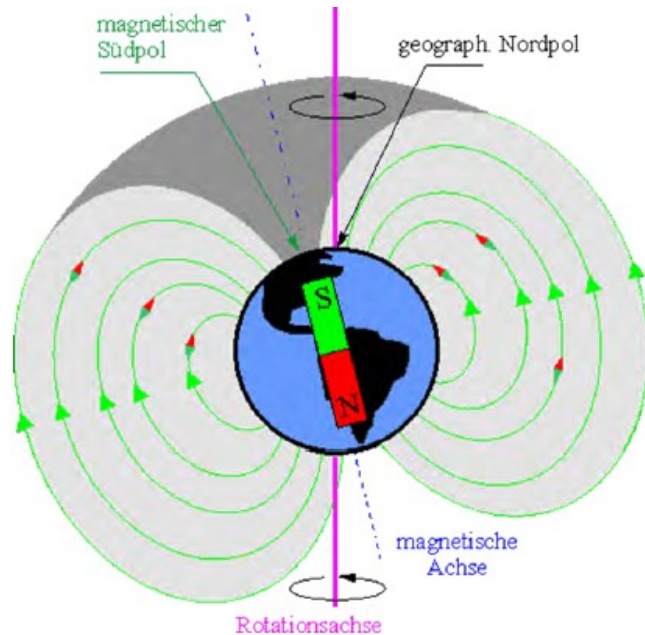
## **Wenn Energie bewegt wird, wird ein Magnetfeld erzeugt**

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

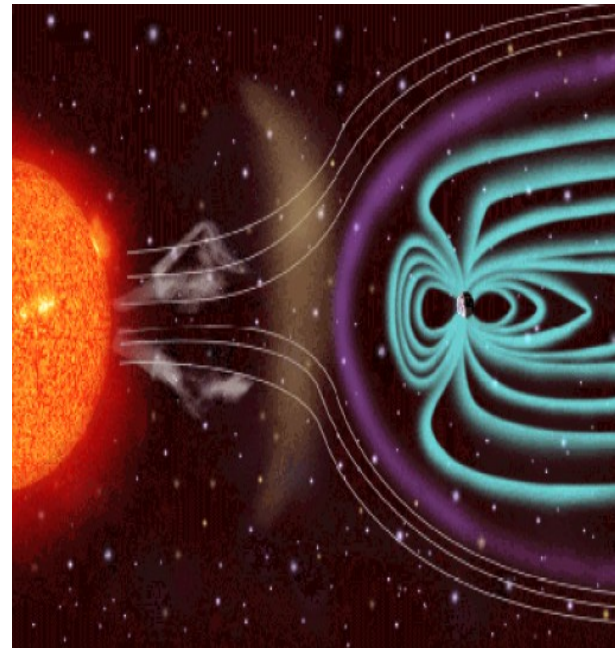
## Was ist Magnetismus

(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.



Erdmagnetfeld



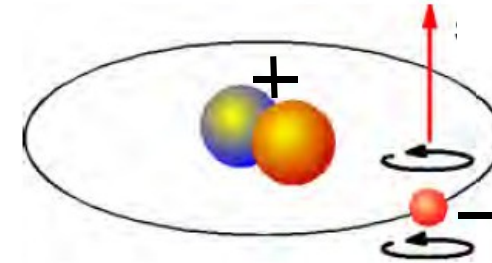
Ablenkung der Sonnenwinde (Protonen, Elektronen und Heliumkerne u.a.) durch das Erdmagnetfeld



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.



