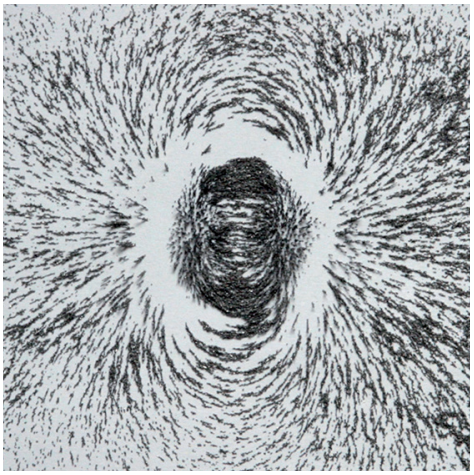
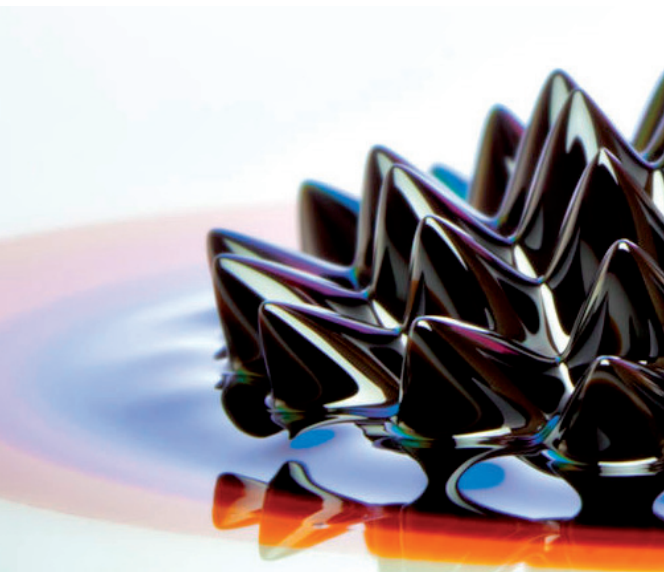
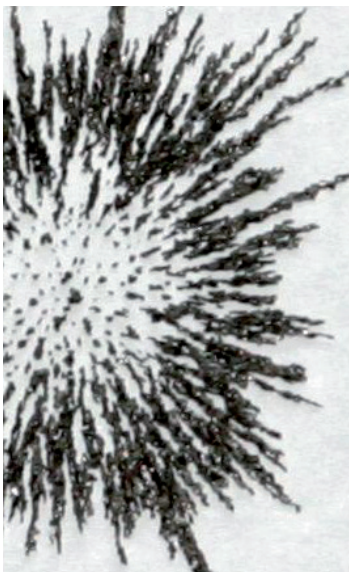
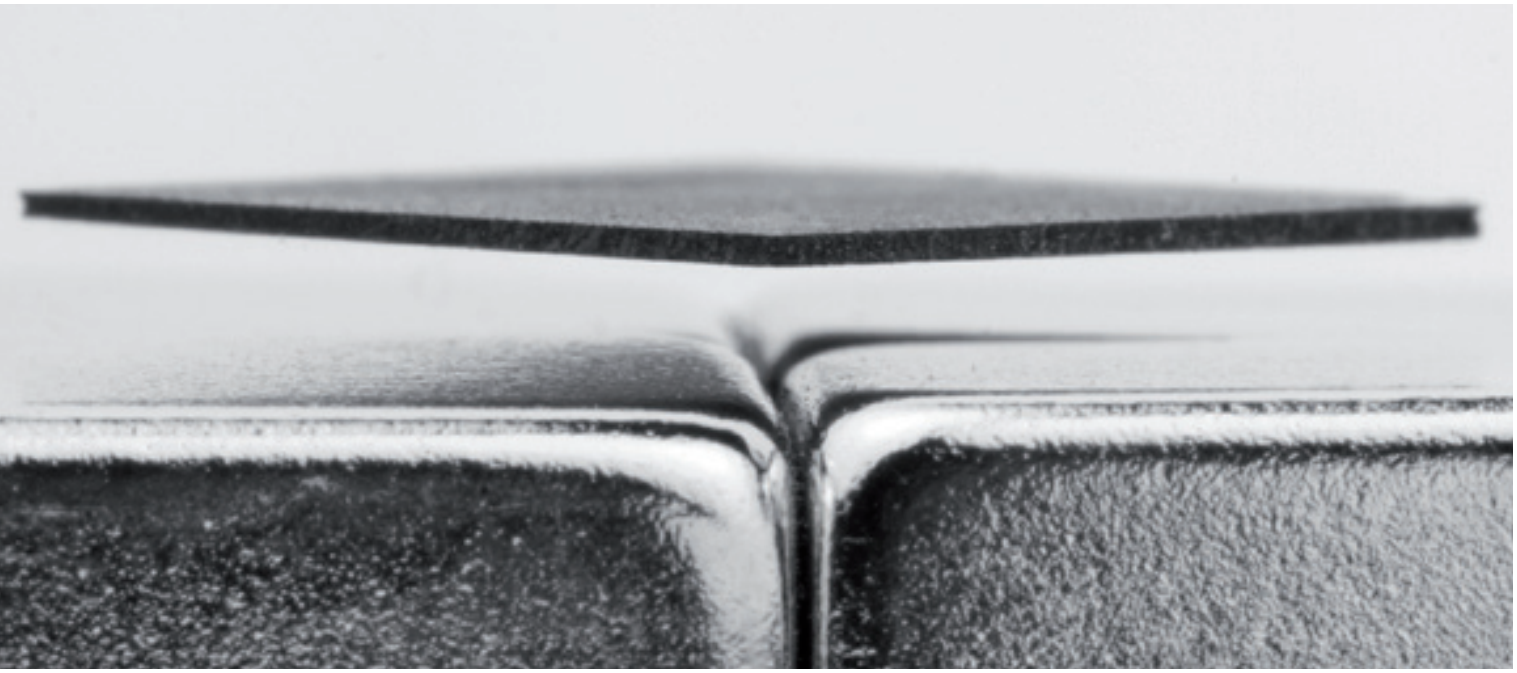
GLOSSAR: **MAGNETISMUS** VON A–Z









supermagnete

Inhalt

Einleitung 2

Antiferromagnetismus, Ferrimagnetismus 3
Atomarer Spin 5
Austauschwechselwirkung 6
Barkhausen-Sprung 9
Bloch-Wände 10
Curie-Temperatur 11
Diamagnetismus / Paramagnetismus / Ferromagnetismus 13
Elektrodynamik 16
Elektromagnet 18
Elektromagnetische Welle 20
Elektromagnetismus 22
Elektronenspin 24
Elementarmagnet 26
Energieprodukt 27
Entmagnetisierung 30
Feldlinien 31
Gauß / Tesla 32
Güte 34
Hall-Sonde 35
Hysterese 36
Koerzitivfeld 38
Lorentzkraft 40
Luftspalt 42
Magnetfeld 43
Magnetische Energie 45
Magnetische Kräfte (Anziehungskräfte, Abstoßungskräfte) 47
Magnetische Polarisation 50
Magnetische Sättigung 52
Magnetischer Fluss / magnetische Flussdichte 54
Magnetischer Widerstand 56
Magnetisches Moment 58
Magnetische Spannung 59
Magnetisierung 61
Magnetismus 63
Maximale Einsatztemperatur 65
Maxwellgleichungen 67
Monopol / Dipol / Multipol 69
Nord- und Südpol 71
Oersted 73
Pauli-Prinzip 74
Permanentmagnet / Dauermagnet 76
Permeabilität 78
Remanenz 80
Supraleiter 82
Suszeptibilität 84
Weißsche Bezirke (Domänen) 85

Impressum und wichtige Hinweise 87

supermagnete

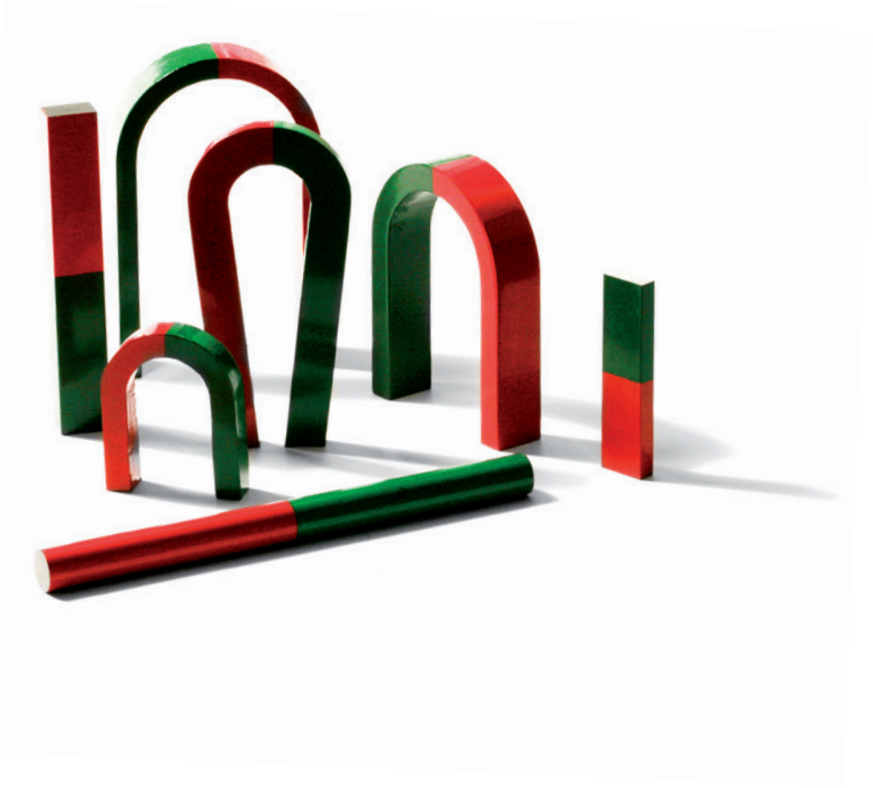
Einleitung

Ohne Magnetismus wären viele wissenschaftliche und technische Errungenschaften unserer heutigen Welt nicht denkbar. Die Entdeckung des Erdmagnetfeldes und seine Nutzung im Kompass haben die Seefahrt und damit die Geschichte nachhaltig beeinflusst. Magnetismus rettet täglich Leben, denn er ermöglicht Ärzten den Blick ins Körperinnere, bevor sie operieren. Und spätestens ein kaputter Magnetstreifen auf dem Parkticket erinnert daran, dass Magnetismus auch aus dem Alltag nicht wegzudenken ist.

Grund genug also, sich mit dem Phänomen Magnetismus gründlicher zu befassen! Unser Glossar soll Ihnen dabei eine Hilfe bieten. Es erläutert gründlich und wissenschaftlich fundiert zahlreiche Begriffe zum Thema Magnetismus, alphabetisch sortiert. Von "Nord- und Südpol" über "Gauß und Tesla" bis hin zum "Supraleiter" finden Sie hier alles rund ums Thema, verständlich beschrieben und mit vielen farbigen Abbildungen versehen.

Das Glossar zum Magnetismus ist damit bestens für den Unterricht in Schulen und an Universitäten oder einfach zum Selbststudium geeignet. Die Artikel in diesem PDF sind druckerfreundlich aufbereitet und Ausdrucke dürfen im Unterricht ausgehändigt werden.

Ganz gleich, ob Sie das Glossar für Ihre wissenschaftliche Arbeit verwenden, im Physikunterricht einsetzen oder sich aus persönlichem Interesse mit der Materie Magnetismus auseinander setzen wollen – wir wünschen Ihnen beim Lesen dieses Kompendiums viel Spaß und neue Erkenntnisse.



Antiferromagnetismus, Ferrimagnetismus

Antiferromagnetismus ("Entgegengerichteter" Ferromagnetismus) und Ferrimagnetismus sind spezielle magnetische Eigenschaften von Materialien. So werden ferrimagnetische Stoffe im Gegensatz zu antiferromagnetischen Stoffen von Magnetfeldern stark angezogen. Weitere magnetische Stoffeigenschaften sind Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Die Einordnung verschiedener Materialien in diese Stoffklassen erfolgt je nach Existenz und Art der Ausrichtung von Elementarmagneten im Material.

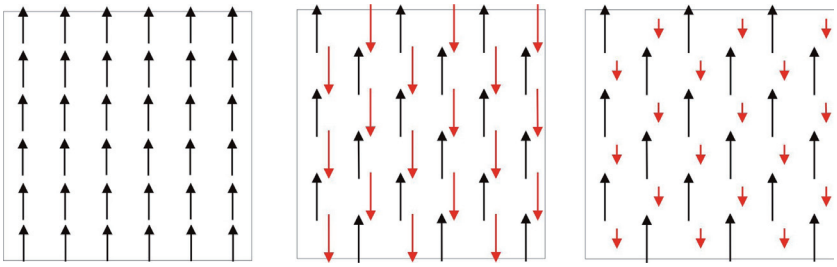
Ausführliche Erklärung

Die magnetischen Eigenschaften der Materie werden grundsätzlich unterteilt in Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Damit sind jedoch nicht alle Materialien vollständig charakterisiert. Neben den genannten Eigenschaften gibt es auch Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus (Ferrimagnetismus statt Ferromagnetismus).

Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus sind vergleichbar mit der Überlagerung der magnetischen Eigenschaften zweier ferromagnetischer Stoffe unterschiedlicher Ausrichtung in einem einzigen Stoff. Man spricht von "zwei entgegengesetzt polarisierten ferromagnetischen Untergittern".

In Manganoxid (MnO) beispielsweise sind benachbarte Spins, die Elementarmagnete in Materialien, antiparallel ausgerichtet. Es bilden sich zwei Ebenen untereinander paralleler Spins, die gerade entgegengerichtet sind. Dies ist typischer Antiferromagnetismus. Die magnetischen Eigenschaften von zwei verschiedenen ferromagnetischen "Untergittern" heben sich gerade auf.

Der Ferrimagnetismus ist ein Antiferromagnetismus, bei dem die magnetischen Eigenschaften des einen Untergitters wesentlich schwächer sind als die des anderen Untergitters (vgl. Abbildung). Es muss dabei nicht notwendigerweise so sein, dass die Untergitter gerade antiparallel ausgerichtet sind.



Links ist die Ausrichtung der atomaren Spins innerhalb eines Weißschen Bezirks eines Ferromagneten gezeigt. Alle Spins sind parallel. In der Mitte ist die Situation in einem Antiferromagneten zu sehen. Es gibt zwei antiparallel ausgerichtete Untergitter. In einem Ferrimagneten (rechts) sind die magnetischen Momente der Spins eines Untergitters wesentlich schwächer als die Spins des anderen Untergitters.

Ferrimagnetismus und Antiferromagnetismus werden leicht verständlich, wenn man mit den Grundlagen des Ferromagnetismus vertraut ist.

Beim Ferromagnetismus kommt es über die Austauschwechselwirkung der Elektronenspins zu einer Stabilisierung der parallelen Ausrichtung benachbarter Spins der Atome. Dies führt dazu, dass ein Ferromagnet in einem Magnetfeld selbst magnetisch wird. Man spricht von 3 Magnetisierung. Ist ein Ferromagnet vollständig magnetisiert, so sind alle Elektronenspins im Material parallel ausgerichtet. Der Ferromagnet ist dann selbst maximal magnetisch.
Die sogenannte Austauschwechselwirkung stabilisiert in Ferromagneten die parallele Ausrichtung der Elektronenspins einer bestimmten Atomsorte, beispielsweise der Eisenatome in festem Eisen.

In einem antiferromagnetischen Stoff stabilisieren sich jedoch nur ein Teil der atomaren Spins untereinander bei der parallelen Ausrichtung. Die restlichen Atome stabilisieren sich in einer entgegengerichteten Ausrichtung. Dies ist vergleichbar damit, dass in einem ferromagnetischen Stoff die Elektronenspins in einem Weißschen Bezirk parallel ausgerichtet sind, zwischen verschiedenen Weißschen Bezirken dagegen jedoch nicht parallel sind. Nur

dass sich beim Antiferromagnetismus die verschiedenen Weißschen Bezirke überlappen und die erwähnten Untergitter bilden. Im einfachsten Fall sind im Antiferromagneten zwei verschiedene Untergitter gerade antiparallel ausgerichtet. Ein Ferromagnet verstärkt ein äußeres Magnetfeld durch die eigene Magnetisierung. Oft wird dadurch das äußere Magnetfeld um das tausendfache verstärkt.

Beim Antiferromagneten ist das nicht der Fall, weil sich die magnetischen Momente der antiparallelen Untergitter kompensieren. Beim Ferrimagnetismus kompensieren sich die magnetischen Eigenschaften der verschiedenen Untergitter nicht vollständig. Ferrimagnete verhalten sich deshalb wie schwächere Ferromagnete.

Die Curietemperatur der Ferromagnete beschreibt, ab welcher Temperatur ein Ferromagnet paramagnetisch wird. Die Ausrichtung der Spins wird oberhalb dieser Temperatur (T) durch die Wärmebewegung zerstört. Oberhalb der Curietemperatur T_C gibt es eine einfache Näherungsformel für die magnetische Suszeptibilität χ dieses Stoffes, nämlich:
$\chi = \frac{C}{T-T_C}$.

C ist dabei die sogenannte Curie-Konstante, die für jeden ferromagnetischen Stoff verschieden ist.

Bei den Antiferromagneten gibt es ebenfalls eine charakteristische Temperatur, oberhalb derer ein Antiferromagnet paramagnetisch wird.
Dies ist die Neel-Temperatur. Oberhalb der Neel Temperatur T_N wird die Suszeptibilität nach der Formel
$\chi = \frac{N}{T_N+T}$

mit der Neel-Konstanten N abgeschätzt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Atomarer Spin

Unter dem atomaren Spin versteht man ein messbares magnetisches Moment von Atomen, welches sich wie ein kleiner Elementarmagnet verhält. Der Atomare Spin wird auf die Spins der Teilchen zurückgeführt, welche die Atome aufbauen. Dies sind die Elementarteilchen. Jedes Elementarteilchen besitzt einen Spin. Das Elektron beispielsweise den Elektronenspin. Die Überlagerung der Spins von allen Elementarteilchen in einem Atom verursacht den resultierenden Atomaren Spin, der die magnetischen Eigenschaften des Materials bestimmt.

Ausführliche Erklärung

Magnetische Felder kommen immer durch die Bewegung von Ladungen zu Stande.

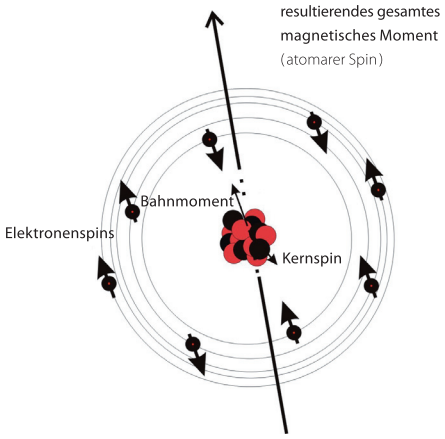
Auch die magnetischen Eigenschaften der Materie, nämlich Ferro-, Para- und Diamagnetismus, werden durch die Bewegungszustände der geladenen Elementarteilchen in den Atomen des Materials bestimmt. Dabei entstehen magnetische Wirkungen, die sich wie kleine Elementarmagnete, bzw. in der physikalischen Fachsprache ausgedrückt, wie magnetische Momente am Ort der einzelnen Atome verhalten.

Den stärksten Beitrag zum magnetischen Moment der Atome liefert der Elektronenspin. Der Elektronenspin ist im Gegensatz zur Bahnbewegung der Elektronen um den Atomkern herum (sogenanntes Bahnmoment) eine Eigenschaft der Elektronen selbst, die man sich in gewisser Weise wie die Drehung einer geladenen Kugel um die eigene Achse vorstellen kann, auch wenn die Physik zeigen kann, dass diese Vorstellung nicht ganz richtig ist.

Der Elektronenspin ist jedoch nicht der einzige Elementarmagnet. Auch der sogenannte Bahndrehimpuls, also die Bewegung der Elektronen um den Atomkern, trägt zum gesamten magnetischen Moment der Atome bei.

Es hängt dabei sehr stark von der Art des magnetischen Materials ab, welcher Beitrag am größten ist. Bei den gängigen ferromagnetischen Materialien (Eisen, Kobalt, Nickel) dominiert der Elektronenspin.

Es gibt jedoch viele Verbindungen und Legierungen (z.B. Samarium-Kobalt), die auch ein magnetisches Bahnmoment der Elektronen um den Kern besitzen, welches stark zum Magnetismus beiträgt. Daneben gibt es noch den Kernspin, der jedoch etwa einen Faktor 1'000 schwächer ist als der Elektronenspin. Die Atomkerne können dabei sehr unterschiedliche Spins besitzen, da ihr Gesamtspin sich aus dem Spin aller Protonen und Neutronen im Atomkern zusammensetzt. Der Spin der Protonen und Neutronen wiederum wird durch den Spin der Quarks gebildet, welche die Elementarteilchen sind, die den Atomkern aufbauen. Unter dem Atomaren Spin ist hier das gesamte magnetische Moment der Atome zu verstehen, das die magnetischen Eigenschaften des Materials bestimmt. Es kann durch eine vektorielle Addition der einzelnen Beiträge (Elektronenspin, Kernspin, Bahnmoment) berechnet werden (vgl. Abbildung).



Die Abbildung zeigt ein Atom (hier Sauerstoff), welches aus einem Atomkern und einer Elektronenhülle besteht. Durch die Bewegungszustände dieser geladenen Bausteine entstehet ein magnetisches Feld, welches sich aus der Summe aller einzeln addierbaren magnetischen Momente der Atome zusammengesetzt (hier zur Verdeutlichung sehr groß eingezeichnet).

Die magnetischen Momente der Atome setzen sich zusammen aus den Beiträgen des Elektronenspins, des magnetischen Bahnmomentes der Elektronen (durch die Bewegung um den Atomkern) und aus dem Kernspin. Bei den gängigen ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Kobalt, Nickel) dominiert jedoch der Beitrag des Elektronenspins.

In ferromagnetischen Stoffen kommt es zu einer zusätzlichen Stabilisierung ausgerichteter Elektronenspins durch die sogenannte Austauschwechselwirkung. Dadurch ist der Beitrag des Elektronenspins bei der Magnetisierung sehr groß und ferromagnetische Stoffe sind sehr leicht magnetisierbar. Sie verstärken die magnetischen Kräfte in Magnetfeldern um einen Faktor, der als "magnetische Permeabilität" μ bezeichnet wird und bei bis zu $\mu = 150'000$ liegen kann.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Austauschwechselwirkung

Die Austauschwechselwirkung stabilisiert die ausgerichteten Elementarmagnete, also die atomaren Spins, in magnetischen Materialien. Nur deshalb sind die parallele Ausrichtung der Elementarmagnete in Ferromagneten so stabil und die magnetischen Kräfte zwischen verschiedenen Magneten oder zwischen Ferromagnetischem Eisen und einem Magneten so stark. Die physikalische Ursache für die Austauschwechselwirkung ist das Pauli-Prinzip.

Ausführliche Erklärung

Die Austauschwechselwirkung äußert sich als eine Kraft, die zwischen den Elementarmagneten, nämlich den Elektronenspins, in einem Festkörper wirkt.

Die Austauschwechselwirkung ist eine nur über die Quantentheorie zu verstehende Kraft und beruht auf dem Pauli-Prinzip. Sie hat nicht direkt etwas mit dem magnetischen Moment der Elektronenspins zu tun und ist nicht einfach eine Kraft die dadurch zu Stande kommt, dass ein Elementarmagnet im Material magnetische Kräfte auf einen benachbarten Elementarmagneten ausübt. Diese magnetischen Kräfte wären viel zu klein um die starke Austauschwechselwirkung in Ferromagneten zu verstehen. Die Kräfte, welche dem Pauli-Prinzip folgen, können enorm sein. Diese Kräfte sind sogar stark genug, um Neutronensterne gegen den Gravitationskollaps zu stabilisieren. Nur die Kraft einer Supernova, also eines explodierenden Sterns, die ein schwarzes Loch hinterlässt, kann die Kräfte des Pauli-Prinzips überwinden.

Elektronen sind sogenannte Fermionen. Sie können sich nach dem Pauli-Prinzip nicht am gleichen Ort befinden, wenn sie sich in keiner weiteren Größe (wie beispielsweise der Richtung des Spins) unterscheiden. Dies sagt das Pauli-Prinzip über Elektronen aus.

Die Austauschwechselwirkung kommt nun dadurch zu Stande, dass die verschiedenen Elektronenspins in einem ferromagnetischen Stoff sich gerade nicht in der Richtung des Spins unterscheiden dürfen. Dies liegt daran, dass das Pauli-Prinzip durch Symmetrieeigenschaften der Fermionen, also der Elektronen bestimmt wird, die unterschiedliche Konsequenzen für die Ausrichtung des Spins haben können (zwei Elektronen am gleichen Ort müssen entgegengesetzten Spin haben, zwei Elektronen in einem ferromagnetischen Material dürfen dagegen gerade keinen entgegengesetzten Spin haben). Wie es das Pauli-Prinzip im Ferromagneten also gerade verbietet, dass die Spins benachbarter Elektronen entgegengerichtet sind, wirkt eine Kraft zwischen den Elektronen, welche die Parallelstellung der Spins stabilisiert. Diese Kraft wird als Austauschwechselwirkung bezeichnet (Details siehe unten).

Im Folgenden soll zunächst auf die Konsequenzen der Austauschwechselwirkung eingegangen werden.

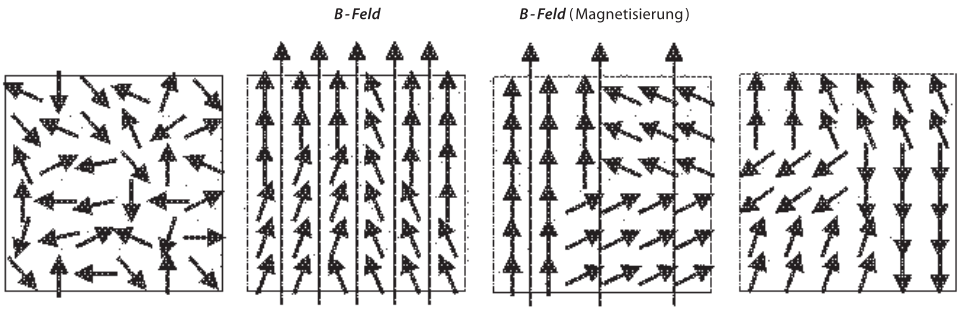


Abb. Das Bild symbolisiert die magnetischen Momente der Elektronenspins als kleine Pfeilchen. Lange Pfeile, die über die Begrenzung der Bilder hinausgehen, zeigen eine magnetische Flussdichte an, die im gesamten Material resultiert, also ein Magnetfeld. Man spricht in diesem Fall von einer makroskopischen Flussdichte.

Der Elektronenspin trägt ein magnetisches Moment. Dieses magnetische Moment wird durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet. Existieren in einem Festkörper ungepaarte Elektronenspins an den einzelnen Atomen (wie in Paramagneten und Ferromagneten), so kommt es zu einer Magnetisierung des gesamten Festkörpers durch eine Parallelstellung der magnetischen Momente aller Atome, da sich die Beiträge aller ungepaarten Elektronenspins bei der Parallelstellung zu einer Magnetisierung des gesamten Festkörpers aufsummieren.

Bei den Paramagneten ist die Austauschwechselwirkung zwischen den ausgerichteten Elektronenspins viel kleiner als die thermische Energie, also die Bewegungsenergie, der beteiligten Elektronen. Dadurch bleiben bei Raumtemperatur die Elektronenspins eines paramagnetischen Materials nicht dauerhaft ausgerichtet. Bei den Paramagneten geht die Magnetisierung nach Abschalten des äußeren Magnetfeldes verloren, da die Stabilisierung der ausgerichteten Elektronenspins durch die Austauschwechselwirkung eben nicht größer ist als die thermische Energie der Elektronen. Bei ferromagnetischen Materialien jedoch verbleibt die Magnetisierung auch nach Abschalten des äußeren Magnetfeldes. Demnach ist die Austauschwechselwirkung in Ferromagneten größer als die thermische Energie.

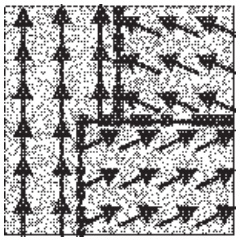
Ein magnetisierter Ferromagnet wird nicht ohne weiteres wieder entmagnetisiert. Nur harte Schläge, hohe Temperaturen oberhalb der Curie-Temperatur oder auch ein entgegengesetzt polarisiertes äußeres Magnetfeld der Koerzitivfeldstärke können die Austauschwechselwirkung der Elektronenspins und damit die Magnetisierung überwinden.

Interessanterweise magnetisiert sich ein Ferromagnet nicht spontan, sondern es kommt zu einer Ausrichtung der Elektronenspins innerhalb bestimmter Bereiche des Materials, wobei die Elektronenspins innerhalb eines solchen Bereichs untereinander parallel ausgerichtet sind. Diese Bereiche werden Weißsche Bezirke genannt.

Das Phänomen der Weißschen Bezirke, die aufgrund der Austauschwechselwirkung entstehen, kann in einem makroskopischen Modell illustriert werden. Dazu betrachtet man ein Set von Kompaßnadeln, die drehbar auf einer Platte gelagert sind und sich gegenseitig beeinflussen. Dieses Modell entspricht auch der obigen Abbildung.

