

# Magnetische Suszeptibilität

## Einführung

Magnetische Eigenschaften stellen ein universelles Merkmal jeder Form von Materie dar. Die Klassifizierung der magnetischen Erscheinungsform und die Angabe der Stärke der Wechselwirkung mit einem äußerem Magnetfeld  $\vec{B}$  durch Erzeugung der Magnetisierung  $\vec{M}$  erfolgt typischerweise durch die magnetische Volumenssuszeptibilität  $\chi_V$ . Auf Grund sehr schwacher Wechselwirkungen bleiben Dia- und Paramagnetismus verglichen mit kollektivem Magnetismus, vor allem Ferromagnetismus, im Alltag häufig unbeobachtet. Mit Hilfe der historischen Methoden von Faraday und Gouy ist es jedoch möglich, auch alltägliche Stoffe, wie Aluminium, Glas oder Graphit, durch die Verwendung starker Magneten und präziser Waagen hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften zu untersuchen.

H <sub>2</sub>																	He
Li	Be											B	C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S <sub>8</sub>	Cl <sub>2</sub>	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br <sub>2</sub>	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I <sub>2</sub>	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Co						
<div>diamagnetisch</div> <div>paramagnetisch</div> <div>antiferro- bzw. ferromagnetisch</div>																	
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Abbildung 1: Darstellung der dia-, para- und ferromagnetischen Elemente im Periodensystem unter Standardbedingungen.

## Erscheinungsformen von Magnetismus

Sämtliche Stoffe des Universums und somit auch alle Elemente des Periodensystems besitzen magnetische Eigenschaften. Trotz der aus unserem Alltag resultierenden Wahrnehmung, dass insbesondere ferromagnetische Phänomene existieren, zeigt ein Blick auf das Periodensystem der Elemente (vgl. Abb. 1), dass unter Standardbedingungen ( $T = 293.15 \text{ K}$ ,  $p = 1013 \text{ mbar}$ ) 34 Elemente diamagnetisch und 50 Elemente paramagnetisch sind. Nur vier Elemente (Eisen, Cobalt und Nickel sind bei Raumtemperatur ferromagnetisch, Chrom ist antiferromagnetisch) sind einer kollektiven magnetischen Erscheinungsform zuzuordnen.

### Phänomenologische Unterscheidung

Vor der mikroskopischen Beschreibung und Erklärung der unterschiedlichen Erscheinungsformen von Magnetismus sollen zunächst die makroskopischen Eigenschaften und Magnetismusformen phänomenologisch unterschieden werden.

In diamagnetischen Stoffen wird durch ein äußeres Magnetfeld  $\vec{B}$  eine kleine Magnetisierung  $\vec{M}$  entgegengesetzt zur Richtung des äußeren Magnetfeldes induziert. Daher werden Diamagnete in einem inhomogenen äußeren Magnetfeld aus Regionen mit stärkerem Feld schwach abgestoßen. Die induzierten diamagnetischen Eigenschaften offenbaren sich nur im äußeren Magnetfeld und verschwinden ohne dieses vollständig. Typische Vertreter des Diamagnetismus sind Wasser, Kupfer, Kohlenstoff oder auch Silber und Gold sowie sämtliche Edelgase. Supraleiter sind ideale Diamagnete, hier kompensiert die induzierte Magnetisierung<sup>1</sup> das äußere Magnetfeld (bis zu einer gewissen Feldstärke) vollständig, so dass im Inneren des Supraleiters kein Magnetfeld herrscht.

Paramagnetische Stoffe erfahren in einem inhomogenen äußeren Magnetfeld eine Kraft in Richtung höherer Magnetfeldstärke, da in Paramagneten eine kleine Magnetisierung  $\vec{M}$  in Richtung des äußeren Magnetfeldes induziert wird. Die induzierten paramagnetischen Eigenschaften offenbaren sich analog zum Diamagnetismus nur im äußeren Magnetfeld und verschwinden ohne dieses ebenfalls vollständig. Typische Vertreter des Paramagnetismus sind Aluminium sowie viele Minerale. Eine Anwendung des Paramagnetismus stellt u. a. die Magnetresonanztomographie dar.