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

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

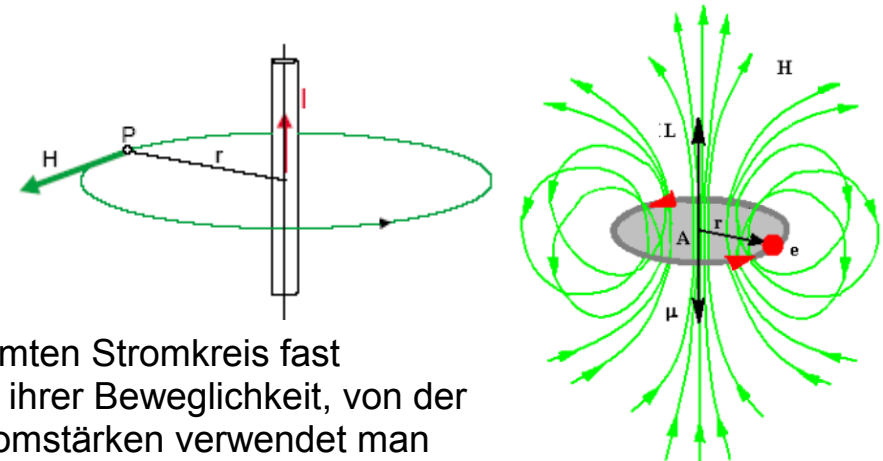
## Magnetfeld einer bewegten Ladung durch Stromfluss

Um eine bewegte elektrische Ladung ( elektrischer Strom ) herrscht ein

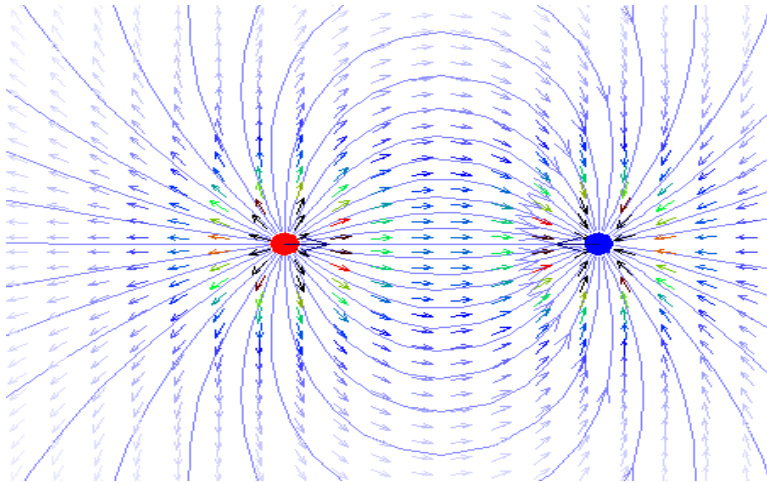
Raumzustand, der als **magnetisches Feld** bezeichnet wird. Bewegte Ladungen ( Ströme ) und Magnete erfahren in einem sie umgebenden Magnetfeld eine Kraftwirkung. In stromleitenden Materialien besteht der elektrische Strom aus der gerichteten Fortbewegung der freien Elektronen. Im Atomverband kommen 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 =  $6 \times 10^{18}$  Elektronenladungen/s.

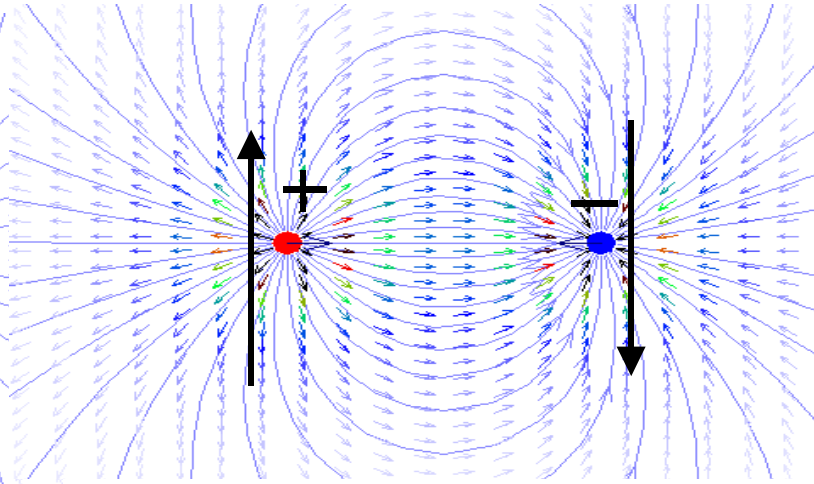
Mit Hilfe entsprechender Methoden hat man herausgefunden, dass der Betrag H der magnetischen Feldstärke bei jedem beliebigen Leiter proportional der Stromstärke I und im Falle des langen geraden Leiters umgekehrt proportional zum Abstand r vom Leiter ist. Für die Richtung der Feldlinien hat man verabredet,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