In einem Experiment können alle Kompassnadeln durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden. Durch den Einfluss der Temperatur (Bewegung der Komßaßnadeln) oder mechanischen Einfluss von außen (Schläge auf das Brett) passiert es, dass ganze Gruppen von Kompassnadeln ihre Ausrichtung ändern. Die Kompassnadeln innerhalb einer solchen Gruppe bleiben dabei aber oft parallel ausgerichtet. Dieses kollektive Verhalten kann bei Elektronenspins direkt beobachtet werden. Es handelt sich tatsächlich um Sprünge in der Ausrichtung der Elektronenspins innerhalb einer ganzen Gruppe von Elektronen. Man spricht bei Elektronenspins von Barkhausen-Sprüngen. Der Bereich einer solchen parallel ausgerichteten Gruppe ist dann ein Weißscher Bezirk. Grund für Ihre kollektive Bewegung ist die gegenseitige Wechselwirkung, die Austauschwechselwirkung. Es ist energetisch günstiger, wenn eine ganze Gruppe von Elektronenspins gleichzeitig die Ausrichtung ändert als wenn dies jeder Elektronenspin für sich tut.

Im Experiment können die Barkhausen-Sprünge in Ferromagneten hörbar gemacht werden. Dies kann über einen Verstärker und einen Lautsprecher geschehen. Die Barkhausensprünge machen sich dann als "Knacken" im Lautsprecher bemerkbar, da sich bei einem Barkhausen- Sprung das Magnetfeld an der Oberfläche leicht verändert und einen kurzen Strompuls induziert (vgl. Kapitel Barkhausen-Sprung).



ferromagnetischer Staub ordnet sich an den Bereichsgrenzen von Weissschen Bezirken an.

Auch die Weißschen Bezirke selbst können direkt beobachtet werden. In einem Experiment kann auf ein magnetisiertes Material feiner ferromagnetischer Staub gegeben werden. Dieser ordnet sich dann besonders entlang der Bereichsgrenzen zwischen verschiedenen Weißschen Bezirken an und bildet dort dunkle Linien (vgl. Abbildung links). Verschieben sich die Weißschen Bezirke, so beobachtet man die Verschiebung dieser Bereichsgrenzen (Barkhausen-Sprung).

Zunächst scheint es nicht verblüffend, dass benachbarte Elektronenspins wechselwirken, denn die magnetischen Momente der Elektronenspins beeinflussen sich gegenseitig, und somit könnte man annehmen, dass das Magnetfeld eines Elektronenspins das Magnetfeld eines benachbarten Elektronenspins beeinflusst. So geschieht es im Modell der Kompassnadeln.

Es kann jedoch gezeigt werden, dass diese magnetische Kraft viel zu klein ist, um die starke Stabilisierung der Elektronenspins gegen die thermische Bewegung in Ferromagneten zu erklären. Nicht die magnetischen Kräfte sondern die Austauschwechselwirkung stabilisiert die Parallelstellung der Elektronenspins.

Wie gesagt, beruht die Austauschwechselwirkung auf dem Pauli - Prinzip. Das Pauli - Prinzip hat eine sehr grundlegende Bedeutung. Es beruht auf Symmetrieüberlegungen. Genauer muss das Pauli - Prinzip so verstanden werden, dass die Wellenfunktionen von benachbarten Elektronen in einem Festkörper antisymmetrisch zueinander sein müssen. Das bedeutet, dass sich die Elektronen genau in einer oder in drei Eigenschaften unterscheiden dürfen (wenn alle anderen Eigenschaften "symmetrisch" sind), nicht jedoch in zwei Eigenschaften. Das Produkt zweier antisymmetrischer Wellenfunktionen ist sonst wieder symmetrisch.

Genau genommen muss eine ungerade Anzahl von Funktionen antisymmetrisch sein, wenn alle anderen Funktionen, die die Eigenschaften der Teilchen beschreiben, symmetrisch sind. Bei den benachbarten Elektronen in einem Festkörper handelt es sich um Elektronen mit antisymmetrischer Orts - Wellenfunktion. Alle anderen Funktionen sind symmetrisch. Man kann sich dies so vorstellen, dass die Elektronen sich hinsichtlich ihres Ortes unterscheiden aber sonst in keiner weiteren Grösse. Deshalb muss auch die Wellenfunktion, die den Spin beschreibt, symmetrisch sein. Die Elektronen dürfen sich also in einem Ferromagneten im Spin nicht unterscheiden.

Aus dem gleichen Grund also, warum die Elektronen innerhalb eines Atomes nicht am gleichen Ort auch den gleichen Spin haben können, dürfen die Elektronen benachbarter Atome in einem ferromagnetischen Festkörper nicht unterschiedlichen Spin haben.

Deshalb stabilisieren sich in einem Ferromagneten die Elektronenspins untereinander aufgrund des Pauli - Prinzips. Es kann sich nicht einfach ein einzelner Elektronenspin umdrehen.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Barkhausen - Sprung

Barkhausen - Sprünge sind sprunghafte Veränderungen der Magnetisierung eines Magneten, wobei sich die Richtung der Magnetisierung eines mikroskopischen Bereichs, des sogenannten Weißschen Bezirks, sprunghaft ändert. Dieses Phänomen wurde Anfang des 20. Jahrhunderts von dem Physiker Heinrich Barkhausen entdeckt und nach ihm benannt. In einem Experiment können Barkhausensprünge z.B. als knackendes Geräusch in einem Lautsprecher hörbar gemacht werden.

Ausführliche Erklärung

Ein Barkhausen - Sprung ist die simultane Änderung der Ausrichtung aller Elektronenspins in einem Weißschen Bezirk.

In ferromagnetischen Materialien gibt es grundsätzlich Bereiche von einigen zehntel Millimetern Größe, in denen die Elektronenspins der Materie untereinander parallel ausgerichtet sind. Man nennt diese Bereiche Weißsche Bezirke bzw. Domänen. Die Elektronenspins in verschiedenen benachbarten Weißschen Bezirken sind jedoch nicht parallel ausgerichtet.

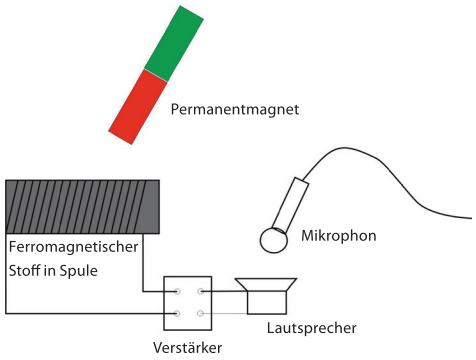
Deshalb ist in einem entmagnetisierten ferromagnetischen Stoff auch kein Magnetfeld messbar. Die Elektronenspins des einen Weißchen Bezirks stehen den Elektronenspins eines anderen Weißschen Bezirks entgegen und kompensieren somit Ihre magnetische Wirkung wechselseitig.

Durch Magnetisierung kann jedoch erreicht werden, dass ein ferromagnetischer Stoff auch nach außen hin magnetisch erscheint. Grund ist, dass die Elektronenspins in dem Material alle weitgehend parallel ausgerichtet werden. Verschiedene Weißsche Bezirke verschmelzen dabei untereinander zu einem gemeinsamen großen Bezirk mit parallel ausgerichteten Elektronen.

Die Elektronenspins müssen dazu ihre Ausrichtung ändern. Aufgrund der starken Austauschwechselwirkung zwischen den einzelnen Elektronenspins geschieht dies jedoch nicht für jeden Spin einzeln, sondern in einem Weißschen Bezirk ändert sich unter dem Einfluss eines Magnetfeldes instantan die Ausrichtung aller Elektronenspins in diesem Bezirk. Alle Elektronspins ändern ihre Ausrichtung gemeinsam in Form eines kollektiven "Sprungs". Man spricht von einem Barkhausen - Sprung.

Barkhausen - Sprünge sind somit mit einer sprunghaften Änderung der Magnetisierung in einem ferromagnetischen Stoff verbunden.

Obwohl die Weißschen Bezirke, welche hierbei Ihre Ausrichtung ändern, sehr klein sind (oft nur wenige *µm* groß), kann das sprunghafte kollektive Verhalten der winzigen Elektronenspins mit einem Experiment nachgewiesen werden.



Das Experiment zeigt einen Aufbau zum Hörbarmachen von Barkhausen - Sprüngen. In einer Spule befindet sich ein ferromagnetischer Stoff. Die Weißschen Bezirke des ferromagnetischen Materials sind untereinander nicht parallel ausgerichtet und das Material ist unmagnetisch. Beim Magnetisierungsvorgang durch einen extern angenäherten Permanentmagneten kommt es zur sprunghaften Richtungsänderung der Weißschen Bezirke. Dadurch ändert sich die Magnetisierung des Materials in der Spule sprunghaft und ein winziger Strom (der proportional zur Größe des Weißschen Bezirks ist, welcher seine Richtung geändert hat) wird messbar. Man kann den kurzen Strompuls beispielsweise durch einen Verstärker auf einen Lautsprecher geben, der dann bei jedem Sprung leise zu "knacken" beginnt. Das Signal kann mit einem Mikrophon weiter verstärkt werden.

Bei diesem Experiment wird ausgenutzt, dass bei vorsichtiger Magnetisierung nacheinander einzelne Weisssche Bezirke Barkhausen-Sprünge vollziehen.

Mit Hilfe eines Permanentmagneten wird eine ferromagnetische Probe vorsichtig magnetisiert. Es kommt dadurch zum "Umklappen" der Spins von Weissschen Bezirken, was einen kurzzeitigen magnetischen Puls verursacht. Wickelt man das Material in eine Spule, so wird durch diesen magnetischen Puls kurzzeitig ein Strom in der Spule induziert. Dieser Strompuls kann verstärkt werden und dann über einen Zeigerausschlag sichtbar gemacht oder über einen Lautsprecher hörbar gemacht werden.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

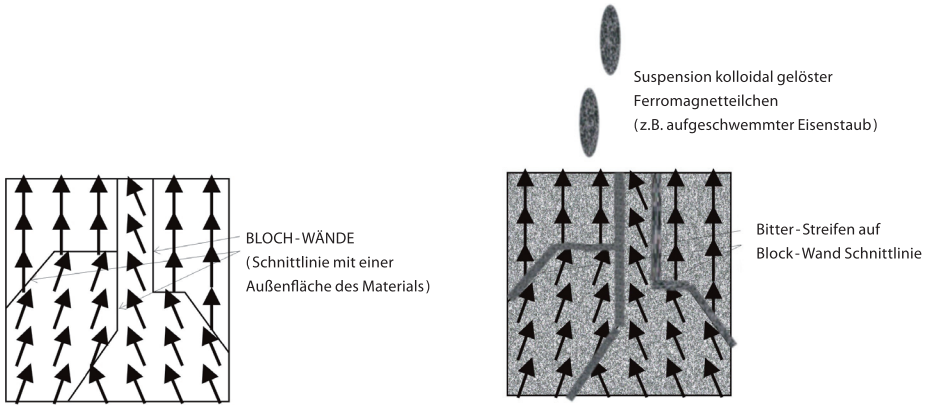
Bloch - Wände

Bloch - Wände sind die Trennflächen zwischen sogenannten Weißschen Bezirken, die in Ferromagneten auftauchen. Eine Bloch - Wand ist somit die Grenze zwischen zwei Bereichen parallel ausgerichteter Elementarmagnete. Benannt sind die Bloch - Wände nach dem in der Schweiz geborenen Physiker Felix Bloch. Bloch - Wände sind energetische Barrieren mit einem Magnetfeld, welches stärker ist als in der Umgebung. Deshalb können die Bloch - Wände experimentell mit Hilfe feinster ferromagnetischer Partikel sichtbar gemacht werden.

Ausführliche Erklärung

In ferromagnetischen Materialien sind die Elektronenspins in Gruppen parallel ausgerichtet. Die parallelen Gruppen, also die Bereiche, innerhalb derer die Spins parallel ausgerichtet sind, werden Weißsche Bezirke oder Domänen genannt. Die Bereichsgrenze zwischen diesen Weißschen Bezirken sind die sogenannten Bloch - Wände.

Durch ein äußeres Magnetfeld verschmelzen viele kleine Domänen (in einem unmagnetisierten ferromagnetischen Stoff sind die Domänen meist einige zehntel Millimeter groß) zu größeren Domänen und die Magnetisierung des Festkörpers wird nach außen hin messbar. Bei diesem Prozess verschieben sich die Bloch - Wände. Es kommt zu einer sprunghaften Änderung der Ausrichtung aller Elektronenspins in einem Weißschen Bezirk



Bloch - Wände sind Bereichsgrenzen zwischen Weißschen Bezirken. Hier treffen magnetische Flussdichten mit verschiedenen Richtungen aufeinander. Wird eine Lösung feinster ferromagnetischer Partikel (kolloidale Suspension ferromagnetischen Staubes) auf einen ebenfalls ferromagnetischen Festkörper gegeben, so sammeln sich die Partikel durch die magnetischen Kräfte entlang der Schnittlinie der Bloch - Wände mit der Außenfläche des Materials, die Kontakt zur Suspension hat, und bilden sogenannte "Bitter-Streifen", die unter dem Mikroskop direkt beobachtet werden können.

(Barkhausen - Sprung).

Bloch - Wände sind dabei keine real vorhandenen "Wände" innerhalb des Festkörpers. Stattdessen stellen sie eine energetische "Wand" dar. Sie grenzen zwei energetisch verschiedene Bereiche voneinander ab. Die Magnetfelder der in zwei Weißschen Bezirken unterschiedlich ausgerichteten Elektronenspins treffen hier aufeinander und bilden einen Bereich hoher magnetischer Flussdichte.

Wenn eine reale Trennfläche des ferromagnetischen Materials, also eine Begrenzungsfläche des Festkörpers, eine solche Bloch - Wand schneidet, treten die Feldlinien entlang der Bloch - Wand aus dem Material aus.

Ein schönes Verfahren, die Bloch - Wände sichtbar zu machen, wurde von dem Physiker Francis Bitter entwickelt. Er hat einen ferromagnetischen Körper mit einer Suspension kolloidaler ferromagnetischer Teilchen überschichtet.

Entlang der Bloch - Wände setzen sich dann die ferromagnetischen Teilchen aufgrund der hohen Magnetfeldstärke ab und bilden ein Abbild der Schnittlinie zwischen der Bloch - Wand und der Begrenzungsfläche des Festkörpers. Die entstehenden Streifen werden nach Francis Bitter auch Bitter - Streifen genannt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Curie - Temperatur

Die Curie - Temperatur ist eine stoffspezifische Temperatur, oberhalb derer sich die magnetischen Eigenschaften des Stoffes ändern. So wird Eisen nur unterhalb der spezifischen Curie - Temperatur von Eisen von einem Magneten angezogen. Die Anziehungskraft verschwindet oberhalb der Curie - Temperatur vollständig. Sie ist benannt nach dem französischen Physiker Pierre Curie.

Ausführliche Erklärung

Als Curie - Temperatur wird diejenige Temperatur bezeichnet, oberhalb derer ein ferromagnetischer Stoff in einen paramagnetischen Stoff übergeht. Auch die Remanenz eines magnetisierten Ferromagneten verschwindet oberhalb der Curie - Temperatur.

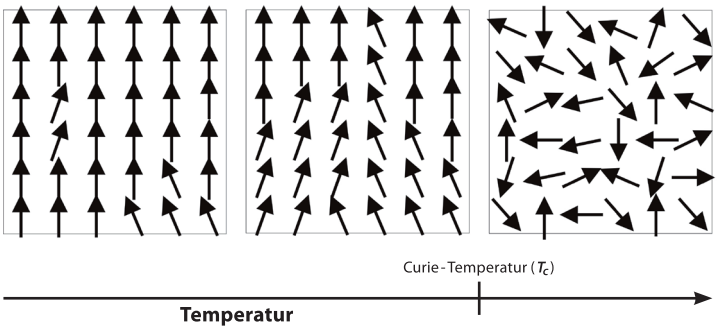
Zum Verständnis dieses Effektes sollte man kurz auf die physikalische Grundlage der Remanenz eingehen. Wird ein Ferromagnet einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, so kommt es zur Magnetisierung. Das Material wird selbst magnetisch und bleibt auch magnetisch, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird. Diese verbleibende Magnetisierung nennt man Remanenz. Der physikalische Grund für die Existenz der Curie - Temperatur liegt in der Natur des Ferromagnetismus. Ferromagnetismus kommt dadurch zu Stande, dass magnetische Momente, welche durch den Elektronenspin verursacht werden, in einem Material ausgerichtet und stabilisiert werden, wenn das Material einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt wird.

Diese Ausrichtung ist in Ferromagneten aufgrund der Austauschwechselwirkung zwischen den Elektronenspins stabil. Die Austauschwechselwirkung verhindert, dass die Ausrichtung der Spins durch die Wärmebewegung bei Raumtemperatur wieder verloren geht.

Bei höheren Temperaturen nimmt jedoch die Bewegung der Elektronenspins zu. Zunächst bleiben die Spins über weite Bereiche, die sogenannten Weißschen Bezirke, parallel augerichtet. Es kann lediglich sein, dass sich die Ausrichtung der Spins in einem größeren Bereich simultan verschiebt. Dies wird als Barkhausen - Sprung bezeichnet. Dabei bildet sich ein neuer Weißscher Bezirk. Oberhalb einer charakteristischen Temperatur, der Curie - Temperatur, übersteigt dann die Bewegungsenergie der Elektronenspins (man spricht auch von thermischer Energie) die Energie der Austauschwechselwirkung.

Dadurch durchmischen sich die Elektronenspins und die parallele Ausrichtung geht völlig verloren. Ist die thermische Energie der Elektronenspins größer als die Austauschwechselwirkung, so ist die Magnetisierung des Stoffes in einem äußeren Magnetfeld wesentlich kleiner als bei einem Ferromagneten. Man spricht dann von Paramagnetismus. Die thermische Energie der Elektronenspins übersteigt die Austauschwechselwirkung, welche charakteristisch für jedes Material ist, gerade oberhalb der Curie - Temperatur. Deshalb ist auch die Curie - Temperatur materialspezifisch.

Sie liegt bei 769 °C für Eisen, 1127 °C für Kobalt und 358 °C für Nickel.



Die Abbildung zeigt schematisch die Ausrichtung der Elektronenspins in einem magnetisierten Ferromagneten bei steigender Temperatur. Zunächst bleiben die Elektronenspins in den Weißschen Bezirken parallel ausgerichtet. Oberhalb der Curie Temperatur überwindet jedoch die thermische Energie der Spins die Austauschwechselwirkung und die Magnetisierung geht verloren.

In einem Paramagneten sind die Elektronenspins statistisch orientiert, so lange kein äußeres Magnetfeld anliegt. Das magnetisierte Material entmagnetisiert dann sofort nach Abschalten des äußeren Feldes wieder.

Die magnetische Suszeptibilität χ des Materials und damit auch die magnetische Permeabilität μ ist für Paramagnete oberhalb der Curie - Temperatur weiterhin stark temperaturabhängig. Je größer die Temperatur ist, desto schlechter lassen sich die Spins durch das äußere Feld ausrichten und desto weniger wird das äußere Magnetfeld durch das paramagnetische Material verstärkt.

Die Abhängigkeit der magnetischen Suszepbilität χ von der Temperatur T kann oberhalb der Curie - Temperatur T_c, also für $T > T_c$ durch das Curie - Weißsche Gesetz beschrieben werden.

Das Curie - Weißsche Gesetz lautet:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C},$$

wobei C die sogenannte Curie - Konstante ist. Auch die Curie - Konstante ist materialspezifisch (abhängig von der Art des Materials).

Dieses Gesetz wurde von dem Physiker Pierre Curie 1896 erstmalig formuliert und dann 1907 von dem französischen Physiker Pierre - Ernest Weiss weiterentwickelt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Diamagnetismus / Paramagnetismus / Ferromagnetismus

Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus bezeichnen unterschiedliche magnetische Eigenschaften der Materie. Ein ferromagnetischer Stoff wird von einem Magneten stark angezogen. Ein paramagnetisches Material wird dagegen nur sehr schwach angezogen und ein diamagnetischer Stoff wird sogar schwach abgestoßen. Dia-, Para- und Ferromagnetismus werden auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Atome im Material zurückgeführt.

Ausführliche Erklärung

Wird ein Material einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, so kommt es zu einer Magnetisierung des Materials. Die Richtung und Stärke dieser Magnetisierung beruht auf intrinsischen Eigenschaften des Materials und wird durch die Begriffe Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus gekennzeichnet. Es sind weitere Arten des Magnetismus (z.B. Ferrimagnetismus) bekannt, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Die Magnetisierung von Materie in einem äußeren Feld, also die Ausrichtung der Elementarmagnete im Material, kann dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet oder gleichgerichtet sein. Ist die Magnetisierung dem äußeren Feld entgegengerichtet, so spricht man von Diamagnetismus. In paramagnetischen Körpern ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet. In ferromagnetischen Materialien ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet und aufgrund einer besonderen Wechselwirkung der Elektronenspins, der sogenannten Austauschwechselwirkung, besonders stark. Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe ist bei gleichem äußeren Magnetfeld im Allgemeinen deutlich größer als die Magnetisierung paramagnetischer Stoffe. Bei Raumtemperatur sind jedoch nur die Elemente Eisen, Nickel und Kobalt ferromagnetisch. Daneben gibt es noch ferromagnetische Legierungen und Verbindungen sowie Elemente, die bei tiefen Temperaturen ferromagnetisch werden. Bei sehr hohen Temperaturen werden alle ferromagnetischen Stoffe paramagnetisch, weil dann die thermische Energie der Elektronen größer ist als die Austauschwechselwirkung und die parallele Ausrichtung der Elektronenspins zerstört wird. Es gibt für diesen Übergang eine charakteristische Temperatur, die sogenannte Curie-Temperatur.

Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe bleibt teilweise erhalten, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird. Diese verbleibende Magnetisierung wird als Remanenz bezeichnet.

Im Gegensatz zum Diamagnetismus und Paramagnetismus ist Ferromagnetismus im täglichen Leben leicht beobachtbar. Ferromagnetische Stoffe werden von Magnetfeldern merklich stark angezogen. So bleibt ein Magnet an einer Eisenwand haften, welche ferromagnetisch ist, nicht jedoch an einer Wand aus Kunststoff, welche meist diamagnetisch ist.

Die Wechselwirkung zwischen Magnetfeldern und paramagnetischen bzw. diamagnetischen Stoffen ist sehr schwach, so dass sie im täglichen Leben nicht direkt beobachtbar ist.

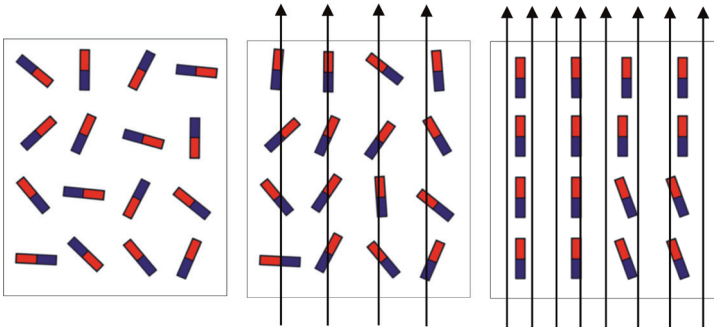


Abb. Ohne äußeres Magnetfeld sind die resultierenden Spins jedes Atoms eines paramagnetischen Stoffs (als Elementarmagnete mit blauem Nord- und rotem Südpol) statistisch orientiert (links). Die Magnetisierung ist insgesamt Null. Durch ein äußeres Magnetfeld kommt es teilweise zur Ausrichtung der Spins, also zur Magnetisierung bzw. leichten Verstärkung des äußeren Magnetfeldes (Mitte). Ist die Wechselwirkung der einzelnen Spins sehr groß, spricht man von Ferromagnetismus. Bei Ferromagneten sind die Spins in weiten Bereichen, den sogenannten Weißschen Bezirken, vollständig parallel (rechts).

In einem Diamagneten sind die eingezeichneten Elementarmagnete gar nicht vorhanden, da sich die Elektronenspins an jedem Atom vollständig kompensieren.

Ein Paramagnet (z.B. Sauerstoff) wird wie ein Ferromagnet (z.B. Eisen) von einem Magnetfeld angezogen. Nur ist die Anziehungskraft einige Millionen mal schwächer. Ein Diamagnet (z.B. Wasser) wird dagegen abgestoßen, wenn er ins Magnetfeld eingebracht wird, allerdings ebenfalls fast unmerklich schwach. Die abstoßende Kraft zwischen Magnetfeldern und diamagnetischen Stoffen ist nur bei Supraleitern stark. Supraleiter werden deshalb auch als "perfekte Diamagnete" bezeichnet. Sie zeigen eine Magnetisierung, welche die magnetische Flussdichte im Innenraum des Supraleiters komplett verdrängt. Der Supraleiter schwebt aufgrund der abstoßenden diamagnetischen Wirkung sogar über einem Magneten.

Zur Beschreibung der Stärke der Magnetisierung wird die magnetische Permeabilität μ eingeführt. Vereinfacht dargestellt kann man sich vorstellen, dass die Permeabilität μ angibt, um welchen Faktor die magnetische Flussdichte durch den Einfluss des Materials vergrößert bzw. verkleinert wird. So ist die magnetische Flussdichte B in Anwesenheit eines Stoffes mit der Permeabilität μ im Gegensatz zur magnetischen Flussdichte des Vakuums B_0:

$B = \mu \cdot B_0$ as Magnetfeld wiederum ist die Summe aus dem äusseren einfallenden Magnetfeld H_0 (welches ebenfalls im Vakuum vorliegen würde) und der Magnetisierung M:

$H = H_0 + M$ Dieses Magnetfeld in Anwesenheit des Stoffes erhält man ebenfalls durch Multiplikation des Vakuumfeldes mit der Permeabilität μ:

$H = \mu \cdot H_0$ Somit gilt für die Magnetisierung:

$M = H - H_0 = \mu \cdot H_0 - H_0 = (\mu - 1) \cdot H_0$ Die Magnetisierung M eines Stoffes bei einem einfallenden (Vakuum-) Magnetfeld H_0 ist also:

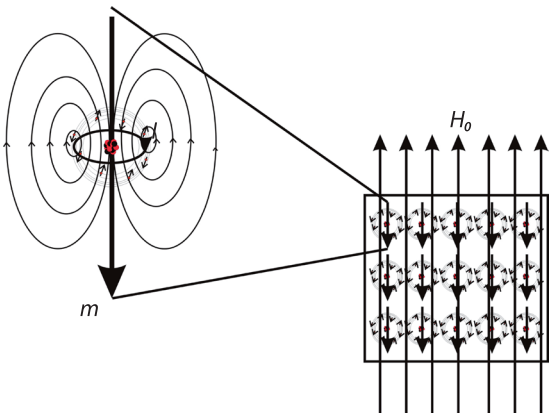
$M = (\mu - 1) \cdot H_0$ Man nennt den Faktor $(\mu - 1)$ auch die magnetische Suszeptibilität χ und es folgt:

$M = \chi \cdot H_0$ Die Permeabilität des Vakuums ist $\mu = 1$. Somit reagiert das Vakuum gar nicht auf ein Magnetfeld. Die Magnetisierung M des Vakuums ist Null. Ebenso seine magnetische Suszeptibilität χ. Paramagnetische Stoffe haben eine Permeabilität, welche etwas grösser als 1 ist. Die magnetische Suszeptibilität der Paramagnete ist etwas grösser Null. Die Permeabilität diamagnetischer Stoffe ist etwas kleiner als 1, die Suszeptibilität entsprechend kleiner Null. Bei einem Supraleiter ist die magnetische Permeabilität $\mu = 0$ und die Suszeptibilität $\chi = -1$. Somit dringt der magnetische Fluss gar nicht mehr in den Supraleiter ein. Man kann sich auch vorstellen, dass bei Supraleitern die Magnetisierung gleich dem äusseren einfallenden Feld ist, nur entgegengerichtet. Deshalb wird das äussere Feld im Supraleiter kompensiert. Ferromagnete können sehr grosse Permeabilitätszahlen haben. Bei Eisen kann μ Werte bis 10'000 erreichen, besondere ferromagnetische Metalle mit einer besonders erzeugten Anordnung der Atome, erreichen Werte bis $\mu = 150'000$.

Die Annahme, dass die Permeabilität einfach eine Konstante für jeden Stoff ist, ist jedoch nur eine Näherung. Dies kann man an der Hysteresekurve sehen. In Wirklichkeit folgt die Magnetisierung des Materials nicht linear dem einfallenden Magnetfeld (bzw. der einfallenden Flussdichte). Der Zusammenhang ist komplizierter und außerdem noch von der "Vorgeschichte" des Stoffs abhängig. Ist der Stoff bereits magnetisiert, so verhält er sich im äußeren Feld anders, als das gleiche, jedoch nicht magnetisierte Material. Die lineare Formel $M = \chi \cdot H_0$ ist deshalb eine Näherung.

Zum Verständnis der physikalischen Ursache für Dia-, Para- und Ferromagnetismus kann man sich vorstellen, dass jeder Stoff aus Atomen mit Atomkernen und Elektronen besteht.

Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, so werden unter dem Einfluss dieses Magnetfeldes Bewegungen der Elektronen, also Ströme, induziert. Nach der Lenzschen Regel sind diese Ströme so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirken. Deshalb sind die induzierten magnetischen Momente, man spricht auch von induzierter Magnetischer Polarisation, so ausgerichtet, dass der Stoff als Ganzes schwach aus dem äußeren Magnetfeld herausgedrängt wird, also diamagnetische Eigenschaften zeigt.