Ferromagneten (und die beiden anderen Erscheinungsformen des kollektiven Magnetismus, Ferri- und Antiferromagneten) zeichnen sich durch eine ganz besondere Eigenschaft aus: Unterhalb der Curie-Temperatur zeigen sie eine spontane (!) magnetische Ordnung, d.h. anders als Para- und Diamagne-

---

<sup>1</sup>Es gibt allerdings einen fundamentalen Unterschied: Die Suszeptibilität von Supraleitern wird durch induzierte *makroskopische* Kreisströme verursacht, und nicht durch kleine Veränderungen in den Atomorbitalen, wie bei konventionellen Diamagneten.

ten weisen Ferromagneten auch ohne äußeres Magnetfeld eine (vergleichsweise große) Magnetisierung  $\vec{M}$  auf. Welchen Einfluss ein äußeres Magnetfeld auf einen Ferromagneten hat, hängt von vielen Faktoren ab: Der Richtung von  $\vec{B}$  relativ zu  $\vec{M}$ , der Stärke von  $\vec{B}$  relativ zur sogenannten Koerzitivfeldstärke (d.h. der Magnetfeldstärke, die nötig ist, um die Magnetisierungsrichtung umzukehren) und der Anisotropie. Im Periodensystem der Elemente lassen sich unter den genannten Standardbedingungen nur Eisen, Kobalt und Nickel dem Ferromagnetismus und Chrom dem Antiferromagnetismus zuordnen<sup>2</sup>.

## Mikroskopische Ursachen

Mikroskopisch lassen sich sämtliche magnetischen Phänomene auf zwei Typen magnetischer Momente  $\vec{\mu}$  zurückführen.

Paramagnetismus wird durch das Ausrichten vorhandener magnetischer Momente in Richtung eines äußeren Magnetfelds verursacht. Das magnetische Moment  $\vec{\mu}_{\text{Spin}}$  ergibt sich aus dem Spin- und Bahnmoment ungepaarter Elektronen. In vollständig gefüllten Atomschalen (Drehimpulsquantenzahl  $l = 0$  und Spinquantenzahl  $s = 0$ ) sind keine magnetischen Momente vorhanden.

In Atomorbitalen und bei freien Elektronen wird durch ein äußeres Magnetfeld  $\vec{B}$  ein Kreisstrom induziert, der ein entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld ausgerichtetes magnetisches Moment  $\vec{\mu}_{\text{Strom}}$  verursacht. Dieser diamagnetische Effekt trägt immer bei, wenn Materie in ein Magnetfeld gebracht wird, allerdings ist der Effekt typischerweise<sup>3</sup> so klein, dass paramagnetisches Verhalten dominiert, sobald ungepaarte Elektronenspins vorhanden sind.

Bei diamagnetischen Stoffen existieren auf Grund der jeweiligen Struktur der Materie (Elektronenkonfiguration, etc.) keine freien Elektronenspins, sodass ausschließlich magnetische Strommomente  $\vec{\mu}_{\text{Strom}}$  zum magnetischen Verhalten beitragen. Bei paramagnetischen Stoffen sind im Gegensatz dazu magnetische Momente  $\vec{\mu}_{\text{Spin}}$  vorhanden. Da diese auf Grund ihrer Größe dominieren, zeigt sich ein entsprechendes makroskopisches Verhalten im Magnetfeld.

Bei beiden Magnetismusformen existieren nur sehr schwache Wechselwirkungen zwischen den magnetischen Momenten. Genau in diesem Punkt unterscheidet sich kollektiver Magnetismus von Dia- und Paramagnetismus.

---

<sup>2</sup>Bei tieferen Temperaturen werden auch die Lanthanoide Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium und Erbium ferromagnetisch und Mangan antiferromagnetisch. Bei Antiferromagneten wird die Temperatur den Phasenübergangs Néel-Temperatur genannt.

<sup>3</sup>Diamagnetische Effekte sind für im Atom gebundene Elektronen etwa um den Faktor  $10^{-6} \dot{B}$  (in Tesla) kleiner als paramagnetische. Experimentell können allerdings nur Magnetfelder bis maximal etwa 100 Tesla erreicht werden.

Auf Grund der sogenannten Austauschwechselwirkung<sup>4</sup> existiert unterhalb der Curie-Temperatur  $T_C$  auch ohne äußeres Magnetfeld  $\vec{B}$  eine spontane Ordnung der magnetische Momente  $\vec{\mu}_{\text{Spin}}$ .

## Magnetische Volumenssuszeptibilität

Die magnetische Volumenssuszeptibilität  $\chi_V$  lässt sich als Änderung der makroskopischen Magnetisierung  $\vec{M}$  eines Stoffes im äußeren Magnetfeld  $\vec{B}$  unter Berücksichtigung der Vakuumpermeabilität  $\mu_0$  definieren, d. h.

$$\chi_V = \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{M}}{\partial \vec{B}}. \quad (1)$$

Für dia- und paramagnetische Stoffe gilt ein linearer Zusammenhang zwischen Magnetisierung  $\vec{M}$  und äußerem Magnetfeld  $\vec{B}$ :

$$\chi_V = \mu_0 \cdot \frac{\vec{M}}{\vec{B}}. \quad (2)$$

Ist die Suszeptibilität negativ ( $\chi_V < 0$ ), spricht man von Diamagnetismus, ist sie positiv ( $\chi_V > 0$ ), von Paramagnetismus.