**Das statische elektrische Feld**



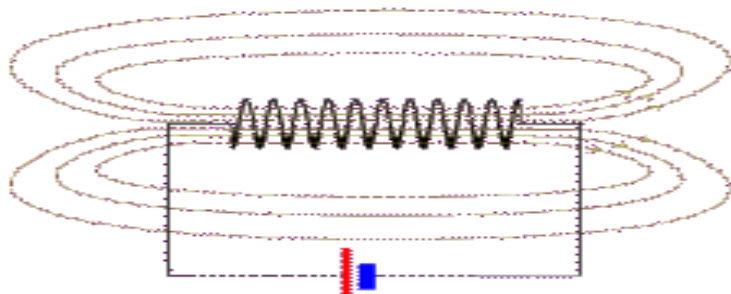
**Das magnetische Feld**



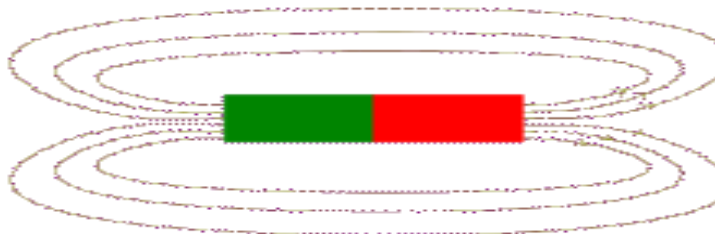
Wenn die zwei Pole gegeneinander bewegt werden entsteht ein magnetisches Wechselfeld durch aufgewendete Bewegungsenergie.

**Energieerhaltungssatz:  
Nichts geht verloren!**

**Gleichbedeutende Magnetfelder  
Mit Gleichstrom durchflossene Spule**



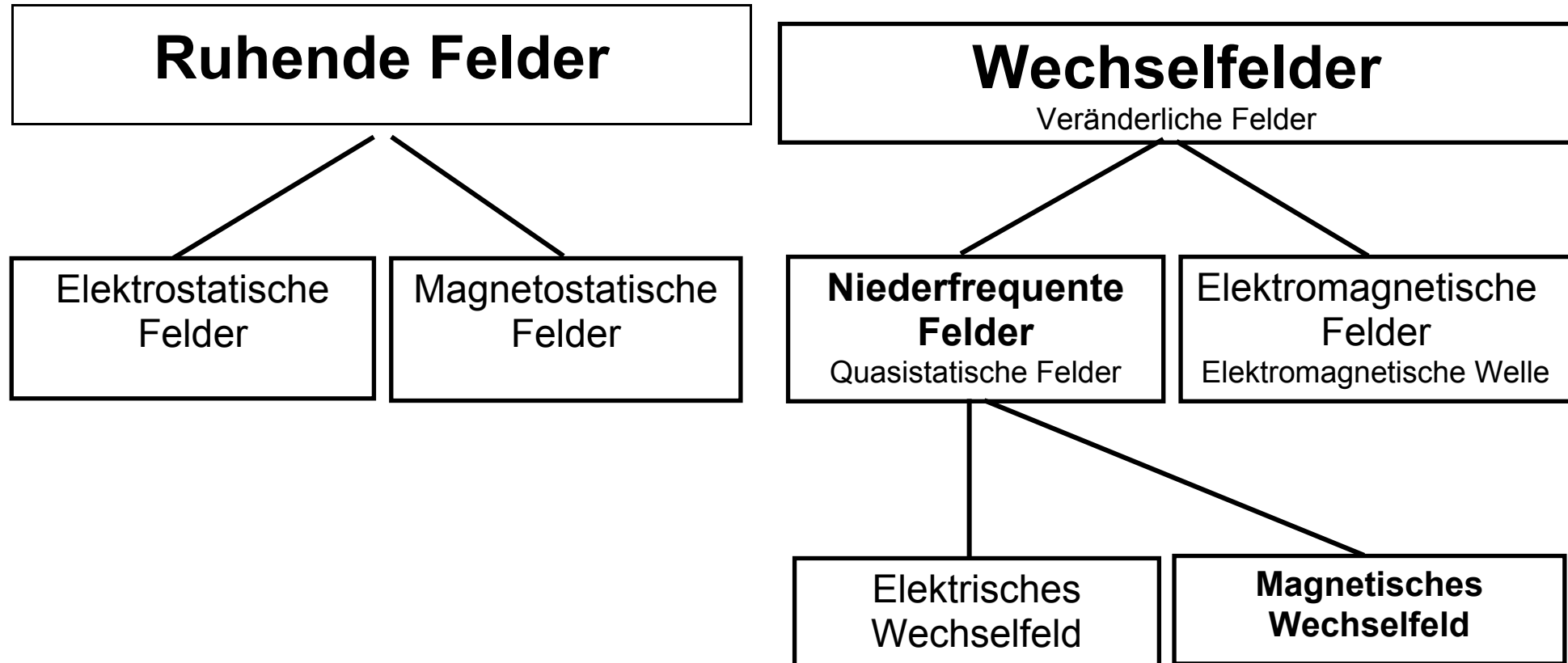
**Dipol durch die Vorgeschichte des Materials magnetisiert**