Jedes Material zeigt Diamagnetismus. Der Grund dafür ist in der Abbildung schematisch illustriert. Wird ein Material in ein äußeres Magnetfeld H_0 eingebracht, so kommt es zur Induktion von Kreisströmen I mit magnetischen Momenten m, die dem äußeren Feld entgegengerichtet sind (Lenzsche Regel). Die gesamte Magnetisierung M, die sich als Summe über alle induzierten magnetischen Momente ergibt, ist demnach dem äußeren Feld entgegengerichtet. Der Diamagnet zeigt eine Magnetisierung $\chi \cdot H_0$ mit leicht negativer magnetischer Suszeptibilität χ.

Jeder Stoff ist ein bisschen diamagnetisch. Es kann jedoch sein, dass zusätzliche paramagnetische oder sogar ferromagnetische Eigenschaften den Diamagnetismus eines Stoffs überlagern. Zu Para- bzw. Ferromagnetismus kommt es genau dann, wenn die Elektronen der gesamten Elektronenhülle an jedem Atom des Stoffes einen resultierenden Gesamtspin besitzen. Einzelne Elektronen besitzen immer einen sogenannten "Spin", welcher ein magnetisches Moment trägt. In vielen Materialien heben sich die Elektronenspins jedoch paarweise auf. Diese Materialien sind dann diamagnetisch. Wenn jedoch jedes Atom eine ungerade Anzahl an Elektronen besitzt, dann können sich die Elektronenspins in jedem einzelnen Atom nicht paarweise aufheben. Dann beispielsweise besitzt jedes Atom mit seinen Elektronen einen resultierenden Gesamtspin des letzten verbleibenden "ungepaarten" Elektrons. Diese Materialien sind para- oder ferromagnetisch.

Die atomaren magnetischen Momente der resultierenden Spins sind durch die Bewegung der Atome gleichmäßig in alle Raumrichtungen verteilt, so dass die Magnetfelder aller Elementarmagnete zusammengenommen sich gegenseitig kompensieren und der Stoff nach außen nichtmagnetisch erscheint.

Die resultierenden Gesamtspins aller Atome richten sich aber in einem äußeren Magnetfeld aus. Der Nordpol aller Elementarmagnete zeigt dann in Richtung des Südpols des äußeren Feldes und umgekehrt. In diesem Fall verhält sich die Probe selbst wie ein Magnet und wird vom äußeren Magnetfeld angezogen. Die gleichzeitig induzierten Kreisströme, welche aufgrund der Lenzschen Regel ihrer Ursache (dem äußeren Magnetfeld) entgegengerichtet sind, sind in paramagnetischen und ferromagnetischen Stoffen schwächer als der Effekt der ausgerichteten Elementarmagnete, so dass die abstoßende Wirkung der induzierten Kreisströme von der anziehenden Wirkung der ausgerichteten Elementarmagnete übertroffen wird. Dies ist die Ursache für Para- und Ferromagnetismus.

In einem Ferromagneten kommt es zu einer Stabilisierung der Elektronenspins durch die Austauschwechselwirkung. Die Austauschwechselwirkung ist in Ferromagneten besonders stark. Jeder Elementarmagnet wird dann in seiner Ausrichtung zusätzlich stabilisiert. Dies führt zu einer oft millionenfach stärker anziehenden Wirkung. Das Material bleibt deshalb sogar als Ganzes merklich magnetisch, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird (Remanenz). In Paramagneten ist die Austauschwechselwirkung kleiner als die thermische Energie der atomaren Spins.

Wenn der magnetisierte Ferromagnet stark erhitzt wird (über die Curie-Temperatur hinaus), dann verschwindet der Ferromagnetismus, weil die Temperaturerhöhung zu einer stärkeren Bewegung der Atome mit den einzelnen resultierenden Gesamtspins der Elektronenhülle führt. Diese Bewegung zerstört die gegenseitige Kopplung der Elektronenspins durch die Austauschwechselwirkung weil die zugeführte thermische Energie die Kopplungsenergie der Elektronenspins übersteigt. Der Körper wird dann oberhalb der Curie-Temperatur zu einem Paramagneten. Auch starke Erschütterung oder ein entgegengesetztes äußeres Feld können die Remanenz eines Ferromagneten aufheben, also zur Entmagnetisierung führen. Der Stoff bleibt dann jedoch ferromagnetisch und könnte erneut magnetisiert werden. Auch ein erhitzter Stoff wird wieder ferromagnetisch, wenn er unter die Curie-Temperatur abkühlt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Elektrodynamik

Die Elektrodynamik ist die physikalische Theorie zur Erklärung aller elektrischen Phänomene (z.B. elektrische Kräfte, Ströme, Ladungen) und aller magnetischen Phänomene (z.B. Magnetfelder und magnetische Kräfte). Da der Anteil der elektrischen Phänomene überwiegt spricht man kurz von Elektrodynamik, wobei das Wort "Dynamik" speziell herausstellt, dass auch die zeitliche Veränderung von elektrischen und magnetischen Kräften mit den Formeln dieser Theorie berechnet werden kann.

Ausführliche Erklärung

Im Studium der Physik wird die Lehre des Elektromagnetismus als Elektrodynamik bezeichnet. Mit dem Wort "Dynamik" wird der Tatsache Rechnung getragen, dass es um die Beschreibung aller elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen geht, wobei auch eine zeitliche Veränderung (Dynamik) der elektrischen und magnetischen Felder berücksichtigt wird. Bei dem Spezialfall von sich zeitlich nicht ändernden (statischen) elektrischen und magnetischen Feldern spricht man von Elektrostatik bzw. Magnetostatik.

Als Elektromagnetismus wird wiederum die Erscheinung der magnetischen und elektrischen Phänomene an sich bezeichnet.

Elektrodynamik bezeichnet dagegen die physikalische Theorie, welche zur Beschreibung des Elektromagnetismus herangezogen wird.

Grundgleichungen der Elektrodynamik sind die Maxwellgleichungen. Die Maxwellgleichungen sollten jedem Physikstudenten bekannt sein. Sie beschreiben die Größe magnetischer und elektrischer Felder in Abhängigkeit von Strömen und Ladungen. Die zeitabhängigen Maxwellgleichungen berücksichtigen, dass zeitlich veränderliche elektrische Felder Ursache für magnetische Felder sind und dass mit zeitlich veränderlichen magnetischen Feldern elektrische Felder einhergehen. In den Maxwellgleichungen können auch materialspezifische Parameter berücksichtigt werden. Dadurch kann das Verhalten der elektrischen und magnetischen Felder in Materie berechnet werden.

Zunächst mag die Theorie der Elektrodynamik anmuten wie eine physikalische Theorie, die nur in speziellen, elektrotechnischen Problemen angewendet wird. Es ist jedoch so, dass fast alle Erscheinungen unserer Welt auf elektrische und magnetische Kräfte zurückgehen und demnach durch Elektromagnetismus und durch die Elektrodynamik erklärt werden. Die grundsätzliche Stabilität der Materie, vom Aufbau des Wasserstoffatoms über Moleküle, Zellen, Organismen, bis hin zu den Kräften in unserer Biosphäre werden alle durch die elektromagnetischen Kräfte getrieben. Nur unter der Größe von Atomen, im Atomkern, spielen die atomaren Kräfte eine Rolle und erst der Aufbau von Planeten und Sternen wird von Gravitationskräften beeinflusst. Alles andere ist Elektromagnetismus.

Wie die Beschreibung der Elektrodynamischen Phänomene mit Hilfe der Mathematik der Maxwellgleichungen funktioniert, soll beispielhaft für die Beschreibung elektromagnetischer Wellen herangezogen werden.

Üblicherweise werden die vier zeitabhängigen Maxwellgleichungen wie folgt geschrieben:

1) $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon 0}$

2) $\nabla \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} = 0$

3) $\nabla \cdot \vec{B} = 0$

4) $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \frac{1}{c^2}\dot{\vec{E}}$

Gleichung 1) sagt, dass Quellen des elektrischen Feldes E die Ladungen sind. Genau genommen wirkt eine Ladungsdichte ρ, die durch die Dielektrizitätskonstante des Vakuums ε_0 dividiert werden muss, als Quelle des elektrischen Feldes (die Tatsache, dass man von den Quellen spricht, wird durch die sogenannte Divergenz des elektrischen Feldes, das ist der Ausdruck $\nabla \cdot \vec{E}$, berücksichtigt).

Gleichung 2) sagt aus, dass zeitlich veränderliche magnetische Flussdichten $\dot{\vec{B}}$ (Der Punkt über der magnetischen Flussdichte bezeichnet die zeitliche Änderung dieser Größe) Wirbel im elektrischen Feld verursachen (Wirbel eines elektrischen Feldes werden mit $\nabla \times \vec{E}$ ausgedrückt).

Gleichung 3) sagt, dass es keine Quellen der magnetischen Flussdichte gibt und **Gleichung 4** gibt an, dass Wirbel der magnetischen Flussdichte $\nabla \times \vec{B}$ immer mit Stromdichten j und zeitlich veränderlichen elektrischen Feldern $\dot{\vec{E}}$ einhergehen, die entsprechend der 4. Gleichung mit der magnetischen Permeabilität des Vakuums μ_0 bzw. der Lichtgeschwindigkeit c skaliert werden müssen.

Man kann nun die 4. Gleichung zeitlich ableiten und dann die 2. Gleichung in die Zeitableitung der 4. Gleichung einsetzen:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \frac{1}{c^2} \dot{\vec{E}}$$

$$\Rightarrow \nabla \times \dot{\vec{B}} = \mu_0 \cdot \dot{\vec{j}} + \frac{1}{c^2} \ddot{\vec{E}}$$

$$\Rightarrow -\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \mu_0 \cdot \dot{\vec{j}} + \frac{1}{c^2} \ddot{\vec{E}}$$

Ohne weiter in die Mathematik einzusteigen, soll an dieser Stelle nur erwähnt werden, dass der rechte Ausdruck im Falle von verschwindenden Strömen und Ladungen $j = 0$, $\rho = 0$ in der Form

$$-\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \frac{1}{c^2} \ddot{\vec{E}}$$

eine Gleichung darstellt, die durch Wellen gelöst wird. Eine Lösung ist beispielsweise möglich, wenn für das elektrische Feld ein mathematischer Ausdruck eingesetzt wird, der eine ebene Welle beschreibt. Beispielsweise einfach eine Sinus- oder Konsinusfunktion.

Die obige Gleichung wird deshalb auch als Wellengleichung bezeichnet.

Man kann also aus den Maxwellgleichungen eine Wellengleichung ableiten. Die Physiker und Mathematiker folgerten aus diesen Rechnungen, dass es elektromagnetische Wellen geben muss, die sich im Vakuum ausbreiten. Dies ist theoretisch notwendig, wenn die Maxwellgleichungen richtig und vollständig sind und davon gehen wir bis heute aus.

Ein interessanter Erfolg der Elektrodynamik an dieser Stelle ist also der, dass nur aus der Umformung der Maxwellgleichungen die Existenz elektromagnetischer Wellen abgeleitet wurde, bevor diese überhaupt nachgewiesen wurden. Nimmt man nun eine erweiterte Form der Maxwellgleichungen in Materie und setzt man in diese Materiegleichungen bekannte Materialparameter ein, so kann berechnet werden, wie sich die elektromagnetischen Wellen im Kontakt zur Materie verhalten.

Da Radiowellen, Funk- und Fernsehen, Handystrahlung, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht mit seinen verschiedenen Farben, UV-Strahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung durchwegs elektromagnetische Wellen sind, die sich nur durch die Wellenlänge der Strahlung voneinander unterscheiden, werden sehr viele Phänomene und Anwendungen verständlich und berechenbar, wenn man die Elektrodynamik heranzieht. Die Maxwellgleichungen haben sehr dazu beigetragen, viele der genannten Phänomene überhaupt als elektromagnetische Wellen zu identifizieren. Ohne die Elektrodynamik hätte es Funk und Fernsehen, Handies, Mikrowellen, Computer und vieles mehr nie gegeben.

Die Elektrodynamik behandelt jedoch nicht nur elektromagnetische Wellen. Mit Hilfe einer Vorstellung von der messbaren Beweglichkeit der Elektronen im Material beispielsweise sind Größen wie elektrische Leitfähigkeit, Farbe, Lichtbrechung, Glanz oder Wärmeleitfähigkeit zugänglich. Die Elektrodynamik ist deshalb nicht nur bei der Entwicklung elektronischer Schaltkreise hilfreich sondern auch bei der Konzeption von Oberflächenbeschichtungen, Brillengläsern und Materialien zur Wärmeisolation, um nur einige wenige Beispiele zu nennen.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Elektromagnet

Ein Elektromagnet ist ein elektrisch betriebener Magnet. Er muss mit Strom angetrieben werden. Dabei kann die Stärke des Elektromagneten durch den Strom reguliert werden. Schaltet man den Strom aus, so verschwindet auch das Magnetfeld wieder. Deshalb werden in der Technik oft Elektromagnete und keine Permanentmagnete eingesetzt, da regulierbare Magnetfelder Vorteile bieten. Im einfachsten Fall wirkt eine Drahtspule, durch die ein Strom läuft, wie ein Elektromagnet.

Ausführliche Erklärung

Ein Elektromagnet ist ein Gerät, welches durch Anschluss an eine Stromquelle ein Magnetfeld erzeugt. Meist handelt es sich um einen spulenförmig aufgewickelten stromdurchflossenen Leiter mit einem ferromagnetischen Spulenkern.

Das Magnetfeld wird durch die bewegten Ladungen des Stromes im Leiter verursacht.

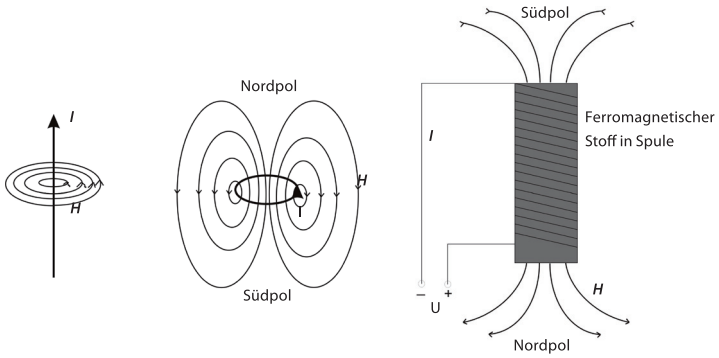
Nach heutiger Erkenntnis ist die Bewegung von Ladungsträgern die einzige Möglichkeit, ein Magnetfeld zu erzeugen. Dies wird so auch durch die von dem Physiker James Clerk Maxwell aufgestellten Maxwellgleichungen, die Grundgleichungen der Elektrodynamik, beschrieben. Die Maxwellgleichungen beschreiben exakt die Größe der magnetischen und elektrischen Felder in Abhängigkeit von Strömen und Ladungen.

Grundsätzlich existieren nur Magnetfelder, die durch Ladungsbewegung erzeugt werden. Dabei entsteht immer ein Magnetfeld mit einem Nordpol und einem Südpol. Quellen des Magnetfeldes, wie die Ladungen die Quellen des elektrischen Feldes sind, gibt es nicht.

Der erste Physiker, welcher die magnetischen Kräfte eines stromdurchflossenen Leiters erkannte, richtig interpretierte und seine Entdeckung aufschrieb, war Hans Christian Oersted.

Oersted beobachtete dabei 1820 die Auslenkung einer Kompassnadel in der Nähe eines stromdurchflossenen Drahtes.

Auch die magnetischen Kräfte der Permanentmagnete werden durch mikroskopische Ladungsbewegung in der Materie verursacht. So bewegen sich die Elektronen in den Atomen mit einer großen Geschwindigkeit. Die Elektronen haben dabei auch einen charakteristischen Elektronenspin. Beides verursacht ein magnetisches Moment und damit magnetische Kräfte.



*Die Abbildung links zeigt einen Ausschnitt des Magnetfeldes **H** eines vom Strom **I** durchflossenen Leiters. In der Mitte ist der Verlauf der Feldlinien gezeigt, wenn der Leiter zu einer Schleife gebogen wird.*
*Werden viele Leiterschleifen (Windungen) um einen ferromagnetischen Kern gewickelt (rechte Seite) und an den Leiter eine Spannung **U** angelegt, so fließt ein Strom **I** und ein Magnetfeld **H** entsteht, welches durch den ferromagnetischen Kern und die große Zahl von Windungen vielfach stärker ist als das Magnetfeld der einzelnen Leiterschleife. Dieser Aufbau entspricht einem klassischen Elektromagneten. Die Form des Magnetfeldes ist jedoch ähnlich der Leiterschleife und der eines stabförmigen Permanentmagneten identisch.*

Der Übersicht halber wurden die Feldlinien bei der Spule rechts nur angedeutet. Sie sind viel dichter als bei der einzelnen Leiterschleife und verlaufen vom Nordpol (hier die Unterseite der Spule) zum Südpol (hier die Oberseite der Spule), um sich im Innenraum des Elektromagneten wieder zu schließen. Nord- und Südpol können durch vertauschen der Pole der Spannungsquelle und damit durch Umkehren der Stromrichtung umgepolt werden.

Mit großen Spulen, durch die starke Ströme geleitet werden, sind bisher die größten Magnetfelder überhaupt erzeugt worden. Das Magnetfeld H in der Mitte einer Spule der Länge l und des Radius R ist proportional zum Strom in der Spule I, es ist proportional zur Zahl der Windungen der Spule n und es ist bei sehr langen Spulen indirekt proportional zur Länge der Spule l, bzw. bei sehr kurzen Spulen indirekt proportional zum Radius der Spule R. Die Formel für das magnetische Feld H auf der Achse einer stromdurchflossenen Zylinderspule lautet:

$$H = \frac{nI}{\sqrt{l^2+4R^2}}$$

Besonders stark ist also das Magnetfeld einer Spule mit kleinem Durchmesser und einer sehr großen Windungszahl, wenn durch diese ein sehr großer Strom geschickt wird. Zur Erzeugung besonders großer Magnetfelder werden deshalb heute supraleitende Spulen mit großer Windungszahl eingesetzt. Supraleiter sind Materialien,

die keinen elektrischen Widerstand besitzen, also reibungsfrei Strom leiten. Durch das supraleitende Material kann deshalb ein sehr großer Strom fließen. Um die Querschnittsfläche und damit den Durchmesser der Spule zu verringern, wurden in Experimenten der Grundlagenforschung zu hohen Magnetfeldern supraleitende Spulen durch eine um die Spule herum angebrachte Sprengladung zusammengesprengt. Dabei verringert sich der Durchmesser der supraleitenden Spule schlagartig und das Magnetfeld steigt kurzzeitig stark an, auch wenn es dann sofort wieder zusammenbricht, weil die Spule ja zerstört wurde. Durch die Sprengung wurden die magnetischen Feldlinien quasi zusammengedrückt.

Mit diesem Verfahren wurden bereits Magnetfelder von einigen 10'000 Tesla Magnetfeldstärke erzeugt. Noch größere Magnetfelder existieren im Weltall an der Oberfläche von Neutronensternen.

In einem ferromagnetischen Material existieren elementare magnetische Polarisationen, die sich in einem äußeren Magnetfeld ausrichten und es bis auf das Tausendfache verstärken können. Deshalb werden ferromagnetische Materialien in Elektromagneten als Spulenkerne eingesetzt. Im einfachsten Fall wird einfach ein Draht um einen Zylinder aus ferromagnetischem Material (z.B. Eisen) gewickelt.

Ein einfaches Experiment dazu kann jeder zu hause durchführen. Dazu muss man nur einen Kupferdraht um einen Bleistift wickeln. Wenn nun die Enden des Kupferdrahtes jeweils an Plus- bzw. Minuspol einer Batterie angeschlossen werden, so fließt durch den Draht ein Strom und es entsteht ein Elektromagnet. Mit diesem lässt sich beispielsweise eine Kompassnadel auslenken.

Wird der Kupferdraht statt um einen Bleistift um einen Eisenzylinder, z.B. einen Nagel, gewickelt, so ist das Magnetfeld deutlich stärker. Es wird durch den ferromagnetischen Kern um den Faktor μ, die magnetische Permeabilität, verstärkt. Für Eisen kann μ Werte größer als 1'000 annehmen.

Elektromagnete finden heute unter anderem Einsatz in Generatoren und Elektromotoren, finden sich in Relais und sind Voraussetzung für zahlreiche elektronische Bauteile im Bereich Funk und Fernsehen. Übliche Transformatoren bestehen zum Beispiel aus gegenüberstehenden Spulen unterschiedlicher Windungszahl.

In einem Transformator induziert das Magnetfeld der einen eine Spannung in der gegenüberliegenden Spule, deren Wert vom Verhältnis der Windungszahlen beider Spulen abhängt. Somit ist es möglich, Spannungen zu erhöhen oder zu erniedrigen, ohne dass (außer Wärmeverlusten) viel Leistung verloren geht.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Elektromagnetische Welle

Elektromagnetische Wellen bestehen aus elektromagnetischer Energie und können sich sogar im leeren Raum ausbreiten. Radiowellen, Mikrowellen, Röntgenstrahlen und viele andere Wellen- und Strahlungsarten sind elektromagnetische Wellen. Auch das Licht ist eine elektromagnetische Welle. Dabei unterscheiden sich Licht und Radiowellen sowie alle anderen Erscheinungen durch die Wellenlänge. Es ist schwierig, sich elektromagnetische Wellen wirklich vorzustellen. Wie Wasserwellen auf einer Seeoberfläche erfüllen sie den Raum.

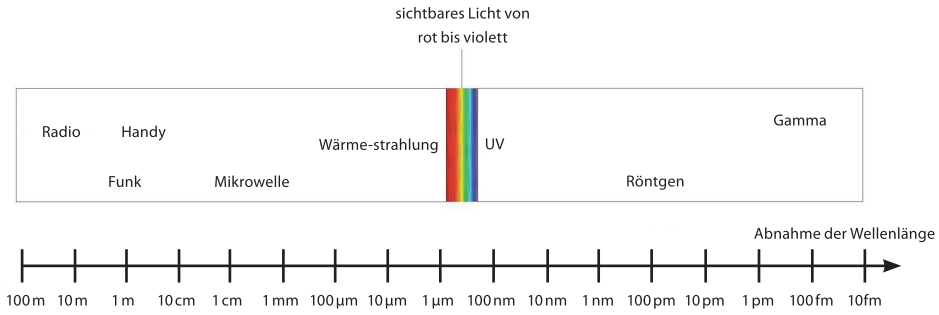
Ausführliche Erklärung

Alle bekannten und messbaren Energiestrahlen außer den direkten Teilchenstrahlen (z.B. Elektronen oder Alpha-Strahlen) sind elektromagnetische Wellen.

Zu den elektromagnetischen Wellen gehören unter anderem Radiowellen, Funk- und Fernsehwellen, Handystrahlung, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht mit seinen verschiedenen Farben, UV-Strahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung.

Während Radiowellen und alle Wellen von Funk und Fernsehen eine Wellenlänge von weniger als ein bis zu vielen Metern haben können, ist die typische Wellenlänge der Handystrahlung im Bereich von etwa 10 cm angesiedelt, gefolgt von den noch kurzwelligeren mm und cm – Mikrowellen. Zwischen mm und µm nehmen wir die elektromagnetische Strahlung als Wärme auf der Haut wahr. Im Bereich unter $1\mu m$ wird die Strahlung dann bei etwa 700 nm als rote Farbe sichtbar, um mit abnehmender Wellenlänge die Farben gelb, grün und blau anzunehmen, bis Wellen unterhalb von 350 nm als ultraviolettes Licht wieder unsichtbar werden. Röntgenstrahlen sind dabei kürzer als 1 nm und gehen schließlich in die noch kurzwelligeren Gammastrahlen über.

Jede Welle wird neben der Wellenlänge noch über die Amplitude, also die Höhe der Wellenberge charakterisiert. Dabei ist das Quadrat der Wellenamplitude proportional zur Intensität der einfallenden Strahlung. Das bedeutet, dass die Amplitude der Lichtwellen auf das zehnfache ansteigt, wenn die Intensität eines Lichtstrahls um den Faktor hundert vergrößert wird.



Gezeigt sind elektromagnetische Wellen zwischen 100 Meter (m) Wellenlänge und 10 Femtometer (fm) Wellenlänge. Ein fm ist der millionste Teil vom milliardsten Teil eines Meters. Der Bereich des sichtbaren Lichtes liegt zwischen 350 nm (violett) und 700 nm (dunkelrot). Es ist verblüffend, wie klein dieser Bereich im Vergleich zum gesamten Spektrum der elektromagnetischen Wellen ist.

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum und näherungsweise auch in Luft mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ aus. Das bedeutet, dass elektromagnetische Strahlung in einer Sekunde 300'000 km zurücklegt, also eine Strecke, die etwa dem 7.5 fachen des Erdumfangs am Äquator entspricht.

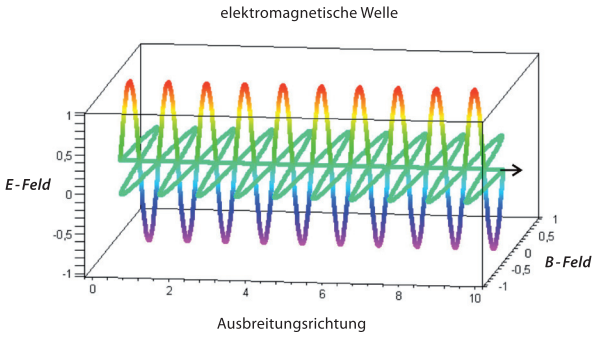
Elektromagnetische Wellen werden durch die Elektrodynamik mathematisch beschrieben. Mit Hilfe der Maxwellgleichungen wurde die Existenz der elektromagnetischen Wellen sogar prognostiziert und berechnet, bevor überhaupt der experimentelle Nachweis erfolgte, dass es elektromagnetische Wellen gibt (z.B. über den Nachweis der Abstrahlung von Energie aus einer Antenne, in der Elektronen hin und her schwingen).

Durch ein genaues Auswerten der Maxwellgleichungen kann gezeigt werden, dass elektromagnetische Wellen aus schwingenden elektrischen und magnetischen Feldern bestehen, die senkrecht aufeinander stehen und sich

gegenseitig erzeugen. Bei der Ausbreitung wird während einer Schwingung des elektrischen Feldes ein magnetisches Feld erzeugt, welches wieder ein elektrisches Feld bewirkt.

In der Abbildung sind elektrische und magnetische Wellen wie Seilschwingungen dargestellt, die sich in eine bestimmte Raumrichtung ausbreiten. Das ist ein sehr stark vereinfachtes Bild. Schließlich erfüllen elektromagnetische Schwingungen den gesamten dreidimensionalen Raum. Die in der Abbildung gezeigte Vorstellung ist demnach mehr wie die Stärke der elektrischen und magnetischen Felder entlang einer gedachten Linie zu verstehen.

In der Quantentheorie wurde gezeigt, dass elektromagnetische Wellen nur als Päckchen mit einer bestimmten Mindestenergie vorkommen. Das Bild von den elektromagnetischen Wellen wurde dabei durch ein Bild von elektromagnetischen Wellenpaketen ersetzt, die sich sowohl wie Teilchen als auch wie Wellen verhalten können. Dabei ist die Energie eines Wellenpäckchens um so größer, je kürzer die Wellenlänge ist. Deshalb sind die Quanten der sehr kurzwelligen Röntgen- und Gammastrahlung (elektromagnetische radioaktive Strahlung) sehr energiereich und entsprechend zerstörerisch in ihrer Wirkung auf Materie.



*Schematisch zeigt die Abbildung die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einer Dimension (entlang der **x-Achse**). Dabei stehen schwingende elektrische (bunt gezeigt entlang der **z-Achse**) und magnetische Felder (türkis entlang der **y-Achse**) senkrecht aufeinander.*

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Elektromagnetismus

Alle Phänomene, die auf Elektrizität oder Magnetismus zurückgeführt werden, gehören zum Elektromagnetismus. Die elektromagnetische Kraft ist neben atomaren Kräften und der Gravitation eine physikalische Grundkraft. Heute ist bekannt, dass fast alle Erscheinungen in unserer Umwelt außer der Erdanziehungskraft auf Elektromagnetismus beruhen und dementsprechend durch die Elektrodynamik beschrieben werden können.

Ausführliche Erklärung

Elektromagnetismus ist ein Ausdruck für die Gesamtheit elektrischer und magnetischer Erscheinungen. Unter Elektromagnetismus versteht man in der Physik ein vereinheitlichtes Verständnis von Elektrizität und Magnetismus. Die Theorie des Elektromagnetismus in der Physik ist die Elektrodynamik. Lange Zeit wurde in der Physik nicht sauber zwischen elektrischen und magnetischen Kräften unterschieden. Dabei kam es entweder zu Verwechslungen beider Erscheinungen oder aber die Forscher sahen gar keinen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus.

Erst 1820 erkannte Oersted, dass ein stromdurchflossener Leiter eine magnetische Kraftwirkung auf eine nahe angebrachte Kompassnadel ausübt und stellte somit fest, dass von bewegten Ladungen ein Magnetfeld ausgeht.

James Clerk Maxwell formulierte 1864 die Maxwellgleichungen und entwickelte dadurch die mathematischen Grundlagen der Elektrodynamik für eine vereinheitlichte Beschreibung des Elektromagnetismus. Demnach sind die Ladungen die Quellen für elektrische Felder. Magnetische Felder entstehen durch Ströme, also bewegte Ladungen, und zeitlich veränderliche elektrische Felder, die wiederum auch durch zeitlich veränderliche Magnetfelder entstehen.