Die Ausrichtung der Magnetisierung  $\vec{M}$  entweder parallel oder antiparallel zu  $\vec{B}$  führt zu einer Zunahme oder Abnahme der magnetischen Energie

$$E_{\text{mag}} = -\vec{M} \cdot \vec{B} \cdot V_S \quad (3)$$

einer Probe mit Volumen  $V_S$ . Unter Berücksichtigung der Proportionalität zwischen Magnetisierung  $\vec{M}$  und Magnetfeld  $\vec{B}$  aus Gleichung (2) ergibt sich daraus für die magnetische Kraft  $\vec{F}_{\text{mag}}$  auf eine Probe im inhomogenen Magnetfeld:

$$\vec{F}_{\text{mag}} = -\vec{\nabla} E_{\text{mag}} = \frac{\chi_V \cdot V_S}{2 \cdot \mu_0} \cdot \vec{\nabla} \vec{B}^2. \quad (4)$$

Um die magnetische Kraft  $\vec{F}_{\text{mag}}$  zu bestimmen und damit Rückschlüsse auf die magnetische Volumenssuszeptibilität  $\chi_V$  ziehen zu können, eignet beispielsweise der in Abbildung 2 dargestellte Versuchsaufbau. Platziert man einen Magneten über der Probe, kann man die magnetische Kraft auf die Probe durch den Einfluss des inhomogenen Magnetfeldes  $\vec{B}$  als Änderung der Gewichtskraft  $\Delta \vec{F}_g = \Delta m \cdot g \cdot \vec{e}_z$  messen. Die Gewichtskraft  $\vec{F}_g$  der Probe wird reduziert (Paramagnetismus) bzw. verstärkt (Diamagnetismus). Wird die zu untersuchende Probe auf einer Waage positioniert, äußert sich das als Massenänderung  $\Delta m$ , wenn man den Magneten über die Probe bringt.

Da die Gewichtskraft  $\vec{F}_g$  parallel zu  $\vec{e}_z$  ist, spielt nur die  $z$ -Komponente der magnetischen Kraft eine Rolle und  $\vec{\nabla} \vec{B}^2$  reduziert sich zu  $\partial \vec{B}^2 / \partial z$ . Die

---

<sup>4</sup>Die Austauschwechselwirkung entsteht durch das Zusammenspiel von Pauli-Verbot und Coulomb-Abstoßung.

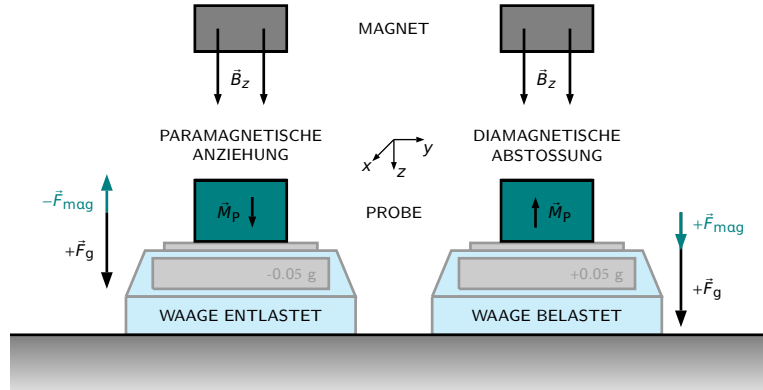


Abbildung 2: Darstellung der paramagnetischen Anziehung und diamagnetischen Abstoßung zwischen Probe und Magnet resultierend in einer Belastung bzw. Entlastung der Waage.

Berechnung der einzelnen Komponenten des magnetischen Feldes zeigt außerdem, dass  $(\partial B_{x,y}^2/\partial z) \ll (\partial B_z^2/\partial z)$  gilt, sodass das Magnetfeld näherungsweise auf die  $z$ -Komponente  $B_z$  reduziert werden kann. Wie bereits beschrieben, wird die magnetische Kraft als Gewichtskraftdifferenz  $\Delta m \cdot g$  gemessen. Für die experimentelle Bestimmung der magnetischen Volumenssuszeptibilität  $\chi_V$  gilt somit

$$\chi_V = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta m \cdot g}{V_S \cdot (\partial B_z^2/\partial z)}. \quad (5)$$