**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

**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. Bei der elektromagnetischen Welle sind beide Felder über  $377\Omega$  (Fernfeld  $>3\lambda$ ) miteinander verkoppelt

## **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, Haftsyste, 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** (Hilfsmittel 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.

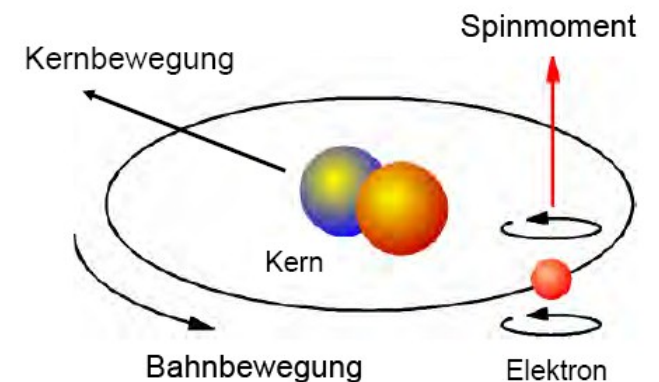
**Jedes Atom hat 3 unterschiedliche Magnetmomente:**

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

**Größenvergleich**

$\mu = 1,410 \cdot 10^{-26}$
$\mu = 0,966 \cdot 10^{-26}$
$\mu = 4,490 \cdot 10^{-26}$
$\mu = 9,285 \cdot 10^{-24}$

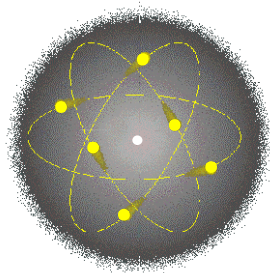
magnetische Momente



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

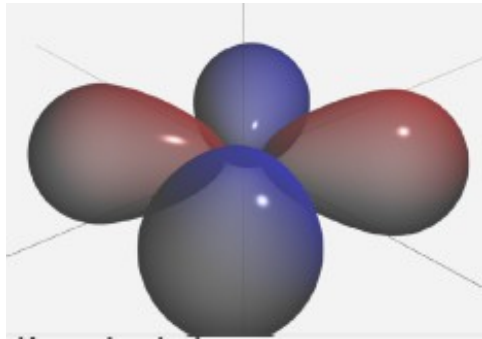
(NMR, „Nuclear Magnetic Resonance“ = kernmagnetische Resonanz), und auch praktisch anwenden (z. B. Kernspintomografie).