Geladene Objekte üben elektrische Kräfte aufeinander aus. Es gibt positive und negative elektrische Ladungen. Gleichgeladene Körper (also beide negativ oder beide positiv geladen) stoßen sich ab und ungleich geladene (einer negativ, einer positiv) ziehen sich an. Dabei wurde festgestellt, dass die Kräfte verschwinden, wenn die Ladungen abgeleitet werden. Dies kann beispielsweise durch den Kontakt zu geerdeten Metallteilen oder einfach durch Berührung der geladenen Körper geschehen, wobei man sich jedoch einen elektrischen Schlag holen kann. Bei den Magneten wirkt eine Kraft, obwohl die Körper nicht geladen sind.

Die Kraftwirkung verschwindet nicht, wenn die Körper geerdet oder berührt werden. Dies liegt daran, dass die magnetischen Kräfte durch die Bewegung der Elektronen in der magnetischen Materie zu Stande kommt. Die Ladungsbewegung findet an den einzelnen Atomen des magnetischen Materials statt und es gibt keine überschüssige Ladung, die irgendwohin abfließen kann.

Von bewegten Ladungen gehen grundsätzlich magnetische Kräfte aus. Dabei entsteht immer ein Magnetfeld mit einem Nordpol und einem Südpol. Quellen des Magnetfeldes, wie die Ladungen die Quellen des elektrischen Feldes sind, gibt es nicht. Bei der Erzeugung eines Elektromagneten wird ein starker Strom durch eine Spule geschickt, wodurch eine starke magnetische Kraftwirkung entsteht.

Viele Erscheinungen des Elektromagnetismus, wie beispielsweise die Existenz elektromagnetischer Wellen, können aus den Maxwellgleichungen vorhergesagt und berechnet werden.

Neben dem Elektromagnetismus und den damit verbundenen Kräften existieren nur noch die Gravitation und Kernkräfte als physikalische Grundkräfte. Alle Erscheinungen in unserer Welt können durch diese Kräfte erklärt werden. Es ist dabei bemerkenswert, dass fast alle Kräfte und Erscheinungen, die wir im Alltag beobachten, elektromagnetischer Natur sind. Nur die Kräfte der Atomenergie sind merkliche Kernkräfte und die Anziehung der Körper durch die Erde sowie die Bewegung der Sterne, Planeten und Monde am Himmelsfirmament sind Erscheinungen der Gravitation.

In der Elektrodynamik werden die Theorien von Magnetismus und Elektrizität vollständig behandelt. Es ist dabei erstaunlich, wie die Elektrodynamik in der Physik herangezogen wird, um verschiedenste Erscheinungen zu erklären, die zunächst gar nicht deutlich als elektrische oder magnetische Phänomene erkennbar sind.

Die Stabilität der Materie selbst erklärt sich überwiegend durch Elektromagnetismus. In den Atomen umkreisen negativ geladene Elektronen den positiv geladenen Atomkern.

Härte, Farbe, Glanz, Form, Wärmeleitfähigkeit und viele andere Eigenschaften der Materie können über elektromagnetische Kräfte erklärt werden. Sämtliche messbare Energiestrahlung in unserer Umwelt (außer Teilchenstrahlen) sind elektromagnetische Wellen wie Radiowellen, Handystrahlen, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht- und Röntgenstrahlung. Sie unterscheiden sich nur durch ihre unterschiedlichen Wellenlängen.

Kennt man einige wenige Materialparameter so kann die Farbe, die elektrische Leitfähigkeit, die Reflexion an der Oberfläche, die Lichtdurchlässigkeit eines Stoffes oder die Brechung des Lichtes an der Oberfläche exakt berechnet werden. Dies gilt dabei nicht nur für Licht, sondern auch für Radiowellen, Röntgenstrahlung und alle anderen elektromagnetischen Wellen.

Ein grundlegendes Verständnis des Elektromagnetismus ist deshalb nicht nur bei der Entwicklung elektronischer Schaltkreise hilfreich sondern kann die verschiedenartigsten Phänomene in unserer Umgebung erklären.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

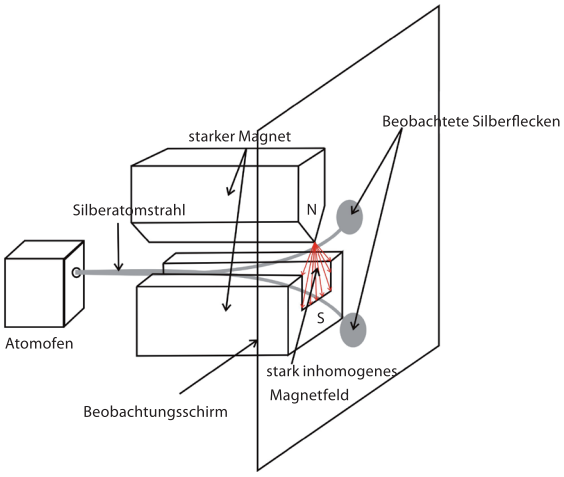
Elektronenspin

Der Elektronenspin ist eine Eigenschaft von Elektronen, die sich als magnetische Kraft in einem Magnetfeld bemerkbar macht. Es ist dabei schwierig zu sagen, was der Elektronenspin wirklich ist. Im sogenannten Stern-Gerlach Experiment kann jedoch gezeigt werden, dass es eine Kraftwirkung zwischen Magnetfeldern und Elektronen gibt, die nur durch den Elektronenspin erklärbar ist. Heute können viele magnetische Eigenschaften der Materie wie Para- und Ferromagnetismus durch den Elektronenspin erklärt werden.

Ausführliche Erklärung

Viele Elementarteilchen besitzen einen Spin. Während man sich die Masse oder die Ladung als Eigenschaften der Elementarteilchen gut vorstellen kann, ist dies beim Spin schwieriger. Ein Elektron beispielsweise hat eine Masse von $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg und eine Ladung von $-1.6 \cdot 10^{-19}$ C. Der Spin wird oft nur als Quantenzahl angegeben und beträgt bei Elektronen je nach Ausrichtung $+1/2$ (Spin "up") oder $-1/2$ (Spin "down"). Nach der Quantentheorie ist der Spin eine ähnliche Eigenschaft wie der Drehimpuls. In der Mechanik wird Drehimpuls z.B. durch eine Kreisbewegung verursacht. Der Spin ist im Gegensatz zu einer einfachen Kreisbewegung jedoch eine Eigenschaft, die grundsätzlich unveränderlich ist. Man kann den Spin zwar in seiner Richtung ändern, jedoch nicht verringern oder vergrößern. Der Spin wurde experimentell durch den Stern-Gerlach-Versuch beobachtet. Dabei wurden Silberatome durch ein starkes inhomogenes Magnetfeld geschickt.

Obwohl man vor dem Stern-Gerlach-Versuch angenommen hatte, dass Silberatome kein magnetisches Moment besitzen, wurde beobachtet, dass die Silberatome im Magnetfeld abgelenkt wurden, also eine magnetische Kraft auf die Silberatome wirkt. Die Hälfte der Atome wird beim Stern-Gerlach-Versuch in eine bestimmte Richtung abgelenkt, die andere Hälfte der Atome genau in die entgegengesetzte Richtung. Somit konnte mit dem Stern-Gerlach-Versuch nachgewiesen werden, dass die Atome doch ein magnetisches Moment besitzen, auf welches eine Kraft im inhomogenen Magnetfeld wirkt. Dieses magnetische Moment muss weiterhin zwei mögliche Einstellrichtungen besitzen. Die Physiker forderten deshalb eine Eigenschaft der Elektronen, welche die beobachtete magnetische Kraftwirkung erklärt. Diese Eigenschaft wurde dann als Elektronenspin bezeichnet. Vor dem Stern-Gerlach-Versuch war der Elektronenspin nicht bekannt, da es keinen Grund gab, eine solche zusätzliche Spin-Eigenschaft der Elektronen zu fordern. Erst das Experiment des Stern-Gerlach-Versuchs zeigte, dass es noch eine solche bisher unbekannte Eigenschaft geben muss. Der Elektronenspin wurde also aufgrund seines magnetischen Moments entdeckt und dann in die Quantentheorie zur Beschreibung der Elektronen eingebaut. Er kann, so wurde es gefordert, nur zwei Einstellrichtungen besitzen, nämlich Spin "up" oder Spin "down".



Beim Stern-Gerlach-Versuch werden Silberatome in einem Ofen verdampft. Die Atome (grau eingezeichnet) fliegen dann aus einer Öffnung in ein starkes und inhomogenes Magnetfeld (andeutungsweise rot eingezeichnet). Ein inhomogenes Magnetfeld besitzt eine stark unterschiedliche Stärke an verschiedenen Raumpunkten. Dadurch wirkt auf magnetische Momente eine Kraft, die zur einer Ablenkung der Atome auf Ihrer Flugbahn führt. Da die Silberatome keine wesentlichen magnetischen Momente (außer dem Elektronenspin) besitzen, hatte man vor Durchführung des Experimentes erwartet, dass die Atome nur schwach abgelenkt werden und auch nicht in bestimmte Vorzugsrichtungen, sondern in einer kontinuierlichen Verteilung. Beobachtet wurden jedoch 2 diskrete Flecken auf dem aufgestellten Beobachtungsschirm hinter dem Magnetfeld. Folglich muss es ein magnetisches Moment der Silberatome geben, das genau 2 Einstellmöglichkeiten besitzt und bisher noch nicht bekannt war. Dies führte zur Entdeckung des Elektronenspins.

Der Spin eines Teilchens hat bedeutende Konsequenzen für die Bewegung und den Aufenthaltsort des Teilchens. So dürfen nach dem Pauli-Prinzip zwei Elektronen in einem Atom nicht in allen Eigenschaften identisch sein. Bereits beim Aufbau des Periodensystems wurde festgestellt, dass sich in einem Zustand mit gleicher Energie und gleichem Drehimpuls in einem Atom immer genau 2 Elektronen aufhalten können. Diese 2 Elektronen müssen sich dann aber gerade in ihrem Spin unterscheiden. Beide Elektronen haben entgegengesetzt ausgerichteten Spin. Die magnetischen Momente dieser Spins kompensieren sich dann gegenseitig. Die Elektronen sind "gepaart". Besitzen Atome nur solche gepaarten Elektronen, so ist der Gesamtspin der Atome Null. Die Atome besitzen dann keinen resultierenden Gesamtspin, der sich in einem äußeren Magnetfeld ausrichten könnte und verhalten sich diamagnetisch.

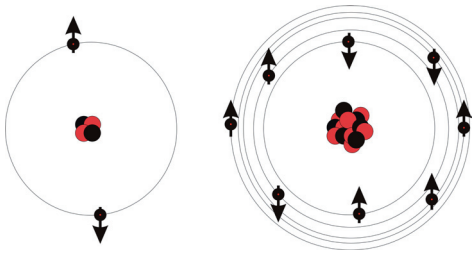
Die Silberatome des Stern-Gerlach-Versuchs besitzen jedoch ein sogenanntes ungepaartes Elektron. Ihr resultierender Gesamtspin entspricht in etwa dem Spin dieses Elektrons. Bei Sauerstoff beispielsweise sind sogar 2 Elekt-

ronen ungepaart und können sich im Magnetfeld ausrichten. In beiden Fällen spricht man von Paramagneten. Paramagnete richten ihre Spins in einem äußeren Magnetfeld aus und werden deshalb angezogen.

In manchen Materialien kommt es zu einer starken Wechselwirkung, der sogenannten Austauschwechselwirkung, zwischen den ausgerichteten Elektronenspins. Auch die Austauschwechselwirkung kommt durch das Pauli - Prinzip zu Stande. Ist die sie größer als die thermische Energie der Elektronen, so verhält sich das Material in einem äußeren Magnetfeld ferromagnetisch. Die Elektronenspins bleiben dann auch nach Abschalten des äußeren Magnetfeldes ausgerichtet, was als Remanenz, also als eine verbleibende Magnetisierung, gemessen werden kann.

Heute ist bekannt, dass auch Protonen und Neutronen einen Spin tragen, dessen magnetische Wirkung jedoch tausendmal kleiner ist als bei Elektronen. Der Spin der Protonen und Neutronen wird durch den Spin der Elementarteilchen, also der Quarks, gebildet, welche die Protonen und Neutronen aufbauen.

Nach dem Elementarteilchenmodell besitzen alle Elementarteilchen Spins unterschiedlicher Größe. Der Spin kann grundsätzlich über sein magnetisches Moment nachgewiesen werden. Nach den Maxwellgleichungen, den Gesetzen der Elektrizität und des Magnetismus, entsteht ein magnetisches Moment immer durch einen Strom, also eine Elektronenbewegung. Was der Elektronenspin wirklich ist kann bis heute nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Früher hat man sich den Spin als Drehung kugelförmiger Elementarteilchen um die eigene Achse vorgestellt.



Die Abbildung zeigt links schematisch die Elektronenkonfiguration von Helium (diamagnetisch) mit resultierendem Gesamtspin 0 und rechts die Elektronenkonfiguration von Triplett Sauerstoff mit einem resultierenden Gesamtspin 1. Die Spins der Elektronen sind als Pfeile eingezeichnet, welche das zugeordnete magnetische Moment symbolisieren. Beim Triplettsauerstoff sind 2 Elektronenspins ungepaart. Der Sauerstoff ist paramagnetisch. Das gezeigte Modell ist nicht exakt und hat lediglich illustrierenden Charakter.

Es führt jedoch zu Widersprüchen, sich den Spin der Elektronen als Drehung um die eigene Achse vorzustellen. Dies ist schon deshalb widersprüchlich, da die Elektronen nicht einfach geladene Kügelchen sind, wie man früher angenommen hatte. Vielmehr besitzen Elektronen bestimmte Eigenschaften von Wellen mit einer bestimmten Wellenlänge und bestimmte Eigenschaften von Kügelchen, wie zum Beispiel die Tatsache, dass man Elektronen gezielt aus einem Atom "herausschlagen" kann. Es ist physikalisch gesehen ausreichend zum Problem der Elektronenspins Stellung genommen, wenn man den Elektronenspin mit dem messbaren magnetischen Moment identifiziert oder auf Spinfreiheitsgrade in modernen mathematischen Theorien verweist.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Elementarmagnet

Ein Elementarmagnet ist das magnetische Moment an einem einzelnen Atom und hilft, die magnetischen Eigenschaften der Materie zu verstehen. Ferromagnetische Materialien können magnetisiert werden. Dies wird verständlich, wenn man annimmt, dass die Elementarmagnete im Material durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden können (siehe Abbildung). Die Ursache für Elementarmagnete an einzelnen Atomen sind die Atomaren Spins.

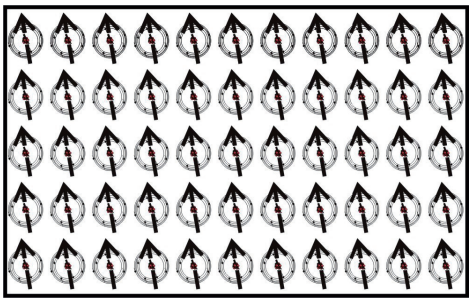
Ausführliche Erklärung

Die magnetischen Eigenschaften der Materie, also Ferromagnetismus, Paramagnetismus und Diamagnetismus, werden durch Elementarmagnete erklärt, die an jedem Atom eines para- und ferromagnetischen Festkörpers zu finden sind (siehe Abbildung).

Dabei handelt es sich überwiegend um Elektronenspins oder Kernspins, die als Atomare Spins eine magnetische Wirkung wie kleine Elementarmagnete besitzen. Derartige Elementarmagnete werden in der Physik als magnetische Momente bezeichnet.

Die magnetischen Kräfte von Permanentmagneten werden darüber erklärt, dass die Elementarmagnete an den einzelnen Atomen des Materials parallel ausgerichtet sind.

Tatsächlich findet man diese parallele Ausrichtung der Atomaren Spins in ferromagnetischen Stoffen, wenngleich nicht unbedingt im gesamten Material, so doch in den sogenannten Weißschen Bezirken. Man kann diese Ausrichtung sogar im Experiment sichtbar machen. Die ausgerichteten magnetischen Momente der Elementgarmagnete ermöglichen genau dann eine dauerhafte Magnetisierung, wenn die Kräfte, welche die parallele Ausrichtung der Elementarmagnete stabilisieren, groß genug sind. Die wichtigste Kraft hierbei ist die Austauschwechselwirkung der Elektronenspins. Sie führt in den Ferromagneten dazu, dass ausgerichtete Atomare Spins sich nicht wieder durch thermische Bewegung durchmischen können und deshalb eine dauerhafte Magnetisierung verbleibt.



Die Abbildung zeigt die Atomaren Spins an jedem Atom eines ferromagnetischen Materials, welche parallel ausgerichtet wurden. Diese Spins bilden Elementarmagnete. Das äußere Magnetfeld kommt durch die Wirkung der Summe aller Elementarmagnete zu Stande. Ein Ferromagnet (z.B. Eisen) mit derart parallel ausgerichteten magnetischen Momenten ist magnetisiert und wirkt wie ein Permanentmagnet.

Die Ausrichtung der Elementarmagnete kann aber durch Zuführen von thermischer Energie, also durch starkes Erhitzen, zerstört werden. Weitere Möglichkeiten der Entmagnetisierung sind starke Schläge auf den Magneten oder das Anlegen eines äußeren entgegengesetzt gerichteten Magnetfeldes. Dann nämlich durchmischen sich die einzelnen Elementarmagnete wieder und das außerhalb des Materials messbare Feld verschwindet.

Ein gutes Bild zur Wirkung von ausgerichteten Elementarmagneten kann man durch ein Set von magnetischen Kompassnadeln gewinnen, welche drehbar auf einer Platte angeordnet sind. Die Kompassnadeln ordnen sich aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung in gewissen Bereichen parallel an. Ähnlich zu den Weißschen Bezirken im nicht magnetisierten Ferromagneten. Wenn man von außen mit einem Permanentmagneten über die Platte streicht, so vereinigen sich verschiedene Weißsche Bezirke indem sich die Kompaßnadeln alle untereinander parallel anordnen. Dies passiert auch mit den Elementarmagneten in ferromagnetischen und paramagnetischen Materialien, wenn diese in ein äußeres Magnetfeld eingebracht werden. Der Unterschied des Paramagneten im Vergleich zum Ferromagneten besteht darin, dass die Ausrichtung der Elementarmagnete im Paramagneten nicht stabil ist, im Ferromagneten dagegen schon. Diamagnete besitzen gar keine Elementarmagnete, die ausgerichtet werden könnten.

Die meisten Elektromagnete besitzen einen ferromagnetischen Eisenkern, dessen Elementarmagnete durch das magnetische Feld des Elektromagneten ausgerichtet werden und es um ein Vielfaches verstärken.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Energieprodukt

Das Energieprodukt ist ein Maß für die magnetische Energie, die in einem Magneten gespeichert ist. Diese magnetische Energie kommt durch die potentielle Energie aller ausgerichteten magnetischen Momente zu Stande. Je größer das Energieprodukt ist, desto größer sind auch die magnetischen Kräfte, die von dem Magneten ausgehen. Man spricht von Energie "produkt", weil es als Produkt aus Magnetfeldstärke und magnetischer Flussdichte bestimmt wird.

Ausführliche Erklärung

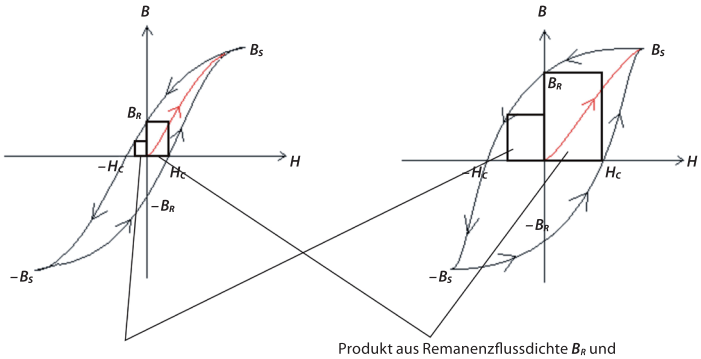
Das Energieprodukt *E* eines Magneten ist das Produkt aus der magnetischen Flussdichte *B* und der magnetischen Feldstärke *H* Es gilt also: $E = B \cdot H$.

Den Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte bei der Magnetisierung bzw. Entmagnetisierung beschreibt die sogenannte Hysteresekurve. Wenn man die Hysteresekurve betrachtet, so fällt dabei zum Beispiel die Remanenz bzw. Remanenzflussdichte ins Auge. Dies ist die verbleibende Magnetisierung im Material, wenn keine äusseren Felder vorliegen.
Die magnetische Feldstärke, welche notwendig ist, um die magnetische Flussdichte im Material verschwinden zu lassen, ist die sogenannte Koerzitivfeldstärke.

Sie finden diese Angaben als gültige Werte in der Übersichtstabelle der physikalischen Magnetdaten.

Zur Berechnung des Energieproduktes darf man nun jedoch nicht einfach die magnetische Remanenzflussdichte mit der Koerzitivfeldstärke multiplizieren, wie sie in dieser Tabelle benannt sind. Multipliziert man diese beiden Grössen, so ist das Ergebnis etwa einen Faktor vier grösser als das "echte" maximale Energieprodukt.

Am besten kann man sich die genannten Grössen und die Berechnung des maximalen Energieproduktes anhand der folgenden Grafik typischer Hysteresekurven verdeutlichen:



maximales Energieprodukt

Produkt aus Remanenzflussdichte B_R und Koerzitivfeldstärke der Flussdichte bH_c

Hysteresekurven für ein magnetisch weiches Material (links) und ein magnetisch hartes Material (rechts). Für das noch unmagnetisierte Material zeigt die rote "Neukurve" den Verlauf der Magnetisierung über dem äusseren Feld an. Dabei gilt die jeweils obere Kurve für den Verlauf von der Sättigungsflussdichte B_S zu $-B_S$, also für die Entmagnetisierung und die untere Kurve für den Verlauf von $-B_S$ zu B_S, die Magnetisierung, wie durch die Pfeile dargestellt.

Typische Punkte der Hysteresekurve sind das Koerzitivfeld H_c, welches nötig ist, um die Magnetisierung des Materials durch das äussere Feld zu kompensieren, die Remanenz B_R, welche die verbleibende Flussdichte bei verschwindendem äusseren Feld bezeichnet und die Sättigungsflussdichte B_S, bei der alle Elektronenspins ausgerichtet sind. Während das Produkt aus B_R und H_c im ersten Quadranten (zwischen 0 und 3 Uhr) beider Grafiken eingezeichnet ist (als schwarzes Rechteck) wird das maximale Energieprodukt über die Entmagnetisierung bestimmt. Man hat ein Material vorliegen und misst die enthaltene Energie durch einen Entmagnetisierungsprozess. Per Definition ist das maximale Energieprodukt dabei das grösstmögliche Rechteck (Produkt) aus H und B, welches im 4. Quadranten (und symmetrisch dazu im 2. Quadranten) unter die Hysteresekurve "passt". Wie man sieht, ist die Fläche dieses maximalen Energieproduktes deutlich kleiner als das Produkt aus B_R und H_c

Das Energieprodukt ist proportional zur Menge an Energie, die pro Volumeneinheit in einem Magneten gespeichert ist. Diese Energiemenge pro Volumen des Magneten ist die Energiedichte *w*. Die exakte Berechnung der Enegiedichte zeigt, dass diese im einfachsten Fall einer Magnetisierung, die proportional zum Magnetfeld steigt, gerade die Hälfte des Energieproduktes ist:

$$w = \frac{1}{2} \cdot E = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H$$

Die gesamte Menge an magnetischer Energie *W* in einem Magneten ist das Produkt aus Energiedichte *w* und Volumen *V* ($W = w \cdot V$). Multipliziert man also die Hälfte des Energieproduktes mit dem Volumen des Magneten, so kommt man auf die Gesamtmenge an Energie, welche in einem Magneten gespeichert ist:

$$W = w \cdot V = \frac{1}{2} \cdot E \cdot V = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V$$

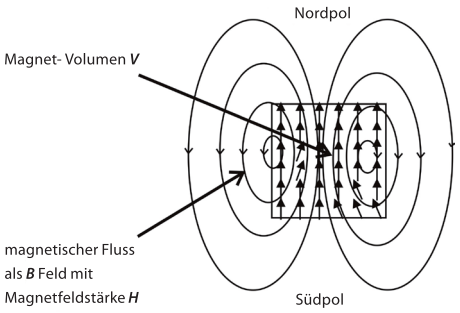
Die Einheit für das Energieprodukt ist das Produkt aus Tesla (N/Am) und Oersted (1 Oe = 79.577 A/m). Dies ergibt eine Einheit der Dimension N/m^2 bzw. J/m^3, also der Dimension Energie pro Volumen.

Aus dem Energieprodukt eines Magneten und der Fläche des Nord- bzw. Südpols kann die Kraft zwischen zwei Magneten oder auch die Kraft zwischen einem Magneten und einem ferromagnetischen Material (z.B. Eisen)

näherungsweise berechnet werden. Für zwei zylinderförmige Magneten mit der Polfläche ***A*** und dem Energieprodukt ***E*** gilt für die magnetische Kraft ***F***:

$F = A \cdot E$

Das bedeutet: Verdoppelt man die haftende Fläche eines Magneten bei gleicher Energiemenge pro Volumen (beschrieben durch das Energieprodukt), so verdoppelt sich die Kraft, mit der der Magnet an einer Eisenplatte haftet. Verdoppelt man dagegen das Energieprodukt bei gleichem Volumen und gleicher haftender Fläche, so verdoppelt sich die Kraft ebenfalls.



*Die Menge an magnetischer Energie in einem Permanentmagneten hängt ab vom Produkt aus magnetischer Flussdichte B und Magnetfeld **H** sowie dem Volumen des Magneten **V**. Die magnetische Energie ist eine potenzielle Energie aller ausgerichteten Elementarmagnete im Material, die den magnetischen Fluss erzeugen.*

Bei einem Permanentmagneten ist das ***B-Feld***, also die magnetische Flussdichte, gleich der Remanenz. Die Remanenz gibt die Magnetisierung an, welche im Material vorliegt. Das Magnetfeld ***H*** im Permanentmagneten ist proportional zur Remanenz, berücksichtigt aber Materialeigenschaften wie die magnetische Permeabilität μ. Es gilt:

$$H = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot B$$

Somit gilt:

$$E = B \cdot H = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot B^2.$$

Die Energiedichte eines magnetisierten Materials ist also proportional zum Quadrat der Remanenz. Bei doppelter Magnetisierung ist die vierfache Menge an magnetischer Energie in dem Material gespeichert. Das bedeutet, dass bei doppelter Magnetisierung die Kräfte eines Magneten auf das Vierfache steigen. Man kann sich diese Tatsache anschaulich vorstellen:

Verdoppelt man das Magnetfeld eines Magneten, so werden bei der Magnetisierung eines Materials im Feld dieses Magneten die Atomaren Spins "doppelt" so stark ausgerichtet. Jeder dieser Spins wirkt wie ein Elementarmagnet und wird nun wiederum doppelt so stark angezogen. Also ist die gesamte Kraftwirkung und auch die Gesamtmenge an Energie im Magneten bei doppeltem Feld viermal so gross.

Mathematisch bestimmt sich die Energiedichte ***w*** als Integral der magnetischen Feldstärke ***H*** über der magnetischen Flussdichte ***B***:

$$w = \int H dB$$

Den Zusammenhang $w = 1/2 \cdot B \cdot H$ zwischen ***B-Feld***, ***H-Feld*** und der Energiedichte w bekommt man nur für Magnete, deren magnetischer Fluss B proportional zur magnetischen Feldstärke ***H*** ist. Dies ist zwar meist nicht exakt der Fall, oft aber näherungsweise gut erfüllt.

Die Kraftdichte entlang einer Richtung ist die Änderung der Energiedichte entlang dieser Richtung. Die Kraft ist also proportional zur Ortsableitung des Energieproduktes.

Diese Vorstellung entspricht exakt dem Bild, dass jedes System allgemein in ein energetisches Minimum strebt. Ausserhalb eines energetischen Minimums zeigt die Ortsableitung der Energie an die Stelle, wo sich das Minimum der Energie befindet. Am Ort des Minimums verschwindet die Ableitung dagegen. Ursache für das Wirken von magnetischen Kräften kann ebenso als das Bestreben eines Systems aus Magneten und ferromagnetischen Materialien, ein energetisches Minimum anzustreben, verstanden werden.

Setzt man die magnetische Flussdichte B und die magnetische Permeabilität μ in die Kraftformel $F = A \cdot E$ ein, so gilt für die magnetische Kraft F:

$$F = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot A \cdot B^2$$

Die Kraft ist also proportional zur Querschnittsfläche A und proportional zum Quadrat der magnetischen Flussdichte B eines Magneten.

Wegen $w = \frac{1}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot B^2$ wird die Energiedichte besonders klein, wenn μ gross ist. Für ferromagnetische Materialien ist μ sehr gross (z.B. 1'000 – 10'000 für Eisen). Bewegt man den Magneten vom Eisen weg, dann ist die Energiedichte der Luft welche den Magneten umgibt grösser als die Energiedichte wäre, wenn die Feldlinien des Magneten durch Eisen laufen würden. Das System befindet sich also nicht im energetischen Minimum, so lange nicht möglichst viel Feldlinien durch das Eisen laufen. Dies äussert sich als eine Kraft, die versucht, den Magneten wieder zum Eisen hinzubewegen.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

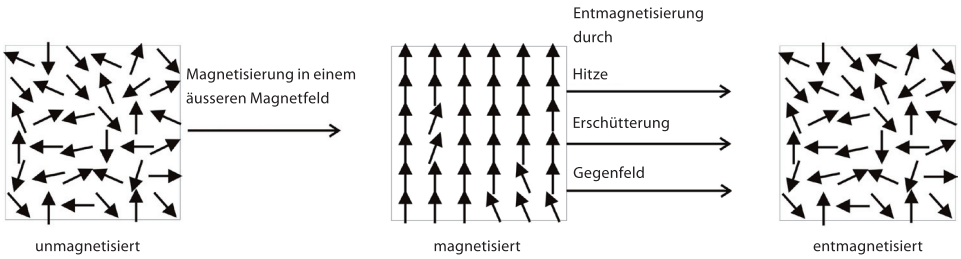
Entmagnetisierung

Eine Entmagnetisierung ist ein Vorgang bei dem das Magnetfeld eines Magneten verschwindet. Dies kann durch harte Schläge auf den Magneten (bzw. allgemein starke mechanische Beanspruchung des Materials), durch starkes Erhitzen oder durch ein sehr starkes äußeres Magnetfeld geschehen. Nach einer Entmagnetisierung sind die magnetischen Kräfte des Magneten verschwunden. Eine erneute Magnetisierung kann das Magnetfeld wieder herstellen, wenn das Material nicht vollkommen zerstört wurde.

Ausführliche Erklärung

Ein ferromagnetischer Stoff wird in einem äußeren Magnetfeld selbst magnetisiert. Auch nicht ferromagnetische Stoffe (z.B. Dia- und Paramagnete) lassen sich magnetisieren, jedoch ist der Effekt in diesen Materialien deutlich schwächer. Bei Dia- und Paramagneten verschwindet die Magnetisierung auch wieder, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird. Bei ferromagnetischen Stoffen beobachtet man eine verbleibende Magnetisierung, die sogenannte Remanenz.

Die Magnetisierung von Ferromagneten verschwindet nicht von alleine. Sie kann jedoch durch eine Entmagnetisierung aufgehoben werden. Eine Entmagnetisierung kann durch starke Stöße, durch Hitze oder durch ein starkes magnetisches Feld mit umgekehrter Polarisation erreicht werden.



Magnetisierung kommt durch eine Ausrichtung der magnetischen Momente der elementaren Elektronenspins (schwarze Pfeilspitzen) durch ein äußeres Magnetfeld zu Stande. Entsprechend wird die Magnetisierung aufgehoben (Entmagnetisierung), wenn diese Ausrichtung wieder zerstört wird.

Als Experiment braucht man dazu nur ein eisenhaltiges Material einem starken äußeren Magnetfeld auszusetzen. Nachdem der äußere Magnet entfernt wurde, wird das Material, z.B. eine Schere, immer noch leicht magnetisch bleiben und leichte eisenhaltige Objekte, z.B. Stecknadeln, anziehen. Wenn man diese Schere jedoch stark an eine harte Kante schlägt, verschwindet die Magnetisierung wieder. Die Schere wird wieder entmagnetisiert.

Physikalisch besitzen die Elektronen in Ferro- und Paramagneten an jedem Atom magnetische Momente der Elektronenspins, welche sich wie winzige Elementarmagnete in der Materie verhalten. Zusätzlich werden die Elektronenspins in Ferromagneten noch durch eine starke Wechselwirkung, die sogenannte Austauschwechselwirkung, untereinander stabilisiert. Wird ein ferromagnetisches Material magnetisiert, so richten sich die Elektronenspins parallel aus und stabilisieren sich gegenseitig durch die Austauschwechselwirkung. Diese Wechselwirkung verhindert, dass sich die ausgerichteten Elektronenspins wieder durchmischen und die Magnetisierung verloren geht.

Eine Entmagnetisierung kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden. Am einfachsten ist eine starke Erschütterung des Materials. Dadurch wird die Stabilisation der ausgerichteten Elektronenspins zerstört.

Ebenso führt eine starke Erwärmung zur Entmagnetisierung. Durch Erwärmung steigt die Bewegungsenergie der Elektronen an und die ausgerichteten Spins werden durch die Bewegung durchmischt, wenn die Temperatur über die sogenannte Curie-Temperatur steigt. Auch das Anlegen eines starken Gegenfeldes, welches entgegen den ausgerichteten Elementarmagneten, den Elektronenspins, gepolt ist, hebt die Magnetisierung auf. Dies wird erreicht, wenn eine bestimmte für das ferromagnetische Material typische Feldstärke, die sogenannte Koerzitivfeldstärke, überschritten wird.

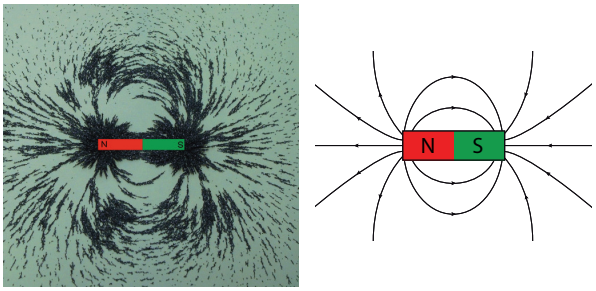
Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Feldlinien

Feldlinien sind gedachte Linien, die den Verlauf eines Magnetfeldes darstellen. Dabei werden die Feldlinien um so dichter gezeichnet, je stärker das Magnetfeld ist. Man kann an die Feldlinien auch eine Pfeilspitze zeichnen, die dann, so wurde es festgelegt, vom Nordpol zum Südpol des Magneten zeigt. Eisenpulver ordnet sich entlang der Feldlinien in linienförmigen Strukturen in einem Magnetfeld an. So können die Feldlinien eines Magnetfeldes im Experiment sichtbar gemacht werden.

Ausführliche Erklärung

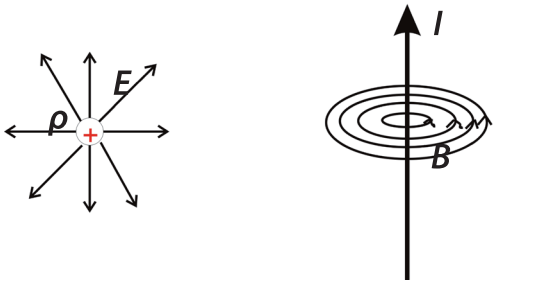
Magnetische Feldlinien veranschaulichen das Magnetfeld. Sie haben jedoch auch eine echte physikalische Bedeutung, weil durch die Dichte der Feldlinien die Stärke der magnetischen Kräfte und durch die Richtung der Feldlinien die Richtung der magnetischen Kräfte angezeigt wird. Streut man Eisenpulver auf ein Blatt Papier, unter dem sich ein Magnet befindet, so ordnen sich die Eisenkörnchen in linienförmigen Strukturen an und scheinen die magnetischen Feldlinien direkt abzuzeichnen.



Links ist das experimentelle Ergebnis gezeigt, wenn Eisenpulver auf ein Blatt Papier gestreut wird, unter dem sich ein Stabmagnet befindet. Das Eisenpulver scheint sich dabei entlang der Magnetfeldlinien anzuordnen. Rechts ist schematisch der Verlauf der Feldlinien eines Stabmagneten mit der festgelegten Richtung vom Nord- (rot) zum Südpol (grün) angedeutet.

Die Feldlinien laufen immer vom Nordpol zum Südpol eines Magneten und stehen senkrecht auf der Oberfläche des Magneten. Die Feldlinien enden allerdings nicht am Südpol sondern laufen im Innenraum des Magenten durch das Material des Magneten zurück zum Nordpol. Der Grund hierfür ist, dass es keine Quellen oder Senken des Magnetfeldes gibt. Es gibt also keinen Stoff, aus dem magnetische Feldlinien herauslaufen ohne wieder hineinzulaufen und umgekehrt. Dies ist physikalisch so zu verstehen, dass es keine magnetischen Ladungen gibt wie beispielsweise eine positive oder eine negative elektrische Ladung. Nur von diesen Quellen aus würden Feldlinien geradlinig verlaufen.

Grundsätzlich sind die Feldlinien des Magnetfeldes immer geschlossene Linien ohne Anfang und Ende, weil das Magnetfeld, wie durch die Maxwellgleichungen mathematisch beschrieben, ein Wirbelfeld ist. Aus den Maxwellgleichungen folgt unmittelbar, dass alle gedachten Linien entlang des Magnetfeldes geschlossen sind, weil es keine einzelnen magnetischen Ladungen gibt.



Von einer elektrischen Ladung gehen die Feldlinien des elektrischen Feldes E als sogenanntes "Igelfeld" geradlinig aus (links). Die magnetische Flussdichte bildet dagegen immer geschlossene Feldlinien (rechts). Das elektrische und das magnetische Feld füllen den gesamten Raum aus. Die Abbildung zeigt nur schematisch einige wenige Feldlinien zur Andeutung des Unterschiedes zwischen elektrischen und magnetischen Feldern.

Feldlinien sind relevant bei Überlegungen zur Kraftwirkung von Magneten.

Veranschaulicht man diese Kraftwirkung durch die Feldlinien, so gilt, dass die Kraft eines Magneten auf einen winzigen Probemagneten tangential zu den Feldlinien wirkt. Außerdem ist die Stärke der Kraft proportional zur Dichte der Feldlinien im Bereich des Probekörpers. Konstruiert man geometrisch die Feldlinien und betrachtet deren Dichte so kann mit Hilfe der Feldlinien die Kraft des Magneten für bestimmte Abstände von einem Probemagneten oder einem ferromagnetischen Material abgeschätzt werden. Umgekehrt kann man sich den Verlauf der Feldlinien aus den Kraft- und Energiesätzen der Physik überlegen.

Bringt man den Nordpol eines Magneten in die Nähe eines ferromagnetischen Materials (z.B. Eisen), so dringen die Feldlinien in dieses Material ein. Dies muss so sein, da auch das Eisen magnetisiert wird. Das Eisen richtet dem Nordpol des Magneten seinen durch Magnetisierung entstandenen Südpol entgegen, so dass die Feldlinien des Nordpols des Magneten direkt zum Südpol des magnetisierten Eisens zeigen. Auf der Rückseite des Eisenkörpers oder, allgemeiner gesprochen, von dem Bereich des Nordpols des magnetisierten Eisens ausgehend, verlaufen die Feldlinien dann zurück zum Südpol des Magneten.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Gauß / Tesla

Gauß und Tesla sind verschiedene Maßeinheiten für die magnetische Flussdichte. Es gilt 10'000 Gauß = 1 Tesla. Oft wird einfach die Stärke eines Magnetfeldes in Tesla angegeben, was formal nicht ganz richtig ist, da die magnetische Flussdichte etwas anders definiert ist als das Magnetfeld. Gauß war ein Mathematiker des 19. Jahrhunderts, der 1831 dazu beigetragen hat, das Magnetometer zur Messung von Magnetfeldstärken zu entwickeln. Tesla war ein Physiker des 19./20. Jahrhunderts der sich sehr breit mit Elektromagnetismus beschäftigt hat.

Ausführliche Erklärung

Die magnetische Flussdichte welche in der Physik durch den Buchstaben *B* abgekürzt wird, wird in den Einheiten Gauß bzw. Tesla gemessen. Dabei gilt: 10'000 Gauß = 1 Tesla. Ein magnetisiertes ferromagnetisches Material wird zu einem Magneten, dessen Stärke durch die Remanenz beschrieben wird. Somit sind Gauß und Tesla auch die Einheiten der Remanenz eines Permanentmagneten.

Die Einheit Gauß ist eine aus den natürlichen oder grundlegenden Einheiten im sogenannten "cgs System" zusammengesetzte Einheit für die magnetische Flussdichte. Das cgs-System benutzt als grundlegende Einheiten unter anderem die Längeneinheit cm, die Masseneinheit Gramm (g) und die Zeiteinheit Sekunde (s). Entsprechend ist die Einheit Tesla die Einheit der magnetischen Flussdichte im heute gültigen SI-System. Im SI-System werden statt Gramm Kilogramm, statt Zentimeter Meter und ebenfalls die Sekunde für die Zeitmessung verwendet.

Da die magnetische Feldstärke und damit die magnetische Flussdichte aus der Kraft zwischen bewegten Ladungen berechnet werden kann, ist die Einheit Gauß bzw. Tesla selbst keine grundlegende Einheit. Es gilt der Zusammenhang

$$1T = 1\frac{N}{A \cdot m}$$

1 Tesla ist also ein Newton pro Ampere und pro Meter. Dies bedeutet, dass 1 Tesla genau derjenigen magnetischen Flussdichte entspricht, die auf einen Leiter von 1 Meter Länge, durch den 1 Ampere Strom fließt, exakt 1 Newton Anziehungskraft ausübt. (Aufgrund der magnetischen Wirkung des Stroms im Leiter).

Die magnetische Feldstärke *H* kann aus der magnetischen Flussdichte *B* bestimmt werden. Dazu muss die magnetische Flussdichte *B* durch die Permeabilität des Materials μ und die Permeabilität des Vakuums μ_0 dividiert werden:

$$H = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot B$$

Oftmals findet man in der Literatur auch die Einheit Tesla als Maß für die Magnetfeldstärke. Dies ist jedoch nicht ganz richtig. Wie erwähnt, sind Gauß und Tesla die Einheiten der magnetischen Flussdichte und die magnetische Feldstärke selbst wird im SI System in der Einheit Ampere pro Meter (A/m) bzw. Oersted (1 Oersted = 79.577 A/m) angegeben.

Die Einheiten Gauß und Tesla der magnetischen Flussdichte wurden zu Ehren des Mathematikers Johann Carl Friedrich Gauß bzw. des Erfinders und Ingenieurs Nikola Tesla nach deren Namen benannt.

Johann Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855) war nicht nur Mathematiker sondern ein vielfach interessierter Mann, der auf den Gebieten der Mathematik, der Astronomie und der Physik herausragende Entdeckungen machte. Am bekanntesten ist die von Gauß entdeckte "Gaußsche Glockenkurve", welche in der Statistik auch als Normalverteilung bezeichnet wird. Die Normalverteilung beschreibt physikalisch richtig die Verteilung von zufälligen Messwerten. Erst 1831 hat Gauß dazu beigetragen, das Magnetometer zu entwickeln, ein Messgerät für Magnetfeldstärken. Er hat auch zur Erfindung des ersten elektromagnetischen Telegraphen beigetragen. Gauß entwickelte mit dem Physiker Weber zusammen das cgs-Einheitensystem.

Nikola Tesla (1856 – 1943) war ein Elektroingenieur, der Zeit seines Lebens zahlreiche Erfindungen auf dem Bereich der Wechselstromtechnik gemacht hat. Er hat unter anderem dazu beigetragen, dass die Wechselstromtechnik zur Energieübertragung im heutigen Stromnetz verwendet wird und nicht eine Gleichstromtechnik, wie sie von Edison entwickelt worden war. Zu den Erfindungen Teslas gehören unter anderem der Tesla Transformator zur Erzeu-

gung von Wechselströmen mit hoher Frequenz, der erste Radiosender und die erste Fernsteuerung. Tesla hat Zeit seines Lebens daran gearbeitet, elektromagnetische Energie kabellos durch elektromagnetische Wellen zu übertragen. Dabei hatte er bereits Überlegungen angestellt, die Reflexion der Strahlung an der Erdatmosphäre zu nutzen, um die Energie über weite Strecken entlang der Erdoberfläche zu transportieren.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Güte

Die Güte ist ein Zahlenwert, der den Energieinhalt eines Magneten bemisst. Bei einer Güte von 40 – 50 kann man mit einem Stabmagneten mit nur 1 cm Durchmesser und ebener Fläche des Nord- oder Südpols schon einen 5 kg schweren Eisenblock anheben. Wird die Güte als Zahl mit einem vorangestellten Buchstaben angegeben, so bezeichnet der Buchstabe nach einer festgelegten Tabelle die maximale Einsatztemperatur.

Ausführliche Erklärung

Die Güte eines Magneten entspricht dem sogenannten Energieprodukt. Das Energieprodukt ist das Produkt aus der magnetischen Flussdichte ***B*** und der magnetischen Feldstärke ***H*** und ist physikalische ein Maß für die pro Volumeneinheit gespeicherte magnetische Energie. Magnete besitzen eine Kraftwirkung proportional zu ihrem Energieprodukt, wenn Magnete gleicher Größe verglichen werden. Sind zwei Magnete gleich groß und gleich geformt, so hat ein Magnet mit einem doppelten Energieprodukt im Vergleich zu einem anderen Magneten auch die doppelte Kraftwirkung.

Das Energieprodukt kann in Gauss Oersted gemessen werden. 1 Gauss Oersted ist das Produkt aus der Einheit Gauss für die magnetische Flussdichte (man könnte auch die Einheit Tesla verwenden) und der Einheit Oersted für die magnetische Feldstärke. Durch den ungewöhnlichen Umrechnungsfaktor 1 Oersted = 79.577 A/m besitzt das Energieprodukt in den Standardeinheiten der Energiedichte J/m^3 einen grundsätzlich anderen Zahlenwert als in den Einheiten GaussOersted. Es gilt: 1'000 Gauss Oersted = 7.9577 J/m^3.

Typischerweise haben gute Permanentmagnete einige hundert kJ/m^3 magnetische Energie gespeichert. Dies sind einige zehn Mega-Gauss Oersted (MGOe). Die Güte eines Magneten wird nun als Zahl angegeben. Der Zahlenwert entspricht dem Energieprodukt in der Einheit MGOe.

Neben dem Zahlenwert für das Energieprodukt findet man bei der angegebenen Güte eines Magneten oft noch einen Buchstaben zur Bezeichnung der maximale Einsatztemperatur. Die maximale Einsatztemperatur von Permanentmagneten ist begrenzt, da ein Permanentmagnet durch Remanenz nach Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials entsteht. Die Remanenz verschwindet spätestens dann vollständig, wenn die materialspezifische Curie-Temperatur überschritten wird.

Auch bei niedrigerem Erwärmen kann es jedoch zu einer teilweisen Entmagnetisierung kommen. Deshalb sollte die maximale Einsatztemperatur nicht überschritten werden. Es gilt als Konvention, dass Magnete mit dem Buchstaben N bis 80 °C, M bis 100 °C, H bis 120 °C, SH bis 150 °C, EH bis 180 °C und UH bis 200 °C eingesetzt werden können. Die Gütebezeichnung N45 charakterisiert also einen Magneten mit einem Energieprodukt von 45 MGOe (358 kJ/m^3), der bis 80 °C eingesetzt werden kann.
Ein solcher Magnet hätte bei einer Dicke von einigen cm und einer Polfläche des Nordpols bzw. Südpols von etwa 20 cm^2 eine Haftkraft an Weicheisen von über 1'000 N. Man könnte mit so einem Magneten also einen 100 kg schweren Eisenblock anheben. Der Buchstabe N weist jedoch darauf hin, dass die magnetischen Kräfte oberhalb von 80 °C verloren gehen können. Der Magnet würde auch nicht wieder haften, wenn er abgekühlt wird. Er müsste erneut magnetisiert werden.

Ein Magnet der Güte M50 statt N45 könnte bis 100 °C eingesetzt werden und hätte bei gleicher Größe etwa 10 % mehr magnetische Energie. Da die magnetischen Kräfte von der magnetischen Energie abhängen, haben Magnete mit höherer Güte auch stärkere Kraftwirkungen als Magnete niedrigerer Güte. Der M50 Magnet ist damit im Gegensatz zum N45 Magnet nicht nur wärmeresistenter sondern hätte bei gleicher Größe auch eine etwa 10 % größere Haftkraft (Er hat das 50/45 = 1.11-fache an Energieprodukt und damit auch die 1.11-fache magnetische Kraftwirkung). Die bezeichnete Haftkraft hängt jedoch stark von der Form des Magneten, der Beschaffenheit der Oberflächen und von der Reinheit des angezogenen Eisens ab. Es handelt sich um idealisierte, errechnete Werte. Ist die Oberfläche des Eisenblocks rau oder ist das Material beschichtet oder aber hat der Magnet keine ebene Polfläche, so reduziert sich die Haftkraft entsprechend.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Hall-Sonde

Eine Hall-Sonde ist ein Messgerät zur Bestimmung der Stärke von Magnetfeldern. Meist zeigt eine Hall-Sonde die magnetische Flussdichte in Tesla an. Der zugrundeliegenden Effekt der Hall-Sonde, der Halleffekt, wurde 1879 von dem Physiker Edwin Hall entdeckt. Der Halleffekt besagt, dass in einem stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Spannung senkrecht zur Richtung des Stromflusses herrscht. Grund dafür ist die Lorentzkraft, die auf die Elektronen wirkt.

Ausführliche Erklärung

Eine Hall-Sonde ist ein Messgerät zur Bestimmung der Stärke von Magnetfeldern. Das Magnetfeld selbst wird in A/m (Ampere pro Meter) oder Oersted gemessen. In Naturwissenschaften und Technik ist man jedoch mehr an die Maßeinheit Tesla gewöhnt, die für die magnetische Flussdichte verwendet wird. Deshalb zeigen die Hall-Sonden meist den Wert der magnetischen Flussdichte in Tesla an. Ebenso könnte eine Hall-Sonde konstruiert werden, die in einem Magnetfeld direkt den Wert für die Kraft auf ein bestimmtes Eisenstück angibt.

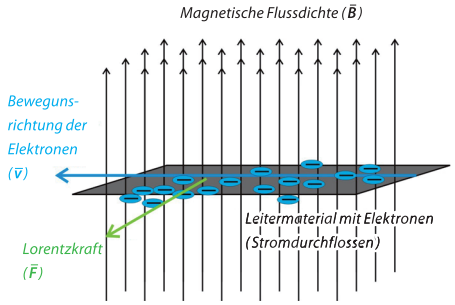
Die Hall-Sonde nutzt den Halleffekt zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte. Aufgrund der Lorentzkraft wirkt auf Ladungsträger, die sich in einem Magnetfeld bewegen, eine Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Diese werden also zu einer Seite des Ladungsträgers hingedrängt.

Gefunden hat den Halleffekt der Physiker Edwin Hall im Jahr 1879.

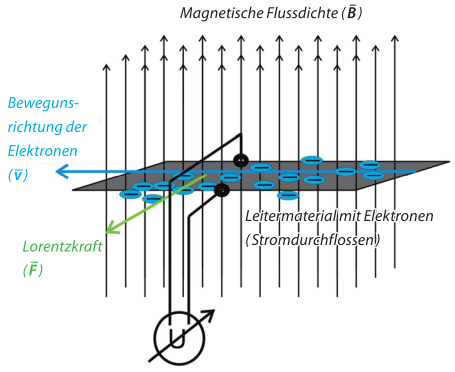
Die Lorentzkraft ist eine Kraft, die immer auf bewegte Ladungen in Magnetfeldern wirkt. Wenn man nun einen Strom an ein Metallplättchen anlegt, welches sich in einem Magnetfeld befindet, so wirkt eine Kraft auf die Träger des Stroms, also die Elektronen.

Die Richtung der Kraft steht dabei senkrecht auf die Bewegungsrichtung der Elektronen und senkrecht auf das Magnetfeld. Die Formel für die Lorentzkraft $\vec{F}$ auf Ladungsträger der Geschwindigkeit $\vec{v}$ in der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ lautet $\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$, wobei q die Ladung bezeichnet. Für Elektronen gilt demnach , da die $\vec{F} = -e\vec{v}\times\vec{B}$ Ladung des Elektrons gerade eine negative Elementarladung e beträgt. Auf positive Ladungen würde gerade eine entgegengesetzt gerichtete Kraft wirken. Der Halleffekt kann also auch genutzt werden, um festzustellen, dass die Teilchen, die beim Stromfluss in Bewegung sind (also die Elektronen), eine negative Ladung tragen und keine positive.

Im stromdurchflossenen Plättchen der Hall-Sonde werden die Elektronen nun senkrecht aus ihrer Bewegungsrichtung verschoben und sammeln sich in Richtung einer Seite des Plättchens. Dadurch kommt es über der Breite des Plättchens zu einer elektrischen Spannung, die proportional zum Magnetfeld ist, welches gemessen werden soll. Aus dem Wert der sogenannten Hall-Spannung ***U*** über dem Plättchen kann also mit Hilfe einer weiteren Umrechnung der gleichzeitig wirkenden elektrischen Kräfte, die mit der Lorentzkraft im Gleichgewicht sind, direkt das äußere Magnetfeld angegeben werden, in welchem sich das Plättchen befindet.



*Der Halleffekt äußert sich als Auslenkung von bewegten Ladungsträgern senkrecht zur Flugrichtung, wenn diese die Magnetfeldlinien kreuzen. Dabei wirkt eine Kraft **F**, die sogenannte Lorentzkraft, senkrecht auf die magnetische Flussdichte **B** und senkrecht auf die Flugrichtung der Ladungsträger **v**.*



*Die Spannung **U** über dem Plättchen ist für einen festen Strom **I** und eine feste Geometrie des Leiterplättchens porportional zur magnetischen Flussdichte **B**, die das Plättchen durchdringt. Dadurch kann aus der Hallspannung **U** direkt die magnetische Feldstärke bestimmt werden.*

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Hysterese

Hysterese ist eine Eigenschaft ferromagnetischer Materialien. Die Magnetisierung des Materials steigt schnell an, wenn ein äußeres Magnetfeld angelegt wird. Aufgrund der Hysterese (vom griechischen hysteros = hinterher) sinkt dann die Magnetisierung jedoch nicht ganz so schnell wieder ab, wenn das Magnetfeld heruntergeregelt wird. Schaltet man das Magnetfeld ganz aus, so verbleibt eine Restmagnetisierung, die auch als Remanenz bezeichnet wird.

Ausführliche Erklärung

Hysterese ist der Effekt, dass die Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials nicht exakt proportional zum äußeren Magnetfeld verläuft und von der magnetischen Vorbehandlung des Materials abhängt. Dies bedeutet, dass die Magnetisierung eines z.B. eisenhaltigen Gegenstandes nicht doppelt so groß wird, wenn man das äußere Magnetfeld verdoppelt. Insbesondere bleiben ferromagnetische Materialien ein wenig magnetisiert, wenn das äußere Magnetfeld ganz abgeschaltet wird. Diese verbleibende Magnetisierung wird als Remanenz bezeichnet.

Die Magnetisierung eines Ferromagneten steigt zunächst mit dem äußeren Magnetfeld an. Wird das äußere Magnetfeld reduziert, so geht auch die Magnetisierung wieder zurück. Dieser Prozess läuft jedoch langsamer ab als der vorherige Anstieg der Magnetisierung, so dass sogar noch Magnetisierung (Remanenz) verbleibt, wenn das Magnetfeld ganz ausgeschaltet wird. Dieser nicht proportionale Zusammenhang ist ein gewisses "Hinterherhinken" der magnetischen Flussdichte hinter der magnetisierenden Feldstärke. Die Bezeichnung Hysterese kommt vom griechischen *ηψστεροσ* (hysteros = hinterher).

Eine mathematische Kurve, welche die jeweilige Magnetisierung als magnetische Flussdichte B bei einem bestimmten äußeren Magnetfeld H angibt, wird als Hysteresekurve bezeichnet (siehe Abbildung).

Die Hysteresekurve ist unterschiedlich für verschiedene Materialien und tritt nur bei ferromagnetischen Materialien auf. Ein magnetisch weiches Material wird durch die in der Abbildung links gezeigte Hysteresekurve charakterisiert, ein magnetisch hartes Material durch die rechte Hysteresekurve.

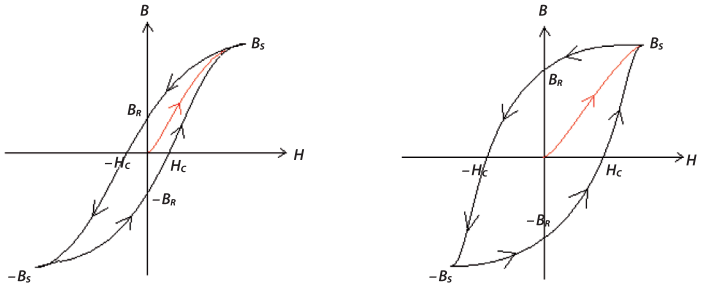


*Abb. Hysteresekurve für ein magnetisch weiches Material (links) und ein magnetisch hartes Material (rechts). Für das noch unmagnetisierte Material zeigt die rote "Neukurve" den Verlauf der Magnetisierung über dem äußeren Feld an. Dabei gilt die jeweils obere Kurve für den Verlauf von B_S zu $-B_S$ und die untere Kurve für den Verlauf von $-B_S$ zu B_S, wie durch die Pfeile dargestellt. Typische Punkte der Hysteresekurve sind das Koerzitivfeld H_C, welches nötig ist, um die Magnetisierung des Materials durch das äußere Feld zu kompensieren, die Remanenz B_R, welche die verbleibende Flussdichte bei verschwindendem äußeren Feld bezeichnet und die Sättigungsflussdichte B_S, bei der alle Elektronenspins ausgerichtet sind. Wird das **H - Feld** weiter gesteigert (über den zu B_S gehörigen Punkt hinaus), so verläuft das **B - Feld** proportional zu **H** mit geringer Steigung.*

Die rote Kurve bezeichnet im linken Beispiel, exemplarisch dargestellt, den Verlauf der magnetischen Flussdichte in einem Material, welches noch nicht magnetisiert ist. Sie wird auch als Neukurve oder "jungfräuliche" Kurve bezeichnet.