## Elektronenspin



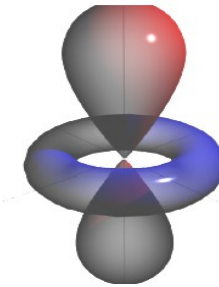
Bohr'sches Atommodell(veraltet)

## 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 $l$ ( $l=0(s), l=1(p), l=2(d), l=3(f)$ ) | beschreibt die elliptik/Form des Orbitals  |
| 3. Magnetquantenzahl $m$ ( $-l$ bis $+l$ )                        | 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

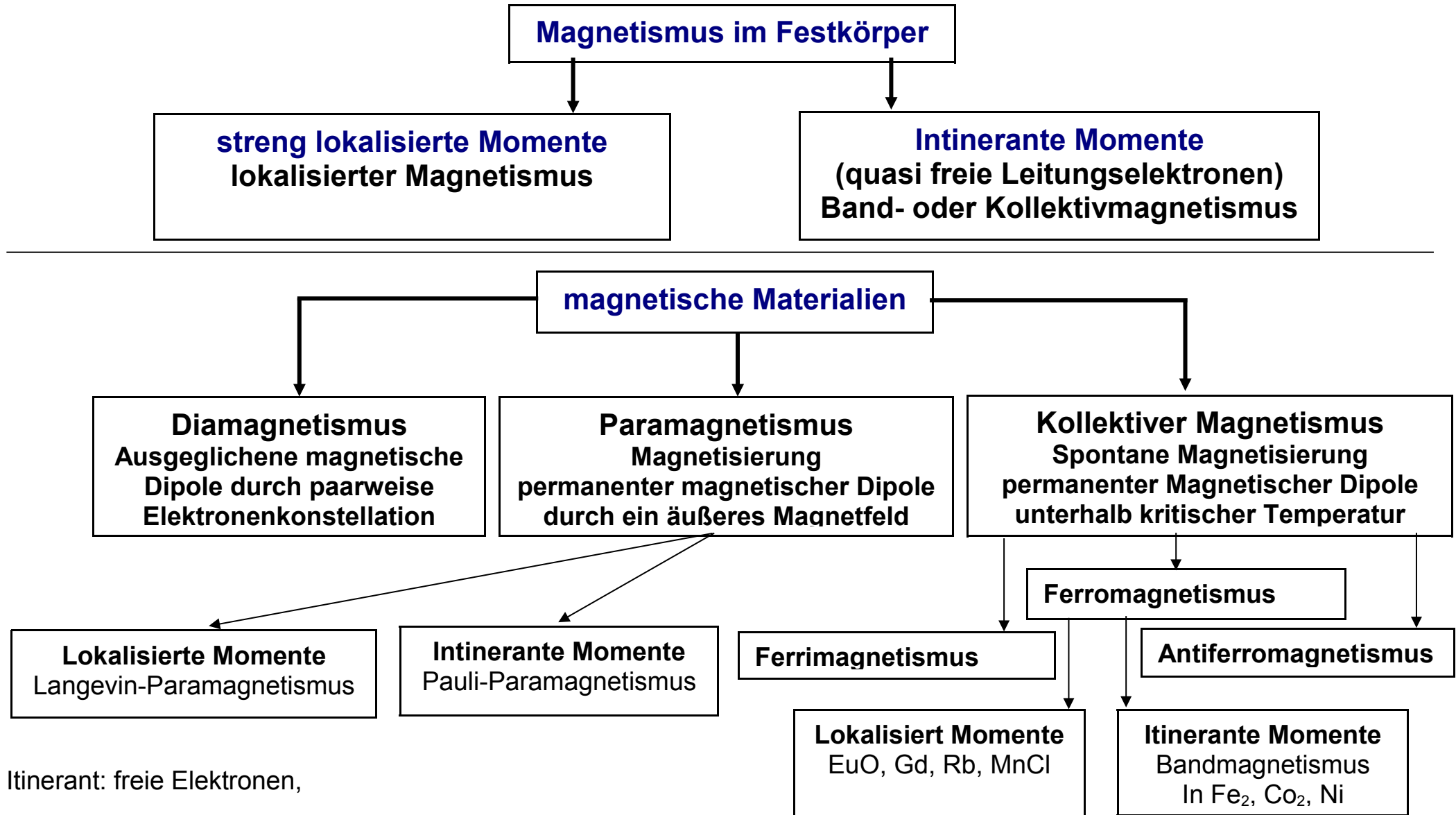
### Bei der Betrachtung magnetischer Vorgänge ist hier nur ausschlaggebend:

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| • 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.

Erscheinungsformen des Magnetismus im Festkörper:



Itinerant: freie Elektronen,