Hier ist die magnetische Flussdichte und damit auch die Magnetisierung M des Materials näherungsweise linear zum äußeren Magnetfeld H. Die Formel lautet: $M = (\mu - 1) \cdot H$. Dabei bezeichnet μ die magnetische Permeabilität. Das Magnetfeld im Inneren des Materials ist die Summe aus dem äußeren Magnetfeld H und der Magnetisierung des Materials M.

Ist der Körper bereits magnetisiert, so bewirkt ein äußeres Magnetfeld H, welches der Magnetisierung des Körpers entgegengerichtet ist, zunächst eine Abschwächung der bestehenden Magnetisierung. Erst ab der sogenannten Koerzitivfeldstärke H_C tritt Magnetisierung parallel zum äußeren Magnetfeld auf, also eine Ummagnetisierung. Die neue Magnetisierung steigt nichtlinear bis zur Sättigungsfeldstärke B_S. Reduziert man dann das äußere Magnetfeld wieder, so fällt die magnetische Flussdichte im Material langsamer ab als sie vorher angestiegen ist. Es verbleibt schließlich sogar die Remanenz B_R.

Die Fläche, die von der Hysteresekurve eingeschlossen wird, hat die Dimension einer Energie. (Das Energieprodukt beispielsweise ist das Produkt aus Magnetfeld H und magnetischer Flussdichte B, wie die Fläche eines Rechtecks das Produkt aus Breite und Länge ist). Die Fläche, welche von der Hysteresekurve eingeschlossen wird, ist

gerade die Energie pro Volumeneinheit des Magneten, welche bei einem Durchlauf der Magnetisierung von der positiven Sättigungsflussdichte B_S bis zur negativen Sättigungsdflussdichte $-B_S$ und dem anschließenden Rückweg von $-B_S$ zu B_S aufgewendet werden muss. Diese Energie wird bei dem Magnetisierungsvorgang als Wärme frei. Bei magnetisch harten Materialien ist diese Energie größer als bei magnetisch weichen Materialien. Die harten Materialien sind entsprechend widerstandsfähiger gegen kleine Störungen der Magnetisierung durch äußere Magnetfelder, Wärme oder Stöße und eignen sich gut als Magnetstoffe für Permanentmagnete. Weichmagnetische Substanzen werden für Transformatoren verwendet, da die Ummagnetisierung nur wenig Energie verbraucht.

Der physikalische Hintergrund für Hysterese liegt in der Existenz der Elektronenspins als elementare magnetische Momente der ferromagnetischen Stoffe begründet. Die starke Magnetisierung dieser Stoffe in äußeren Magnetfeldern kommt dadurch zu Stande, dass sich die magnetischen Momente in einem äußeren Magnetfeld ausrichten und dabei durch die Austauschwechselwirkung stabilisiert werden. Die ausgerichteten magnetischen Momente machen das ferromagnetische Material selbst zu einem Magneten.

Bei der Sättigungsfeldstärke und dem zugehörigen gesättigten magnetischen Fluss B_S sind alle magnetischen Momente parallel ausgerichtet. Dieser Zustand wird als magnetische Sättigung bezeichnet.

Nach der Ausrichtung stehen die magnetischen Momente der Elektronenspins in gegenseitiger Wechselwirkung. Diese Wechselwirkung wird durch die sogenannte Austauschwechselwirkung bedingt. Die Energie dieser Wechselwirkung muss aufgewendet werden, um die Magnetisierung eines Materials wieder aufzuheben, also die Ausrichtung der stabilisierten Elektronenspins wieder zu zerstören. Das bedeutet, die Magnetisierung geht langsamer zurück als sie entstanden ist, weil sich die magnetischen Momente der Probe gegenseitig stabilisieren. Es kostet Energie, diese Stabilisierung durch die Austauschwechselwirkung aufzuheben. Wenn die Austauschwechselwirkung groß ist, so schließt die Hysteresekurve eine große Fläche ein und man spricht von magnetisch harten Materialien.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Koerzitivfeld

Das Koerzitivfeld bezeichnet eine bestimmte Magnetfeldstärke, die nötig ist, um einen Permanentmagneten zu entmagnetisieren. Dies passiert, wenn ein Permanentmagnet in ein umgekehrt polarisiertes Magnetfeld der Koerzitivfeldstärke H_C eingebracht wird. Es gibt zwei Koerzitivfeldstärken. Das vom Betrag her niedrigere Koerzitivfeld bH_C kompensiert das Feld des Permanentmagneten. Nach Abschalten ist noch Magnetisierung, also Remanenz, messbar. Die höhere Koerzitivfeldstärke jH_C entmagnetisiert dagegen den Permanentmagneten, so dass dieser nach Abschalten des Gegenfeldes neu magnetisiert werden muss.

Ausführliche Erklärung

Ein magnetisiertes ferromagnetisches Material kann durch verschiedene Vorgänge entmagnetisiert werden. Beispielsweise durch starke Schläge auf das Material oder durch Hitze. Entmagnetisierung findet jedoch auch in einem äußeren entgegengerichteten Magnetfeld statt. Die zur Entmagnetisierung notwendige Gegenfeldstärke wird Koerzitivfeldstärke genannt.

Um diese Behauptung experimentell zu prüfen, muss man ein ferromagnetisches Material zunächst magnetisieren. Dazu kann man ein eisenhaltiges Material, beispielsweise eine Schraube, zwischen den Nordpol und den Südpol zweier Permanentmagneten halten und diese dann vorsichtig in beide Richtungen von der Schraube wegziehen. Die Schraube wird dadurch magnetisiert und wirkt anschließend, z.B. auf Stecknadeln, magnetisch anziehend.

Die Magnetisierung der Schraube geht verloren, wenn diese stark erwärmt wird oder stark erschüttert wird (z.B. durch harte Schläge mit einem Hammer). Eine andere Möglichkeit, die Schraube zu entmagnetisieren, besteht darin, sie einem entgegengesetzt gepolten Magnetfeld auszusetzen. Dieses muss die Stärke der sogenannten Koerzitivfeldstärke besitzen. Wurde die Schraube magnetisiert, indem der Kopf der Schraube in Kontakt zu dem Nordpol eines Permanentmagneten stand, die Spitze dagegen Kontakt zum Südpol hatte, so kann die Schraube entmagnetisiert werden, indem sie einem schwächeren und entgegengesetzt gerichteten Magnetfeld ausgesetzt wird. Dabei muss der Kopf der Schraube zum Südpol eines Permanentmagneten Kontakt haben und die Spitze der Schraube zum Nordpol, also genau umgekehrt zur Magnetisierung. Würde man zur Entmagnetisierung Magnete verwenden, die so stark sind wie die Magnete, welche zur Magnetisierung verwendet wurden, so würde die Schraube erneut magnetisiert werden nur mit umgekehrten Polen.

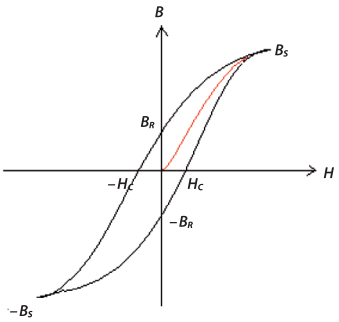


Abb. Hysteresekurve für ein magnetisch weiches Material. Für das noch unmagnetisierte Material zeigt die rote "Neukurve" den Verlauf der Magnetisierung über dem äußeren Feld an. Typische Punkte der Hysteresekurve sind das Koerzitivfeld H_C (genauer bH_C, siehe unten), welches nötig ist, um die Magnetisierung des Materials durch das äußere Feld zu kompensieren, die Remanenz B_R, welche die verbleibende Flussdichte bei verschwindendem äußeren Feld bezeichnet und die Sättigungsflussdichte B_S, bei der alle Elektronenspins ausgerichtet sind.

Der Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte B im Inneren der Schraube und einem äußeren Magnetfeld H ist sehr kompliziert. Er wird durch die sogenannte Hysteresekurve beschrieben, wobei der rote Teil der Kurve den Zusammenhang zwischen B und H bei einem noch völlig unmagnetisierten Material zeigt (siehe Abbildung).

Der magnetische Fluss steigt mit dem äußeren Magnetfeld H kompliziert an, bis ein magnetischer Fluss B_S erreicht wird, bei dem alle magnetischen Momente parallel ausgerichtet sind. Man spricht dabei von der magnetischen Sättigung und der Sättigungsfeldstärke B_S, auch wenn der bezeichnete Punkt B_S eigentlich einen gesättigten magnetischen Fluss beschreibt.

Schaltet man das äußere Feld ab, so geht der magnetische Fluss im Inneren der Probe nicht wieder auf Null zurück sondern es verbleibt eine Remanenz B_R. Die Remanenz der Stärke B_R verbleibt genau dann, wenn das Material voher der Sättigungsflussdichte B_S ausgesetzt war. Diese Flussdichte hat alle magnetischen Momente im Material ausgerichtet.

Um die magnetische Flussdichte im Inneren des Materials vollständig verschwinden zu lassen, muss man ein äußeres Magnetfeld der Koerzitivfeldstärke H_C anlegen.

Man unterscheidet dabei zwischen zwei verschiedenen Koerzitivfeldstärken. Die Koerzitivfeldstärke bH_c ist die Koerzitivfeldstärke der Flussdichte. Es gibt auch die Koerzitivfeldstärke jH_c, welche als Koerzitivfeldstärke der Magnetisierung (bzw. der magnetischen Polarisation) bezeichnet wird. Dies soll im Folgenden näher erläutert werden:

Wird ein magnetisiertes Material (kurz: Magnet) einer Feldstärke von bH_c ausgesetzt, verschwindet die magnetische Flussdichte im Magneten. Im Inneren des Magneten ist die magnetische Flussdichte dann Null, allerdings nur deshalb, weil die verbleibende Magnetisierung durch das äußere entgegengesetzte Feld gerade kompensiert wird. Beide Felder heben sich im Inneren auf. Das Material selbst ist also immer noch magnetisch. Man merkt das sofort, wenn das äußere Gegenfeld wieder abschaltet wird. Von dem Material gehen dann immer noch magnetische Kräfte aus.

Wird die äußere Feldstärke auf jH_c erhöht, also das entgegengesetzte Feld in seiner Stärke vergrößert, so wird der Magnet dauerhaft entmagnetisiert.

In obiger Abbildung ist als H_c die Feldstärke bH_c eingezeichnet. Die magnetische Flussdichte B im Inneren des Magneten ist nur Null, so lange bH_c anliegt. Die dauerhaft entmagnetisierende Feldstärke jH_c ist nicht eingezeichnet und vom Betrag her größer als bH_c. Diese Koerzitivfeldstärke der Magnetisierung jH_c kompensiert nicht etwa nur das Magnetfeld der ausgerichteten Atomaren Spins im Material sondern sie führt zu einer Aufhebung der Stabilisation der Spinausrichtung durch die Austauschwechselwirkung. Die magnetische Feldstärke im Inneren des Magneten ist bei Gegenfeldern größer als bH_c nicht Null sondern hat einen bestimmten Betrag, ist aber den ausgerichteten Atomaren Spins gerade entgegengerichtet und versucht, diese umzudrehen. Bei jH_c kann das Magnetfeld die Austauschwechselwirkung überwinden und führt tatsächlich dazu, dass die Atomaren Spins umgedreht werden. Das Material ist damit entmagnetisiert. Bei einer weiteren Steigerung der Magnetfeldstärke kommt es zu einer neuen Ausrichtung der Atomaren Spins in umgekehrter Richtung und es kann eine erneute Magnetisierung jedoch mit umgekehrter magnetischer Polarisation, also mit vertauschten Polen im Vergleich zur ursprünglichen Polung des Magneten festgestellt werden.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Lorentzkraft

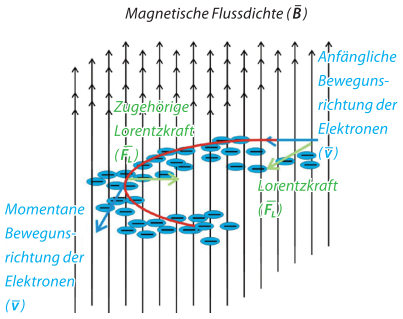
Die Lorentzkraft ist eine magnetische Kraft, die zwischen einem Magnetfeld und einer bewegten Ladung wirkt. Wenn sich eine Ladung senkrecht durch ein Magnetfeld bewegt, also die magnetischen Feldlinien kreuzt, so wirkt eine Kraft, die wiederum senkrecht auf Magnetfeld und Flugrichtung der Ladung steht. Dies ist die Lorentzkraft. Sie führt dann dazu, dass die Ladung eine Kreisbewegung beschreibt. Gefunden hat die Lorentzkraft der Physiker Hendrik Antoon Lorentz.

Ausführliche Erklärung

Grundsätzlich wirken magnetische Kräfte zwischen bewegten Ladungen. Denn bewegte Ladungen sind nach den Maxwellgleichungen, den Gesetzen der Elektrodynamik, die Ursache für Magnetfelder. So gibt es magnetische Kräfte (Anziehungs- und Abstoßungskräfte) zwischen den Polen (Nord- bzw. Südpol) verschiedener Permanentmagnete, die auf elementare Kreisströme im Material zurückgeführt werden. Es gibt aber auch eine Kraft direkt auf eine bewegte Ladung, wenn sich diese in einem Magnetfeld bewegt. Dies ist die sogenannte Lorentzkraft.

Die Lorentzkraft wirkt immer, wenn eine Ladung die magnetischen Feldlinien kreuzt. Sie kann z.B. dazu führen dass die Ladung eine Kreisbewegung beschreibt.

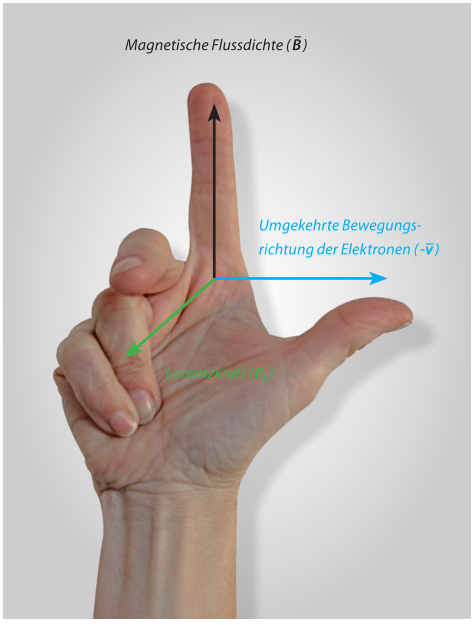
Bestimmen kann man die Richtung der Lorentzkraft nach der sogenannten Rechte-Hand Regel. Wenn man den Daumen in Richtung der Flugrichtung einer gedachten positiven Ladung (also bei Elektronen gerade entgegengesetzt zur Flugrichtung) hält und den Zeigefinder in Richtung des Magnetfeldes, so gibt der Mittelfinger die Richtung der Kraft auf die bewegten Ladungsträger an.

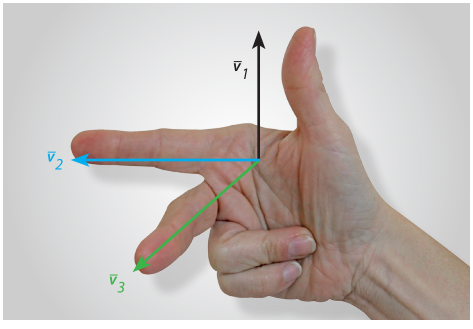


*Die Lorentzkraft F_L wirkt auf bewegte Ladungsträger (blau) senkrecht zur momentanen Flugrichtung, wenn diese die Magnetfeldlinien kreuzen. Dabei wirkt die Lorentzkraft senkrecht auf die magnetische Flussdichte **B** und senkrecht auf die Flugrichtung der Ladungsträger **v**. Können sich die Elektronen frei bewegen, so werden sie auf eine Kreisbahn gezwungen.*

Die Lorentzkraft, welche nach ihrem Entdecker, dem Physiker Hendrik Antoon Lorentz, benannt wurde, wird in vielen physikalischen Experimenten und in einigen technischen Anwendungen ausgenutzt. Eine Hall-Sonde beispielsweise nutzt den physikalischen Effekt der Lorentzkraft aus. Sie besteht im Wesentlichen aus einem stromdurchflossenen Metallplättchen. Wenn man einen Strom an ein Metallplättchen anlegt, welches sich in einem Magnetfeld befindet, so wirkt eine Kraft auf die Elektronen, welche diese an eine Seite des Metallplättchens drängt. Die elektrische Spannung, die dabei über dem Plättchen entsteht, ist proportional zum Magnetfeld.

Mit Hilfe des sogenannten Fadenstrahlrohres konnte die Elementarladung pro Masse des Elektrons bestimmt werden. Dabei wird ebenfalls die Lorentzkraft ausgenutzt. Da die Elementarladung wiederum mit anderen Expe-





Die Abbildung zeigt die Rechte-Hand Regel für das Kreuzprodukt: Will man die Richtung des Vektors v_3 mit $v_3 = v_1 x v_2$ wissen, so muss man den Daumen in Richtung von v_1 und den Zeigefinger in Richtung von v_2 halten. Der abgespreizte Mittelfinger zeigt dann in Richtung von v_3 (rechte Grafik).

*Für die Lorentzkraft F_L gilt: $F_L = q\,v\,x\,B$. Somit kann man die Richtung der Lorentzkraft ermitteln, indem man den Daumen entgegen (wegen des Minus-Zeichens in der Ladung **e**) der Flugrichtung der Elektronen mit Geschwindigkeit **v** hält und den Zeigefinger in Richtung der magnetischen Flussdichte **B** (linke Grafik).*
Der senkrecht abgespreizte Mittelfinger zeigt dann in Richtung F_L.

rimenten zugänglich ist, kann mit dem Fadenstrahlrohr letztendlich die verschwindend kleine Masse des Elektrons bestimmt werden.Der Wert der Elektronenmasse ist bedeutend. Ohne die genaue Kenntnis der Elektronenmasse wäre die Entwicklung von effizienten Halbleiterbauelmenten für die Computertechnik nicht möglich.

Um das Fadenstrahlrohr zu verstehen, muss man sich zunächst die Formel für die Lorentzkraft $\vec{F}_L$ ansehen. Sie lautet: $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$ wobei q die Ladung angibt, also eine negative Elementarladung $-e$ für Elektronen, $\vec{v}$ die Flugrichtung der Elektronen als Richtungsvektor und $\vec{B}$ die magnetische Flussdichte mit Richtungsangabe, also ebenfalls als Vektor. Die Operation $\vec{v} \times \vec{B}$ beschreibt das sogenannte Kreuzprodukt zweier Vektoren.

Das Ergebnis dieses Produktes ist wiederum ein Vektor, der auf die beiden Vektoren des Kreuzproduktes senkrecht steht. Interessiert man sich nicht für die Richtung der Lorentzkraft sondern nur für den Betrag, so kann man für den Betrag F_L (ohne Vektor-Angabe) auch schreiben: $F_L = qvB \cdot \sin\theta$ mit dem Sinus des Winkels θ zwischen Flugrichtung des Elektrons und magnetischer Flussdichte B.

Beim Fadenstrahlrohr werden die Elektronen aus einer Glühkathode emittiert und anschließend beschleunigt. Dann dringen sie in ein Magnetfeld ein und können so auf eine Kreisbahn gezwungen werden.

Der Radius der Kreisbahn r nimmt den Wert an, bei dem die Zentrifugalkraft $F_z = \frac{m \cdot v^2}{r}$, die auf die Elektronen mit der Masse m wirkt und die Lorentzkraft $F_L = qvB \cdot \sin\theta$ sich gerade kompensieren.

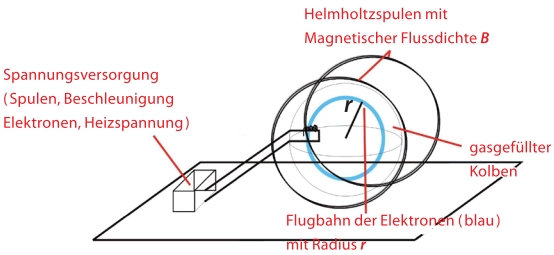
Fliegt das Elektron senkrecht zum Magnetfeld, so gilt wegen $\sin 90° = 1$, dass $F_L = qvB$.

Also folgt aus $F_z = F_L$:

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = qvB \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v^2}{rvB} = \frac{v}{rB}.$$

Die Ladung pro Masse der Elektronen (sog. Spezifische Elektronenmasse) kann also aus der Geschwindigkeit der Elektronen, dem Radius der Kreisbahn im Fadenstrahlrohr und dem Betrag der magnetischen Flussdichte B bestimmt werden.

Die Geschwindigkeit der Elektronen kann wiederum aus der im Fadenstrahlrohr angelegten Beschleunigungsspannung berechnet werden. Die magnetische Flussdichte B kann man zum Beispiel mit einer Hall-Sonde messen.



*Die Skizze zeigt schematisch den Aufbau eines Fadenstrahlrohres. Die Elektronen werden an der Glühkathode durch die Heizspannung emittiert und anschließend beschleunigt (nicht gezeigt). Aus der Beschleunigungsspannung kann die Geschwindigkeit der Elektronen berechnet werden. Durch das Magnetfeld zwischen den Helmholtzspulen wirkt aber die Lorentzkraft auf die Elektronen, so dass diese auf eine Kreisbahn gezwungen werden (blau gezeichnet). Diese Kreisbahn hat den Radius **r**, der von der Geschwindigkeit der Elektronen und der magnetischen Flussdichte **B** abhängt. Aus **B**, **r** und der Elektronengeschwindigkeit **v** kann dann aber die sogenannte spezifische Ladung **q/m** berechnet werden. Das Fadenstrahlrohr zählt zu den grundlegenden Experimenten der Physik.*

Da die Zentrifugalkraft proportional mit der Masse ansteigt, die Lorentzkraft jedoch proportional mit der Ladung, würden Teilchen mit doppelter Masse und doppelter Ladung gerade auf der gleichen Kreisbahn fliegen wie Elektronen. Deshalb kann im Fadenstrahlrohr nur die spezifische Elementarladung $\frac{q}{m}$ bestimmt werden.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Luftspalt

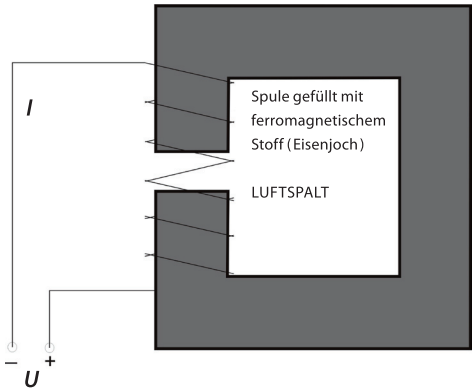
In der Magnetfeldtechnik hat ein "Luftspalt" eine besondere Bedeutung. Er bezeichnet einen (luftgefüllten) Spalt im ferromagnetischen Kern von Elektromagneten. Der Spalt bewirkt, wenn er genau berechnet wurde, dass der Elektromagnet mit sehr unterschiedlichen Strömen betrieben werden kann und magnetische Energie besser speichern kann als ein Magnet ohne Luftspalt. Der Luftspalt verhindert auch eine vorzeitige magnetische Sättigung, bei der das Magnetfeld bei großen Strömen nicht weiter ansteigt und Energie als Wärme verloren geht.

Ausführliche Erklärung

Allgemein bezeichnet man als Luftspalt einfach einen Spalt, der mit Luft gefüllt ist. In der Technik handelt es sich dabei meist um den Abstand zwischen gegenüberliegenden Flächen in Bauteilen.

In der Technik der Elektromagnete ist ein Luftspalt nicht nur ein Spalt der zufällig durch die Bauweise zu Stande kommt sondern hier hat ein Luftspalt bedeutende Funktionen.
So befindet sich in den Eisenkernen von Transformatoren ein Luftspalt, um im Normalbetrieb eine magnetische Sättigung des Eisenkerns zu verhindern. Außerdem ist das Magnetfeld im Luftspalt wesentlich größer als im Eisenmaterial, wodurch im Luftspalt magnetische Energie gespeichert wird. Der Transformator wirkt dann als kurzzeitiger Energiespeicher, was für bestimmte Anwendungen vorteilhaft ist.

Ein Transformator besteht aus zwei gegenüberstehenden Elektromagneten. Das Magnetfeld des einen Elektromagneten induziert eine Spannung in der Spule des zweiten Elektromagneten. Die Größe dieser Spannung hängt vom Verhältnis der Windungszahlen der beiden Spulen ab. Somit wird durch den Transformator die Größe von Spannungen und Strömen verändert. Ein ferromagnetischer Kern (meist Eisen) in den Elektromagneten unterstützt diesen Prozess.



Ein Luftspalt im Eisenkern eines Elektromagneten erfüllt einen technisch bedeutsamen Zweck. Durch den Luftspalt wird die magnetische Sättigung reduziert. Außerdem wird im Luftspalt magnetische Energie gespeichert.

Falls ein Transformator in einem weiten Leistungsbereich verwendet werden soll, also sowohl bei niedrigen, als auch bei höheren Leistungen arbeiten soll, und falls sich dabei die Eigenschaften des Transformators möglichst wenig ändern sollen, so werden in den Elektromagneten des Transformators Eisenkerne mit Luftspalt eingebaut.

Luft hat eine wesentlich kleinere magnetische Permeabilität als Eisen. Der Luftspalt reduziert also die magnetische Flussdichte im unterbrochenen Eisenkern im Vergleich zu einem Eisenkern ohne Luftspalt. Das Magnetfeld ist im Luftspalt dagegen sehr hoch. Dadurch arbeitet der Transformator zwar bei niedrigen Leistungen etwas weniger effizient, aber dafür kommt es nicht so schnell zur magnetischen Sättigung des Eisenkerns bei höheren Leistungen. Die insgesamt niedrigere magnetische Flussdichte in einem Elektromagneten mit Luftspalt ist über einen weiteren Bereich proportional zum Magnetfeld als ohne Luftspalt. Viele ferromagnetische Materialien haben eine Sättigungsmagnetisierung von 1 – 2 Tesla. Dies ist nicht viel. In vielen technischen Anwendungen entstehen bedeutend höhere magnetische Flussdichten.

Der physikalische Grund für die magnetische Sättigung liegt daran, dass die atomaren Spins des ferromagnetischen Materials (Eisenkern) bei einem bestimmten äußeren Magnetfeld vollständig ausgerichtet sind. Trotz einer Erhöhung des Stroms wächst dann die magnetische Flussdichte nicht mehr an.

Die Elektronenspins aller Weißschen Bezirken des Ferromagneten sind parallel ausgerichtet.

In einem Transformator steigt dann der Strom im sogenannten Primärkreis des Transformators, also in der Spule, deren Spannung umgewandelt werden soll, steil an. Damit sinkt die Leistung des Transformators und viel Energie geht durch ein Erwärmen des Transformators verloren. Die geeignete Wahl der Dicke des Luftspaltes hilft, den Transformator für den passenden Leistungsbereich "zuzuschneiden".

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

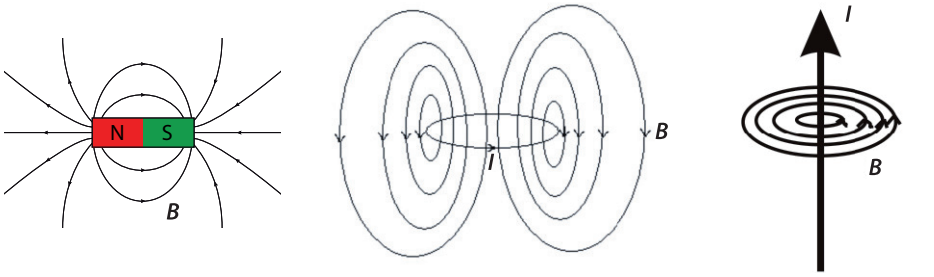
Magnetfeld

Ein Magnetfeld äußert sich dadurch, dass magnetische Kräfte festgestellt werden können. Es ist möglich, ein Magnetfeld sichtbar zu machen, indem feine Eisenspäne auf ein Papier gestreut werden, unter dem sich ein Magnet befindet. Oft wird ein Magnetfeld durch Feldlinien symbolisiert. Mit Hilfe der Feldlinien kann man die magnetischen Kräfte bemessen. Die Abnahme des magnetischen Feldes mit zunehmendem Abstand vom Magneten ist der Grund für die Abnahme der magnetischen Kräfte.

Ausführliche Erklärung

Das Magnetfeld überträgt die Kräfte eines Magneten. Es ist ein Feld aus elektromagnetischer Energie. Die magnetische Feldstärke gibt also an, wie stark ein Magnet ist. Da die Menge an magnetischer Energie durch das Energieprodukt beschrieben wird, in welches die Magnetfeldstärke quadratisch eingeht, hat ein Magnet mit der doppelten magnetischen Feldstärke die vierfache Kraftwirkung im Vergleich zu einem Magneten mit einfacher Feldstärke. Das Magnetfeld wird anschaulich oft durch Feldlinien symbolisiert. Diese Feldlinien werden sichtbar, wenn Eisenpulver auf ein Papier gestreut wird, unter dem sich ein Magnet befindet. In einem solchen Fall ordnen sich die Eisenpartikel parallel zu den Feldlinien an und visualisieren das Magnetfeld.

Die magnetischen Feldlinien sind immer geschlossen, laufen per Definition vom Nordpol zum Südpol eines Magneten und stehen senkrecht auf der Oberfläche des Magneten. Grundsätzlich verursachen bewegte Ladungen



Die Abbildung zeigt schematisch die Feldlinien verschiedener Magnetfelder. Links ist das Magnetfeld eines Stabmagneten gezeigt. Die Feldlinien sind immer geschlossen, können jedoch große Schleifen bilden. Die Feldlinien laufen im Außenraum des Magneten vom Nord- zum Südpol und im Inneren des Magneten wieder zurück vom Südpol zum Nordpol. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Leiterschleife (Mitte) ist dem Feld des Stabmagneten sehr ähnlich. Hier bildet sich der magnetische Nordpol oberhalb der Leiterschleife und der Südpol unterhalb der Leiterschleife. Rechts ist das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Drahtes gezeigt.

Magnetfelder. Ein stromdurchflossener Draht verursacht also auch ein Magnetfeld.

Das Magnetfeld ist ein reines Dipolfeld. Das bedeutet, es gibt keine magnetischen Ladungen, welche als einzelner Pol verstanden werden könnten, sondern immer nur Magnete mit einem Nord- und einem Südpol. Es kann mathematisch bewiesen werden, dass aus diesem Grund die Feldlinien immer geschlossen sind. Sie laufen vom Nordpol zum Südpol und im Magneten wieder zurück zum Nordpol.

Das Magnetfeld wird durch die Maxwellgleichungen beschrieben. Die Maxwellgleichungen geben an, wie dicht die Magnetfeldlinien bei gegebenen Stromverteilungen sind und welche Richtung die Magnetfeldlinien haben. Mit Hilfe der Maxwellgleichungen kann also berechnet werden, wie stark ein Magnetfeld bei gegebenen Strömen ist und in welche Richtungen die magnetischen Kräfte wirken. Dabei gibt es keine Quellen des Magnetfeldes, während elektrische Ladungen die Quellen des elektrischen Feldes sind. Dies äußert sich darin, dass aus den Ladungen Feldlinien " herauslaufen " oder " hineinlaufen ". Quellen des Magnetfeldes gibt es nicht. Veränderliche elektrische Felder und Ströme verursachen jedoch magnetische Wirbel. Das Magnetfeld ist also ein reines Wirbelfeld.

Überlagern sich viele kleine Magnete so ist die gesamte messbare Magnetfeldstärke gleich der Summe aller Magnetfelder der kleinen Magnete. Man nennt dieses Prinzip das Superpositionsprinzip. Aus dem Superpositionsprinzip folgt, dass viele winzige mikroskopische Ringströme in einem Material, die jeweils zu einem Elementarmagneten führen, zusammengenommen eine messbare Magnetisierung verursachen, also ein merkliches Magnetfeld,

wenn alle Elementarmagnete gleichmäßig ausgerichtet sind. Sind die Elementarmagnete dagegen willkürlich orientiert, so ist nach außen kein Magnetfeld messbar.

Entgegen einer weit verbreiteten Meinung wird das Magnetfeld in der Physik nicht mit dem Buchstaben ***B*** abgekürzt und nicht wie dieses ***B-Feld***, welches die magnetische Flussdichte bezeichnet, in den Einheiten Tesla oder Gauss gemessen. Vielmehr wird das magnetische Feld mit dem Buchstaben ***H*** abgekürzt und in der Einheit Ampere pro Meter gemessen.

Es gilt der Zusammenhang

$$H = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot B$$

Dabei bezeichnet μ die magnetische Permeabilität des Materials, welches vom Magnetfeld ausgefüllt wird. μ_0 ist die magnetische Permeabilität des Vakuums. Für das Vakuum und näherungsweise für Luft gilt $\mu=1$. Für Eisen dagegen kann μ Werte bis zu einigen tausend annehmen.

Die magnetische Flussdichte einer stromdurchflossenen Spule wird um den Faktor μ verstärkt, wenn sich in der Spule ein Material mit der magnetischen Permeabilität μ befindet. Die magnetische Flussdichte besitzt keine Quellen und keine Senken. Demnach dringt sie aus dem Eisen in den Luftraum ein, ohne ihre Größe zu ändern. Sie verursacht ein entsprechend großes Magnetfeld im Luftraum.

Magnetfelder werden also durch den Kontakt zu ferromagnetischen Materialien verstärkt. Man kann sich dies so vorstellen, dass durch ein Magnetfeld in einem ferromagnetischen Material die vorhandenen mikroskopischen magnetischen Momente parallel ausgerichtet werden und demnach selbst eine magnetische Flussdichte verursachen. Diese magnetische Flussdichte kann viel stärker sein (um den Faktor μ stärker) als die magnetische Flussdichte, welche die vielen Elementarmagnete ursprünglich ausgerichtet hat.

Die quadratische Abhängigkeit der magnetischen Kräfte von der magnetischen Feldstärke kann man sich anschaulich vorstellen. Bei der Magnetisierung von Eisen wird im Feld eines hypothetischen Magneten "M4" mit doppelter Feldstärke im Vergleich zu einem anderen Magneten "M1" das Eisen auch doppelt so stark magnetisiert. Das Eisen, selbst im Feld von M4 doppelt so stark magnetisiert (im Vergleich zu M1), wird nun pro Einheit der Magnetisierung wiederum doppelt so stark von dem Magneten M4 angezogen (im Vergleich zu M1). Also ist die gesamte magnetische Kraftwirkung und auch die Gesamtmenge an magnetischer Energie im Magneten M4 viermal größer als bei M1. Die Kraftwirkung und das Energieprodukt steigen quadratisch mit der magnetischen Flussdichte bzw. dem Magnetfeld an.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetische Energie

Unter magnetischer Energie versteht man die Energie eines Magnetfeldes. In jedem Permanentmagneten ist eine bestimmte Menge magnetischer Energie gespeichert. Sie bestimmt die Güte des Magneten. Wenn ein Magnet ein Stück Eisen anzieht, so wird Arbeit verrichtet und genau um diesen Wert reduziert sich die magnetische Energie. Sie steigt jedoch wieder, wenn das Stück Eisen wieder entfernt wird. Je größer die magnetische Energie eines Magneten ist, desto größer sind auch die magnetischen Kräfte. Gemessen wird die magnetische Energie mit dem Energieprodukt.

Ausführliche Erklärung

Magnetische Energie ist eine gewöhnliche Energieform der Physik. Man versteht darunter die Energie, die in einem Magnetfeld steckt. Um ein Magnetfeld zu erzeugen muss Arbeit verrichtet werden. Diese aufgewendete Arbeit steckt dann als Energie im Magnetfeld. Man kann sich diese vorstellen als die Arbeit, die nötig ist, um alle Elementarmagnete im Material parallel auszurichten, also eine Arbeit, die aufgewendet wird, um die atomaren Spins zu verdrehen. Die parallel ausgerichteten Elementarmagnete wiederum besitzen dann eine gewisse potentielle Energie, nämlich die magnetische Energie.

Wie groß die Menge an magnetischer Energie ist, die nach der parallelen Ausrichtung der Elementarmagnete in einem Magneten gespeichert ist, hängt vom Material ab. Der Wert dieser Energie ist proportional zur Fläche unter der sogenannten Hysteresekurve.

Die magnetische Energie kann durch das Energieprodukt berechnet werden und bestimmt die Güte eines Magneten. Sie steigt quadratisch mit dem Magnetfeld an. Das bedeutet, wenn ein Magnetfeld doppelt so groß ist wie ein zweites Magnetfeld, jedoch die gleiche Ausdehnung besitzt, dann steckt in ihm die vierfache magnetische Energie.

Je größer die magnetische Energie eines Magnetfeldes ist, desto größer sind auch die magnetischen Kräfte. Sie verhalten sich proportional zur magnetischen Energie. Das bedeutet, dass ein doppelt so energetisches Magnetfeld die doppelten magnetischen Kräfte besitzt.

Die Kraft, die in eine bestimmte Richtung wirkt, berechnet sich konkret als Änderung der magnetischen Energie in dieser Richtung. Dies kann man sich vorstellen als ein Prinzip der energetischen Minimierung. Ist das energetische Minimum ereicht, so gibt es keine Richtung, entlang derer sich die Energie weiter minimiert und alle Kräfte verschwinden. Wird die Energie eines Magnetfeldes minimiert, wenn sich zwei Körper aneinander annähern, so wirkt eine Kraft in die Richtung, die zur Minimierung beiträgt, also eine Anziehungskraft zwischen den beiden Körpern. Dies ist gerade dann der Fall, wenn ein Stück Eisen an einen Magneten angenähert wird oder ein magnetischer Nordpol an einen magnetischen Südpol.

Wird die magnetische Feldenergie dagegen (wie bei Annäherung gleichnamiger Pole, also Nord- gegen Nordpol oder Süd- gegen Südpol) vergrößert, so wirkt eine abstoßende Kraft.

Zwischen einem Magneten und einem Stück Eisen bzw. zwischen ungleichnamigen Polen zweier Magnete befindet sich magnetische Energie im Luftraum, die größer ist als die magnetische Energie im Material. Wenn das Eisen eine magnetische Permeabilität (Durchlässigkeit) μ besitzt, so verringert sich der Anteil der Energie, der durch Eisen läuft im Vergleich zu der Energie im Luftraum um diesen Faktor.

Berühren sich Magnet und Eisen, so ist der Luftraum und damit auch die Feldenergie im Luftraum verschwunden. Es wirken in der Physik immer Kräfte in Richtung eines energetischen Minimums. Dies kann über den Ausdruck $\vec{F} = -\vec{\nabla} U$ allgemein ausgedrückt werden für jede Kraft $\vec{F}$ in einem Energie-Potential U.

Dabei bezeichnet $\vec{\nabla}$ den "Ableitungsvektor" in allen Raumrichtungen (mathematisch auch "Gradient" genannt)

und kann geschrieben werden als

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

wobei $\frac{\partial}{\partial x}$ die " Änderung " entlang der ***x - Achse***, also die partielle Differentiation nach ***x*** bezeichnet.

Ist im Potential ***U*** die Änderung der Energie in einer Richtung besonders stark, so wirkt in dieser Richtung eine besonders starke Kraft.

Ein Magnet kann auch Arbeit verrichten. Er kann beispielsweise ein Stück Eisen anziehen.

Dann verringert sich die magnetische Energie um den Anteil der verrichteten Arbeit. Allerdings verschwindet das Magnetfeld nicht für immer. Der Magnet wird also nicht zerstört, wenn man das Eisen mehrere Male vom Magneten anziehen lässt und wieder abnimmt, denn beim Abnehmen des Eisenstücks muss von außen Arbeit aufgewendet werden. Die magnetische Energie des Luftraums nimmt dann wieder zu und führt dem gesamten Magnetfeld des Permanentmagneten wieder die vorher verloren gegangene Menge an magnetischer Energie zu.

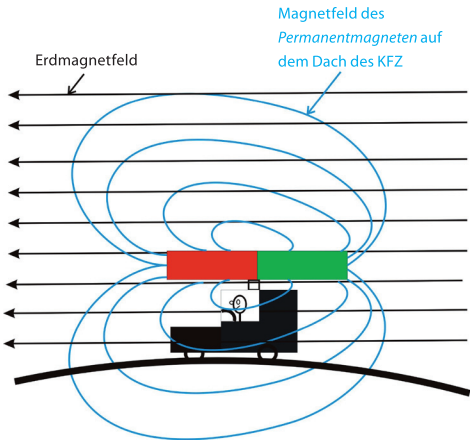
Wird ein Magnet in einer Spule immer im Kreis gedreht, so verrichtet die Kreisdrehung über das Magnetfeld eine Arbeit, die zur Erzeugung von Strom benutzt werden kann. Die Änderung des Magnetfeldes führt zur Induktion einer Spannung. So funktioniert ein herkömmlicher Generator.

Viele Ideen ranken sich darum, die magnetische Energie der Erde oder sogar kosmischer Magnetfelder auszunutzen. Es ist jedoch nicht möglich, dies entlang der Erdoberfläche zu tun, weil hier das Magnetfeld weitgehend konstant ist. Demnach wirkt gemäß des allgemeinen Gesetzes $\vec{F} = -\vec{\nabla}U$ auch keine Kraft, weil die Änderung des Energiepotentials ***U***, nämlich $\vec{\nabla}U$ entlang der Erdoberfläche gleich Null ist.

Es gibt gemäß den Maxwellgleichungen auch keinen einzelnen Nord - oder Südpol, den man zum Nordpol der Erde bzw. Südpol der Erde beschleunigen lassen könnte. All diese Ideen zur Nutzung von freier Energie oder magnetischer Energie sind physikalisch unsinnig.

Man kann die magnetische Energie der Erde nur ausnutzen, indem man einen ferromagnetischen Körper, der sich weit von den Polen der Erde weg befindet, an einen der Pole annähert. Dabei würde man die magnetische Energie des Erdfeldes reduzieren und könnte dies zum Beispiel durch Induktion eines Stroms nutzbar machen.

Allerdings ist der Effekt verschwindend gering, da ja das Magnetfeld der Erde sehr schwach ist. Viel mehr Energie wird einfach durch das Fallen im Schwerefeld der Erde gewonnen. Die Energiemenge ist jedoch maximal so groß wie die Arbeit, die vorher aufgewendet werden muss, um den Körper von der Erde zu entfernen.



Um die Nutzbarkeit magnetischer Energie, insbesondere zur Nutzung der Energie des Erdmagnetfeldes, ranken sich viele esoterische Ansichten. In Wirklichkeit kann jedoch aus einer Bewegung entlang der Erdoberfläche keine magnetische Energie in Arbeit umgewandelt werden. Es wirkt keine Kraft tangential zur Erdoberfläche, da sich die Dichte der Feldlinien nicht ändert. Ein Automobil mit einem Magnetantrieb, wie es hier abgebildet ist, kann es also nicht geben.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetische Kräfte (Anziehungskräfte, Abstoßungskräfte)

Magnetische Kräfte sind spürbar, wenn ein Magnet an ein ferromagnetisches Material oder einen anderen Magneten angenähert wird. Ursache magnetischer Kräfte sind dabei elektrische Ströme, also die Bewegung von Ladungen. Im Gegensatz dazu gibt es im Elektromagnetismus auch elektrische Kräfte, die von ruhenden Ladungen ausgehen und auf andere Ladungen wirken. In Dauermagneten sind winzige Kreisströme für die magnetischen Kräfte verantwortlich. Elektromagnete dagegen werden direkt mit einem Strom, der durch eine Spule fließt, betrieben.

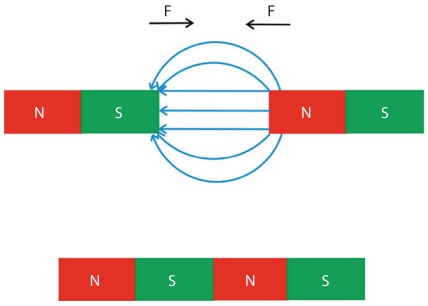
Ausführliche Erklärung

Unter magnetischen Kräften versteht man eine merkliche Kraftwirkung, welche allgemein zwischen bewegten Ladungen, also zwischen Strömen, festgestellt werden kann.

Magnetische Stoffe üben Kräfte aufeinander bzw. auf ferromagnetische Materialien aus. In Magneten wird die Kraftwirkung ebenfalls auf winzige Kreisströme im Material zurückgeführt.

Es gibt in der Physik nur 3 verschiedene Grundkräfte, die Ursache für alle bekannten Kraftwirkungen sind. Dies sind Gravitation, Elektromagnetismus und Kernkräfte. Die Kernkräfte lassen sich noch weiter unterteilen, sie spielen jedoch gewöhnlich für die Kräfte, welche der Mensch in seiner Umwelt beobachten kann, keine Rolle.

Die Gravitation dagegen spielt immer dann eine Rolle, wenn sehr viel Masse beteiligt ist. Selbst mit sehr großen Massen aber kann die Gravitationswirkung nur mit großem technischen Aufwand nachgewiesen werden. Starke Gravitationskräfte gehen erst von interstellaren Objekten wie Monden, Planeten und Sternen aus. Die Masse der Erde beispielsweise übt genügend Gravitation auf alle Körper aus, um sie mit einer spürbaren Kraft an ihre Oberfläche zu binden. Gezeitenkräfte und die Bewegung der Planeten und Sterne werden so vor allem durch Gravitation bestimmt. Gravitationskräfte sind bei enormen Massen von großen Sternen größer als jede andere Kraft, so dass die Gravitation jede Art von Widerstand überwinden kann. Dann können Gravitationskräfte Sterne zu schwarzen Löchern kollabieren lassen. Im Alltag beobachten wir die Gravitation jedoch nur zwischen den Körpern und der Erde als Erdanziehungskraft. Die Gravitation zwischen den Gegenständen in unserer Umwelt untereinander ist dagegen so klein, dass wir sie kaum spüren.



*Gezeigt sind oben zwei Permanentmagnete, die sich mit zwei verschiedenen Polen gegenüberstehen. Die Feldlinien laufen dann vom Nordpol des einen Magneten zum Südpol des anderen Magneten (und im Material weiter). Entlang dieser Feldlinien wirkt eine Kraft **F**, die versucht, beide Magnete aneinander anzunähern.*

Die magnetischen Feldlinien symbolisieren einen magnetischen Fluss und damit magnetische Energie zwischen den beiden Permanentmagneten. Berühren sich die beiden Magnete, so ist die Energie dieses Feldes zwischen beiden Magneten minimiert. Kräfte wirken in der Physik grundsätzlich in Richtung eines energetischen Minimums.

Alle anderen Kräfte, die wir im Alltag beobachten, sind elektromagnetischer Natur. Die elektromagnetischen Kräfte lassen sich dabei unterteilen in elektrische Kräfte und magnetische Kräfte.

Wenn ein Stoff Ladung trägt, so wirken elektrische Kräfte. Berühren sich ungleichnamig geladene Körper (also ein positiv geladener Körper und ein negativ geladener Körper), so kommt es zum Ladungsausgleich. Danach ist keine elektrische Kraft mehr spürbar. Gleichgeladene Körper (also beide negativ oder beide positiv geladen) stoßen sich dabei grundsätzlich ab und ungleich geladene (einer negativ, einer positiv) ziehen sich immer an.

Magnetische Kraftwirkungen werden nicht von den Ladungen direkt verursacht. Es gibt keine magnetischen Ladungen.

Die magnetischen Kräfte werden durch Elementarmagnete im Material verursacht, die durch winzige Kreisströme mit einem magnetischen Moment entstehen. Meist ist der Elektronenspin der stärkste Elementarmagnet im Material. Ein magnetische Kraftwirkung kommt zu Stande, wenn benachbarte Elektronenspins parallel ausgerichtet werden.

Die Kräfte eines Magneten können zerstört werden, wenn die Ausrichtung der Elementarmagnete im Material durchmischt wird. Dies kann durch Erhitzen oder starke Schläge auf den Magneten geschehen. Auch kann ein starker Magnet einen schwächeren Magneten entmagnetisieren oder dessen Polarisation umdrehen. Es gibt da-

neben noch die Kraft eines Magnetfeldes auf eine bewegte Ladung, die als Lorentzkraft bezeichnet wird. Bewegt sich eine Ladung in einem Magnetfeld, so wirkt eine Kraft, die senkrecht auf Magnetfeld und Bewegungsrichtung der Ladung steht, wenn Bewegung und Magnetfeld selbst nicht völlig parallel zueinander verlaufen. Dies ist die Lorentzkraft.

Es hat einen Grund, dass elektrische und magnetische Kräfte zum Elektromagnetismus zusammengefasst werden.

So gehen von bewegten Ladungen grundsätzlich magnetische Kräfte aus. Es gibt nur Magnetfelder durch Ladungsbewegung, bei der immer ein Magnetfeld mit einem Nordpol und einem Südpol ensteht. Eigene Quellen des Magnetfeldes, wie die Ladung die Quelle des elektrischen Feldes ist, gibt es nicht. Bei den Elektromagneten beispielsweise fließt ein starker Strom durch eine Spule, wodurch eine starke magnetische Kraftwirkung entsteht.

Auch die magnetischen Kräfte der Permanentmagnete werden durch mikroskopische Ladungsbewegung in der Materie verursacht. Von ruhenden Ladungen dagegen gehen elektrische Kräfte aus. Ladungen verursachen also magnetische Kräfte bei Bewegung und elektrische Kräfte im Ruhezustand. Magnetische und elektrische Kräfte müssen also durch eine Transformation des Bewegungszustandes ineinander übergehen. Dies wird durch die Elektrodynamik, die Theorie des Elektromagnetismus, mathematisch beschrieben.

Die magnetischen Kräfte wirken immer entlang des Magnetfeldes. Dieses kann durch Feldlinien dargestellt werden. Die Feldlinien geben dann auch die Richtung der magnetischen Kräfte an und die Größe der Kraftwirkung steigt mit der Dichte der magnetischen Feldlinien.

Es ist auch möglich, sich die magnetischen Kräfte als ein physikalisches Prinzip der Minimierung der Gesamtenergie eines Systems vorzustellen. So fällt ein Körper durch die Gravitationskraft zu Boden, weil er am Boden eine minimale potentielle Energie besitzt.

Auch zwei Magnete, die sich gegenüberstehen, ebenso wie ein Magnet, der sich in einem gewissen Abstand von einer ferromagnetischen Platte entfernt befindet, können die Gesamtenergie des "Gesamtsystems" noch minimieren. Zwischen den Magneten bzw. zwischen einem Magneten und einer Eisenplatte befindet sich nämlich magnetische Energie. Die Größe der Feldenergie eines Magneten wird durch das Energieprodukt beschrieben.

Wenn sich die Magnete aneinander annähern, so wird die magnetische Energie des Luftraums verkleinert. Berühren sich die Magnete, so ist der Luftraum und damit auch die Feldenergie in diesem Bereich Null und damit minimal. Physikalisch wirken immer Kräfte in Richtung eines energetischen Minimums. Die Größe der Kraft ist dabei proportional zur Änderung der magnetischen Energie bei Annäherung der Magnete.

Grundsätzlich gilt für jede Kraft F in einem Energie-Potential U:

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U$$

Dabei bezeichnet $\vec{\nabla}$ den "Ableitungsvektor" in allen Raumrichtungen (mathematisch auch "Gradient" genannt) und kann geschrieben werden als

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

wobei $\frac{\partial}{\partial x}$ die "Änderung" entlang der x-Achse, also die partielle Differentiation nach χ bezeichnet.

Ist im Potential U die Änderung in einer Richtung besonders stark, so wirkt in dieser Richtung eine besonders starke Kraft.

Die Größe der magnetischen und elektrischen Felder in Abhängigkeit von Strömen und Ladungen wird mathematisch exakt durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben.

Die Maxwell-Gleichungen sind sehr aufwändig zu lösen. Es gibt jedoch mehr oder weniger gute Näherungsformeln, beispielsweise zur Berechnung der magnetischen Kraft an der Oberfläche eines zylinderförmigen Elektromagneten. Dazu kann zunächst über eine Näherung das Magnetfeld *H* berechnet werden:

$$H = \frac{nI}{\sqrt{l^2+4R^2}}$$

wobei *n* die Windungszahl der Spule des Elektromagneten, *l* die Länge der Spule, *R* den Radius der Spule und *I* den Strom durch die Spule bezeichnet.

Für einen zylinderförmigen Magneten mit der magnetischen Flussdichte *B* und einer Polfläche *A* kann die Kraft *F* näherungsweise berechnet werden gemäß:

$$F = \frac{1}{\mu\mu_0} AB^2$$

Dabei bezeichnet μ_0 die magnetische Permeabilität des Vakuums und μ die magnetische Permeabilität des Materials, welches dem *B-Feld* ausgesetzt ist.

Da aus dem Magnetfeld *H* leicht die magnetische Flussdichte *B* berechnet werden kann:

$$H = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot B$$

kann für die Spule die Kraft berechnet werden und es folgt unter Verwendung der Formel für die Polfläche *A* in Abhängigkeit des Magnetradius *R*, nämlich $A = \pi R^2$:

$$F = \frac{1}{\mu\mu_0} AB^2 = \mu\mu_0 AH^2 = \mu\mu_0 H^2 \pi R^2$$

und dies ist für den Spezialfall der zylinderförmigen Spule mit Radius *R* und Länge *l*:

$$F = \mu\mu_0 H^2 \pi R^2 = \frac{\mu\mu_0 \pi R^2 n^2 I^2}{(l^2+4R^2)}$$

Für einen Elektromagneten mit Radius *R* = 3 cm bei einem Strom *I* von 10 Ampere in einer Spule mit *n* = 1'000 Windungen folgt bei einer Länge der Spule von *l* = 10 cm ungefähr:

$$F = \frac{\mu\mu_0 \pi R^2 n^2 I^2}{(l^2+4R^2)} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot 10^2}{10^{-2}+4 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}$$

Der Elektromagnet könnte also etwa 26.1 Newton entsprechend etwa 2.7 kg heben. Für einen Strom von 10 Ampere ist dies nicht sehr viel. Deshalb werden in Elektromagnete oft Eisenkerne eingesetzt, die die magnetische Kraftwirkung durch eine wesentlich höhere magnetische Permeabilität μ des Eisens um ein Vielfaches erhöhen.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

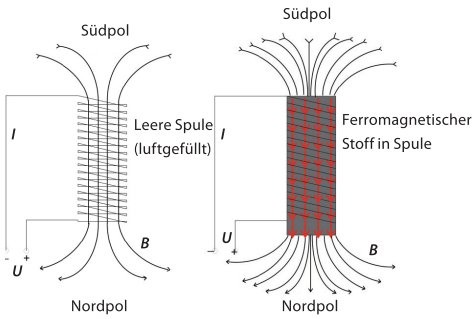
Magnetische Polarisation

Unter magnetischer Polarisation eines ferromagnetischen Materials versteht man die Ausrichtung der Elementarmagnete im Material, also den Prozess der Magnetisierung. Oft wird auch die Richtung und Stärke der magnetischen Kräfte, die durch die ausgerichteten Elementarmagnete zu Stande kommt, als magnetische Polarisation bezeichnet. Von Magneten mit umgekehrter Polarisation spricht man, wenn sich der Nordpol des einen Magneten an der Stelle des Südpols des anderen Magneten befindet und umgekehrt.

Ausführliche Erklärung

Unter magnetischer Polarisation versteht man den Prozeß der Ausrichtung magnetischer Momente. Nach vollzogener Ausrichtung wird mit der Polarisation die Richtung bezeichnet, entlang derer die Elementarmagnete ausgerichtet wurden. Die magnetische Polarisation äußert sich als Magnetisierung und gibt dabei auch die Richtung der Magnetisierung an. Bei zwei verschiedenen Magneten spricht man von umgekehrter Polarisation oder auch entgegengesetzter Polarisierung, wenn beide Magnete an entgegengesetzten Enden ihren Nord- und entsprechend ihren Südpol haben.

Physikalisch entsteht magnetische Polarisation dadurch, dass in Materie die vorhandenen magnetischen Momente durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden. Dadurch summieren sich die magnetischen Kräfte aller magnetischen Momente und es kommt zu einer Verstärkung des äußeren Magnetfelds um den Faktor μ, die magnetische Permeabilität. Dies ist genau dann der Fall, wenn in der Materie magnetische Momente vorhandenen sind, die auch ausgerichtet werden können. Dies können beispielsweise einzelne Elektronenspins sein. Materialien mit dieser Eigenschaft sind paramagnetisch oder sogar ferromagnetisch. Der Prozeß der Polarisation von Materie ist beobachtbar, wenn ein ferromagnetisches Material in ein äußeres Magnetfeld eingebracht wird.



*Legt man an die Enden einer Spule eine Spannung **U** an, so fließt ein Strom **I**. Dieser Strom wiederum bedingt eine magnetische Flussdichte **B**. Die Größe der Flussdichte hängt dabei entscheidend von der magnetischen Permeabilität des von der Spule eingeschlossenen Volumens ab. Ist die Spule luftgefüllt ($\mu = 1$, linke Seite), so bildet sich ein magnetischer Fluss B, der in der Abbildung durch Feldlinien dargestellt ist. Wird in die Spule jedoch ein ferromagnetischer Stoff eingebracht dessen Permeabilität größer als 1 ist (für Eisen kann μ Werte bis 100'000 annehmen), so richten sich die atomaren Spins des Materials parallel zum erzeugten Magnetfeld aus (die atomaren Spins sind rot eingezeichnet, rechte Seite). Der magnetische Fluss **B** ist durch diesen Prozess der sogenannten magnetischen Polarisation deutlich größer. An der Oberfläche des Magneten kann dann ein deutlich stärkeres Magnetfeld gemessen werden und die magnetischen Kräfte einer solchen Spule mit magnetisch polarisiertem Eisenkern sind ebenfalls deutlich größer.*

Wirkt ein äußeres Magnetfeld H_0 auf ein Material der magnetischen Permeabilität μ, so stellt sich eine magnetische Flussdichte B ein, die um den Faktor μ des Materials größer ist als im Vakuum: $B = \mu\mu 0 H_0$.

Diese scheinbare Veränderung der magnetischen Flussdichte, welche durch den Einfluss der Materie im Gegensatz zum Vakuum entsteht, ist die magnetische Polarisation und wird mit dem Buchstaben J bezeichnet. Ein ferromagnetischer Stoff vergrössert beispielsweise die magnetische Flussdichte. Die magnetische Polarisation in einem äusseren Feld H_0 wird durch die magnetische Suszeptibilität χ des Materials bestimmt: $J = \chi \mu_0 H_0$.

Wegen $B = \mu_0 H_0 + J$ gilt, dass $\mu = (1 + \chi)$ den Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität χ und magnetischer Permeabilität μ darstellt.

Im Experiment kann die magnetische Polarisation festgestellt werden, indem die magnetische Flussdichte am Ende einer Drahtspule gemessen wird, wenn ein Strom durch die Spule fließt. Dies kann zum Beispiel mit einer Hall-Sonde durchgeführt werden. Wird in die Spule ein ferromagnetisches Material eingebracht, zum Beispiel ein Zylinder aus Eisen, so wird man eine viel größere magnetische Flussdichte messen als ohne den Eisenkern.

Im Vakuum ($\mu = 1$) entspricht dem Magnetfeld H_0 eine magnetische Flussdichte $B = \mu_0 H_0$.

Durch die Materie kommt noch die magnetische Polarisation J hinzu: $B = \mu_0 H_0 + J$.

Dies entspricht einer Vergrößerung des Magnetfeldes H im Vergleich zum äußeren Magnetfeld H_0 um die Magnetisierung M:

$H = H_0 + M$.

Magnetische Polarisation entspricht somit grundsätzlich der Magnetisierung. Die Magnetische Polarisation ist die magnetische Flussdichte, welche zum Magnetfeld einer bestimmten Magnetisierung gehört. Die Magnetisierung ist ein Magnetfeld, die magnetische Polarisation ist dagegen eine magnetische Flussdichte.

Wegen $B=\mu_0 H$ folgt $B=\mu_0 H_0+\mu_0 M$.

Wegen $B=\mu_0 H_0+J$ ist dann wiederum die magnetische Polarisation J gleich dem Produkt aus der Magnetisierung M und der Permeabilitätskonstanten des Vakuums μ_0: $J=\mu_0 M$.

Die Magnetisierung wird in Ampere pro Meter (A/m) gemessen, die Einheit der magnetischen Polarisation ist dagegen gleich der Einheit der magnetischen Flussdichte Tesla (T).

In Ferromagneten bleibt ein Teil der magnetischen Polarisation erhalten auch wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird. Diese verbleibende magnetische Polarisation wird als Remanenz bezeichnet. Grund für die verbleibende magnetische Polarisation in ferromagnetischen Materialien ist die permanente Ausrichtung der magnetischen Momente der Elektronenspins. Die Elektronenspins verbleiben aufgrund der Austauschwechselwirkung im ausgerichteten Zustand. Die Ausrichtung der magnetischen Momente kann dann nur durch Wärmezufuhr, durch harte Schläge oder durch ein passendes Gegenfeld der Koerzitivfeldstärke zerstört werden.

In Diamagneten sind keine permanenten magnetischen Momente vorhanden. Bringt man ein diamagnetisches Material in ein äußeres Magnetfeld ein, so kommt es aber dennoch zu einem Effekt, nämlich zur Induktion von Kreisströmen in dem Material. Die Induktion von Kreisströmen im Material ist ein Effekt, der auch in paramagnetischen und ferromagnetischen Substanzen vorhanden ist, aber durch die permanenten magnetischen Momente, also den Para- und Ferromagnetismus, überlagert wird. Die induzierten Kreisströme besitzen selbst magnetische Momente. Diese verstärken nun jedoch nicht das äußere Feld sondern schwächen es (gemäß der Lenzschen Regel) ab, weil sie dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet sind.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetische Sättigung

Wird ein ferromagnetischer Körper magnetisiert, so steigen die magnetischen Kräfte zunächst proportional zur Stärke des magnetisierenden Feldes an. Irgendwann jedoch wird eine Sättigung erreicht und die magnetischen Kräfte steigen kaum noch. Dieser Effekt wird magnetische Sättigung genannt und ist der Grund für die begrenzte Stärke von Permanentmagneten. Wegen der magnetischen Sättigung kann es keine beliebig starken Magnete geben.

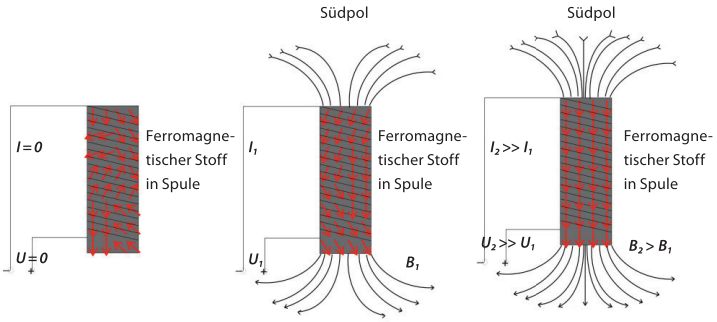
Ausführliche Erklärung

Die Sättigungsmagnetisierung ist die maximal mögliche Magnetisierung eines Materials. Diese Tatsache wird als Magnetische Sättigung bezeichnet. Versucht man, die Magnetisierung noch weiter zu erhöhen, so verhält sich das Material bei einer weiteren Erhöhung des äußeren Magnetfeldes wie der leere Raum (das Vakuum). Wie die Magnetisierung selbst kann auch die magnetische Sättigung besonders bei ferromagnetischen Stoffen beobachtet werden.

Wird ein Ferromagnet in ein äußeres Magnetfeld H eingebracht, so steigt die magnetische Flussdichte ***B*** sehr stark an. Dies liegt daran, dass durch das Magnetfeld die Elektronenspins in der Materie des Ferromagneten ausgerichtet werden und sich die magnetischen Momente dieser Spins, also die elementaren Magnete im Material, parallel anordnen. Dieser Prozess wird auch magnetische Polarisation genannt. Dadurch wird das äußere Feld verstärkt, wodurch es zu einem starken Anstieg der magnetischen Flussdichte und des Magnetfeldes außerhalb des Ferromagneten kommt.

Irgendwann jedoch sind alle vorhandenen Spins parallel ausgerichtet.

In diesem Fall ist keine weitere Verstärkung des äußeren Magnetfeldes mehr möglich, wenn dieses noch weiter erhöht wird. Die Flussdichte verhält sich dann bei einer weiteren Vergrößerung des äußeren Magnetfeldes wie im Vakuum.



*Die Abbildung zeigt den Verlauf der magnetischen Flussdichte **B** bei der Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials in einer Spule. Ohne Strom **I (I = 0)** also ohne Spannung **U (U = 0)** sind die Elektronenspins (rot eingezeichnet) nur in Weissschen Bezirken parallel ausgerichtet. Insgesamt hebt sich die Magnetisierung auf und ist im Aussenraum Null (linkes Bild). Beim Anlegen eines Stroms I_1 (Erhöhung der Spannung **U** bis auf den Wert U1) steigt die magnetische Flussdichte **B** stark an (auf den Wert B_1), weil die verschiedenen Weissschen Bezirke verschmelzen und sich mehr und mehr atomare Spins parallel ausrichten. Wird der Spulenstrom I dann noch weiter auf den Wert I2 erhöht, der viel grösser sein kann als I_1, so beobachtet man, dass die magnetische Flussdichte und damit die magnetischen Kräfte nur noch schwach ansteigen (auf den Wert B_2, der nur wenig grösser ist als B_1). Es sind dann alle Spins parallel ausgerichtet und die weitere Erhöhung des Stroms bringt nur noch einen schwachen Anstieg der magnetischen Kräfte.*

Im Experiment kann magnetische Sättigung beobachtet werden. Dazu benötigt man eine Spule mit Eisenkern, eine regelbare Spannungsquelle und ein Messgerät für die magnetische Flussdichte, z.B. eine Hall - Sonde. Im Experiment wird dann die magnetische Flussdichte an der Oberfläche des Eisenkerns in Abhängigkeit vom angelegten Strom gemessen. Wenn man den Strom durch die Eisenspule vergrößert, so steigt die magnetische Flussdichte zunächst deutlich an. Bei einer Verdopplung des Stroms verdoppelt sich näherungsweise auch die Flussdichte. Ab einem gewissen Punkt jedoch kommt es zu einem Sättigungseffekt und die magnetische Flussdichte wird nur noch sehr langsam ansteigen. Dann ist die magnetische Sättigung des Eisenmaterials erreicht. Dies ist bei Eisen bereits bei einer Flussdichte von 1–2 Tesla der Fall.

Im Bereich der Sättigungsmagnetisierung sinkt die magnetische Permeabilität μ des Ferromagneten stark und nähert sich an den Wert $\mu = 1$ an. Damit sinkt auch die magnetische Leitfähigkeit des Ferromagneten auf den Wert des Vakuums.

Man kann sich dies so vorstellen, dass durch die Ausrichtung der atomaren Spins eine erhöhte Leitfähigkeit für magnetische Felder besteht. Durch einen Ferromagneten "passen" wesentlich mehr magnetische Feldlinien als durch das Vakuum. Wird das Feld jedoch so stark, dass diese erhöhte Leitfähigkeit maximal ausgeschöpft ist, so "passen" durch den Ferromagneten bei einer weiteren Vergrößerung des Magnetfeldes auch nicht mehr Feldlinien hindurch als durch das Vakuum. Dies passiert genau dann, wenn die Sättigungsmagnetisierung erreicht wird.

Wird ein ferromagnetischer Stoff der Sättigungsmagnetisierung ausgesetzt, so ist die maximale Anzahl atomarer Spins parallel ausgerichtet. Die Magnetisierung steigt nicht weiter an. In diesem Fall verbleibt auch die höchstmöglich Magnetisierung, wenn das äußere Feld (ohne es umzupolen) wieder abgeschaltet wird. Diese verbleibende Magnetisierung wird als Remanenz bezeichnet.

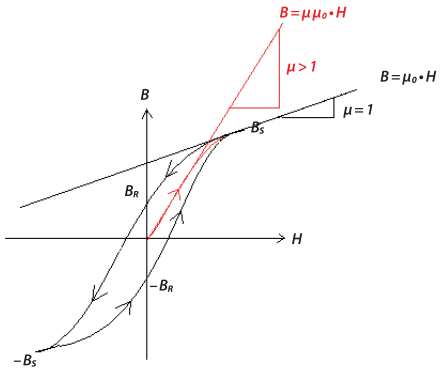
Die Sättigungsmagnetisierung führt dazu, dass ein Magnetfeld durch ein ferromagnetisches Material nicht mehr weiter verstärkt wird.

Dies führt bei zahlreichen technischen Anwendungen zu Nachteilen. Transformatoren beispielsweise sind Päärchen sich gegenüberstehender Spulen mit unterschiedlicher Windungszahl. Die Spulen haben einen Eisenkern, wodurch es in der Spule zu einer sehr effizienten Umwandlung der elektrischen Energie in magnetische Energie eines starken Magnetfeldes kommt. Dieses Magnetfeld wiederum induziert in der gegenüberliegenden Spule einen Strom mit bestimmten durch die Eigenschaften dieser Spule einstellbaren Werten für Spannung und Strom, jedoch ähnlicher Gesamtleistung.

Besitzt der Eisenkern eine große magnetische Permeabilität μ, so ist dieses Verfahren zur Umwandlung der elektrischen Spannung sehr effizient. Es geht dann wenig Leistung verloren. Der Transformator kann beispielsweise die Steckdosenspannung von 220 V auf 12 V reduzieren ohne dass dabei ein großer Verlust entsteht, weil der Strom im Primärkreis entsprechend niedrig ist. Im Bereich der Sättigungsmagnetisierung sinkt nun die Effizienz der Umwandlung von elektrischer in magnetische Energie und damit der Wirkungsgrad des Transformators. Sättigungsmagnetisierung ist deshalb in Transformatoren unerwünscht.

Durch einen Luftspalt, der in den Eisenkern geschnitten wird, kann erreicht werden, dass die Zunahme der magnetischen Flussdichte langsamer erfolgt und die magnetische Sättigung später eintritt. Der Luftspalt hat einen wesentlich höheren magnetischen Widerstand als der Eisenkern. Demnach behindert er die Magnetisierung des ferromagnetischen Materials. Insgesamt steigt die Magnetisierung des Transformatorkerns damit langsamer an als ohne Luftspalt. Jedoch ist die Magnetisierung dafür über einen weiten Bereich proportional zum äußeren Feld.

Somit hat in der Technik der Magnetfelder ein Luftspalt eine wirklich technische Bedeutung.



*Die Abbildung zeigt eine Hysteresekurve eines magnetisch harten Materials, wie es beispielsweise in Transformatoren Verwendung findet. Der Punkt **Bs** bezeichnet dabei die Sättigungsmagnetisierung. Hier steigt die magnetische Flussdichte **BR** bei einer weiteren Erhöhung des äußeren Magnetfeldes **H** nur noch schwach an (Steigung der schwarzen Gerade hat den Wert **μ₀**, da **μ = 1**). Bei kleineren Magnetfeldern steigt die Magnetisierung um den Faktor **μ** stärker an (rote Gerade). Für Eisen kann **μ** den Wert von einigen tausend annehmen. Am Punkt der Sättigungsmagnetisierung ist **μ = 1**. Der Punkt **BR** bezeichnet die Remanenz, die verbleibt, wenn das äußere Feld nach einer magnetischen Sättigung wieder abgeschaltet wird.*

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetischer Fluss / magnetische Flussdichte

Der magnetische Fluss ist die magnetische Flussdichte welche durch eine gedachte Fläche läuft. Dabei bezeichnet die magnetische Flussdichte die Dichte der Feldlinien. Je dichter die Feldlinien sind, desto größer ist die magnetische Flussdichte. Da laut den physikalischen Gesetzen der Elektrodynamik, den Maxwellgleichungen, keine Feldlinien einfach so aufhören können, läuft die Flussdichte vom Magneten in den Außenraum weiter.

Ausführliche Erklärung

Der magnetische Fluss Φ kann als Gesamtheit aller magnetischen Feldlinien verstanden werden. Die magnetische Flussdichte B beschreibt entsprechend die Dichte und Richtung der Feldlinien, welche durch eine gedachte Fläche im Raum treten. Wenn die Feldlinien geradlinig verlaufen (zum Beispiel zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten), dann ergibt sich der magnetische Fluss Φ durch eine bestimmte Fläche A, welche senkrecht zum Fluss steht, als Produkt aus der magnetischen Flussdichte B und der Fläche A: $\Phi = B \cdot A$

Indirekt ist die magnetische Flussdichte (*B-Feld*) auch ein Maß für die Stärke des Magnetfeldes. Es ist jedoch nicht ganz richtig, das *B-Feld* selbst als Magnetfeld zu bezeichnen, auch wenn man dies gelegentlich in der Literatur findet. Das Magnetfeld wird meist mit dem Buchstaben H abgekürzt und es gilt der Zusammenhang $B = \mu_0 \mu \cdot H$ mit der magnetischen Permeabilitätskonstante des Vakkums μ_0 und einer materialspezifischen magnetischen Permeabilitätskonstanten μ. Diese ist jedoch meist ungefähr 1, außer bei ferromagnetischen Materialien, für die μ Werte von bis zu 100'000 annehmen kann und bei Supraleitern mit $\mu = 0$. Das Produkt aus μ, μ_0 und Magnetfeld H ergibt das *B-Feld*, also die magnetische Flussdichte B.

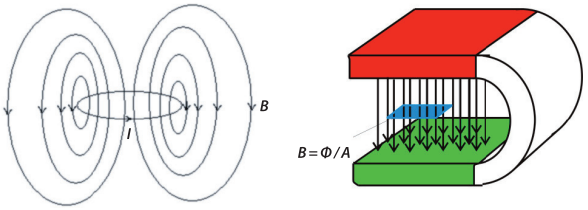


*Abbildung: Ein Strom **I** bedingt grundsätzlich eine magnetische Flussdichte **B**. Von einem Kreisstrom geht ein magnetischer Fluss aus, welcher in der dargestellten Weise die Leiterschleife umschließt. Die Feldlinien sind schematisch gezeichnet. In Wirklichkeit erfüllt der magnetische Fluss den gesamten Raum und die Feldlinien sind als Ganzes immer geschlossen. Sie laufen im Außenraum vom Nordpol zum Südpol und dann durch die Leiterschleife vom Südpol zum Nordpol. Beim Hufeisenmagneten (rechte Seite, Nordpol rot, Südpol grün) laufen sie innerhalb des Materials wieder zurück zum Nordpol. Dabei spielt es für den Verlauf der Feldlinien keine Rolle, ob man von einer magnetischen Flussdichte **B** oder einem Magnetfeld **H** spricht, da beide zueinander proportional sind. Es gilt der Zusammenhang $B = \mu_0 \cdot H$. Die magnetische Flussdichte ist, wie auf der rechten Seite gezeigt, der Anteil des magnetischen Flusses Φ pro Fläche **A** (blau eingezeichnet). **B** ist also proportional zur Anzahl Feldlinien, die durch eine gedachte Fläche treten.*

Die magnetische Flussdichte wird in Tesla (T) gemessen. Der magnetische Fluss entsprechend in Tm². Die Einheit 1 Tm² wird auch als 1 Weber (Wb) bezeichnet.

Die Remanenz eines magnetisierten Materials bezeichnet die magnetische Flussdichte, die nach der Magnetisierung von dem Material ausgeht. Sie wird ebenfalls in Tesla angegeben.

Der magnetische Fluss wird durch Ströme, also durch die Bewegung von Ladungen, verursacht. Durch Ströme entstehen ausschließlich geschlossene Feldlinien. Der magnetische Fluss hat also keinen Anfang und kein Ende. Physikalisch spricht man auch davon, dass es keine Quellen und Senken der magnetischen Flussdichte und des magnetischen Flusses gibt.

Dies wiederum ist der Grund dafür, dass ein Magnet immer zwei Pole haben muss. Einen Nordpol und einen Südpol. Mathematisch wird dieser Sachverhalt durch die Maxwellgleichungen ausgedrückt. Ein typischer stromgetriebener Magnet ist der Elektromagnet.

Auch in Permanentmagneten sind mikroskopische Kreisströme I, nämlich Bewegungen der Elektronen im Material, für den magnetischen Fluss und damit auch für das Magnetfeld verantwortlich. Diese Kreisströme verursachen einen magnetischen Fluss B, der aus dem Kreisstrom (Stromschleife) austritt, in einem Bogen zur Unterseite der Stromschleife läuft und sich dort wieder schließt (vgl. Abbildung). Durch den Kreisstrom entsteht ein magnetisches Moment mit dem Nordpol oberhalb der Leiterschleife und dem Südpol unterhalb der Leiterschleife. Dreht man die Richtung des Stromes um, so werden Nord- und Südpol ebenfalls vertauscht.

Entsprechend wird der magnetische Fluss physikalisch über seine induktive Wirkung auf eine Leiterschleife definiert. Wird eine Leiterschleife mit bekannter Fläche in ein Magnetfeld eingebracht, so wird ein Spannungsstoß induziert. Das zeitliche Integral über diesem Spannungsstoß ist gleich dem magnetischen Fluss Φ:

$$\int U_{ind} dt = B \cdot A = \Phi$$

Mittels einer Leiterschleife und der in dieser Leiterschleife induzierten Spannung kann der magnetische Fluss somit auch gemessen werden. Meist wird dazu jedoch eine präzisere Hall - Sonde eingesetzt.

Betrachtet man die magnetische Flussdichte ***B***, welche durch eine gekrümmte Fläche läuft, so muss der magnetische Fluss als Integral der vektoriellen Flussdichte über der Flächennormalen bestimmt werden:

$$\int \vec{B} d\vec{A} = \Phi$$

Da die Feldlinien geschlossen sind, müssen alle Feldlinien, welche durch eine geschlossene Oberfläche (z.B. eine Kugelschale) nach außen treten, auch wieder in die Kugel hineinlaufen und umgekehrt. Dies äußert sich mathematisch darin, dass der Fluss durch geschlossene Flächen immer gleich Null ist und äquivalent dazu keine Quellen oder Senken der magnetischen Flussdichte existieren:

$$\oint_{A-geschlossen} \vec{B} d\vec{A} = 0 \Leftrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Dies ist äquivalent zur sogenannten Divergenzfreiheit der magnetischen Flussdichte, wie durch eine der vier Maxwellgleichungen ausgesagt wird.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetischer Widerstand

Der magnetische Widerstand ist ein Maß für den Widerstand, der magnetischen Feldlinien beim Fluss durch Materie entgegensteht. Ist der magnetische Widerstand hoch, so können magnetische Feldlinien nur schlecht durch das Material hindurchdringen. Der magnetische Widerstand ist dementsprechend umgekehrt proportional zur magnetischen Permeabilität (Durchlässigkeit) μ. Ferromagnetische Stoffe haben also einen sehr kleinen magnetischen Widerstand.

Ausführliche Erklärung

Im Magnetismus ist der sogenannte magnetische Fluss Φ die Entsprechung des elektrischen Stroms I der Elektrizität. Mit Hilfe der magnetischen Spannung U_{mag} und dem magnetischen Fluss Φ kann also ein magnetischer Widerstand R_{mag} definiert werden über die Beziehung:

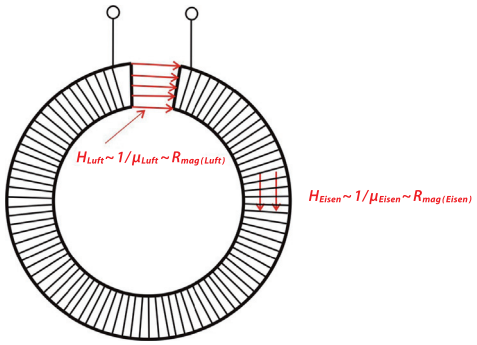
$U_{mag}=R_{mag}\cdot\Phi$ Dies entspricht dem Ohmschen Gesetz in der Elektrizitätslehre $U=R\cdot I$, wobei U die elektrische Spannung, I den elektrischen Strom und R den elektrischen (Ohmschen) Widerstand bezeichnet.

In Materialien mit grosser Permeabilität ("Durchlässigkeit") ist der magnetische Fluss sehr gross. Der magnetische Widerstand ist daher sehr klein. Dies gilt für ferromagnetische Materialien wie zum Beispiel Eisen.

Ein Supraleiter dagegen hat einen unendlich grossen magnetischen Widerstand. Der Supraleiter verdrängt den magnetischen Fluss vollständig aus seinem Innenraum. Es kann kein magnetisches Feld in einen Supraleiter eindringen. Die Permeabilität des Supraleiters ist Null.

Mit Hilfe der Vorstellung magnetischer Widerstände können wie in einem Stromkreis Reihen- und Parallelschaltungen verschiedener magnetischer Widerstände berechnet werden.

Beispielsweise kann man eine ringförmige Spule der Länge L mit einem Eisenkern und einem Luftspalt der Breite d betrachten. In dieser Spule ist das Magnetfeld im Inneren des Eisenkerns geringer als im Luftspalt. Die Feldstärke verhält sich hier indirekt proportional zur Permeabilität, also direkt proportional zum magnetischen Widerstand. Dies ist in völliger Analogie zum elektrischen Stromkreis. An grossen Widerständen herrscht ein grosses elektrisches Feld, weil am Widerstand eine grosse Spannung abfällt.



Eine lange ringförmige Spule mit einem Eisenkern stellt einen magnetischen Widerstand dar. Ein Luftspalt bildet ebenso einen magnetischen Widerstand. Da die magnetische Permeabilität der Luft wesentlich kleiner ist als die Permeabilität des Eisens, ist der magnetische Widerstand des Luftspaltes größer als der Widerstand des Eisenkerns. Wird der Luftspalt kleiner gemacht, sinkt der Widerstand des Luftspaltes.

Die magnetische Spannung, die dem Luftspalt zuzuordnen ist, ist wie der magnetische Widerstand entsprechend groß. Sie ist näherungsweise das Produkt aus Magnetfeld und Spaltbreite d:

$$U_{magnetisch,Luftspalt} = H_{Luft} \cdot d = \frac{B}{\mu_0 \mu_{Luft}} \cdot d\,.$$

Die magnetische Spannung der Spule (mit Eisenkern) beträgt dagegen:

$$U_{magnetisch,Spule} = H_{Spule} \cdot L = \frac{B}{\mu_0 \mu_{Eisen}} \cdot L\,.$$

Der magnetische Fluss ist im Eisenkern wie auch im Luftspalt gleich groß. Er läuft durch die Querschnittsfläche A und beträgt

$\Phi = B \cdot A$.

Für den magnetischen Widerstand der Eisenkernspule gilt folglich:

$$R_{magnetisch,Spule} = \frac{U_{magnetisch,Spule}}{\Phi} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{Eisen}} \cdot \frac{L}{A}$$

Während der magnetische Widerstand des Luftspaltes durch

$$R_{magnetisch,Luftspalt} = \frac{U_{magnetisch,Luftspalt}}{\Phi} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{Luft}} \cdot \frac{d}{A}$$

gegeben ist. Je "länger" also ein Element des magnetischen Serienkreises ist, desto größer ist der zugehörige magnetische Widerstand.

Je größer die Permeabilität μ und die Querschnittsfläche des Bauelementes A ist, desto kleiner ist der magnetische Widerstand.

Wie in einem elektrischen Stromkreis in Reihenschaltung die Widerstände der hintereinandergeschalteten Bauteile addiert werden müssen, um den Gesamtwiderstand des Stromkreises zu erhalten, so gewinnt man den gesamten magnetischen Widerstand des gezeigten magnetischen Kreises ebenso durch Addition der magnetischen Widerstände der Einzelkomponenten. Für die gezeigte Ringspule mit Luftspalt gilt folglich:

$$R_{magnetisch} = R_{magnetisch,Spule} + R_{magnetisch,Luftspalt}$$

Im elektrischen wie auch im magnetischen Fall fällt eine Spannung an den Widerständen ab, die proportional zum jeweiligen Widerstand ist.

Ebenso könnte man magnetische Komponenten parallel schalten. In diesem Fall addieren sich wie in einem elektrischen Parallelkreis die magnetischen Widerstände reziprok.

Das bedeutet, dass der Gesamtwiderstand durch Parallelschaltung im Vergleich zu den Einzelkomponenten sinkt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetisches Moment

Das magnetische Moment ist ein Maß für die magnetischen Kräfte eines Elementarmagneten oder eines Kreisstroms. Über das magnetische Moment wird meist die magnetische Wirkung des Spins von Elementarteilchen angegeben. So besitzt der Elektronenspin ein bestimmtes magnetisches Moment. Die atomaren Spins in para- und ferromagnetischen Materialien besitzen ein starkes magnetisches Moment.

Ausführliche Erklärung

Das magnetische Moment bemisst die Stärke des von einem Kreisstrom ausgehenden Magnetfeldes. Für das magnetische Moment $\vec{m}$ eines Kreisstroms *I*, der eine Fläche *A* einschließt gilt:

$$\vec{m} = I \cdot \vec{A}.$$

Auch die Stärke der magnetischen Eigenschaften von Elektronenspins oder der Spins anderer Elementarteilchen wird über das magnetische Moment angegeben.

Das magnetische Moment ist ein Vektor, der senkrecht auf der stromumflossenen Fläche steht und dessen Pfeilspitze vom Nordpol wegzeigt. Entsprechend laufen die Feldlinien geschlossen vom Nordpol zum Südpol und dann in der Leiterschleife parallel zum magnetischen Moment wieder zum Nordpol (siehe Abbildung).

Da es keine Magnetfelder mit nur einem Pol gibt (Monopolmoment), ist das einfachste magnetische Moment ein sogenanntes Dipolmoment. Es besitzt immer zwei entgegengesetzte Pole. Elektrische Felder dagegen können auch ein Monopolmoment besitzen. Dies ist das Feld, welches von einer einzelnen Punktladung ausgeht. Zwei Ladungen in einem festen Abstand bilden dagegen, analog zum Magnetismus, ein elektrisches Dipolmoment. (Siehe Abbildung)

Auch bei Permanentmagneten wird die magnetische Wirkung über Kreisströme im Material erklärt. Dabei wird angenommen, dass die Elektronen einen Elektronenspin besitzen, von welchem ein magnetisches Moment ausgeht. Bei der Magnetisierung werden all diese magnetischen Momente parallel ausgerichtet. Man spricht dann auch von magnetischer Polarisation. In ferromagnetischen Materialien führt dies bei hinreichend starker Ausrichtung zu einer permanenten Magnetisierung. Die magnetische Polarisation verschwindet also nicht wieder, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird. Die verbleibende magnetische Polarisation wird auch als Remanenz bezeichnet. Die magnetischen Momente aller Elektronenspins wurden dann parallel ausgerichtet und ergeben eine makroskopische Magnetisierung, welche durch die Summe aller magnetischen Momente der Elektronenspins zu Stande kommt.

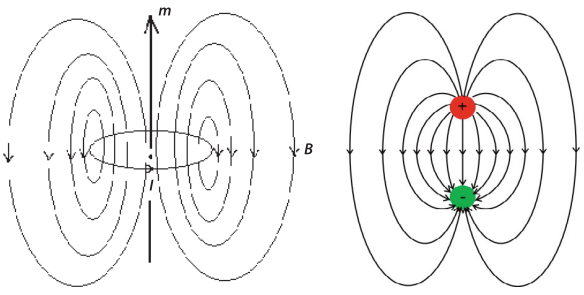


Abbildung: *links: Ein Strom I bedingt grundsätzlich eine magnetische Flussdichte **B**. Die Stärke dieser magnetischen Flussdichte sowie ihre Richtung innerhalb der Leiterschleife kann auch durch das magnetische Moment m charakterisiert werden.*

Auf der rechten Seite ist ein elektrischer Dipol gezeigt. Das elektrische Feld zweier entgegengesetzt geladener Körper hat die gleiche Form wie das Magnetfeld einer Leiterschleife. Man spricht hierbei von einem Dipolfeld mit einem zugehörigen Dipolmoment. Eine einzelne Ladung hat ein elektrisches Monopolmoment.

Grund für die permanente Ausrichtung ist die Austauschwechselwirkung zwischen allen magnetischen Momenten der Elektronenspins. Diese Austauschwechselwirkung stabilisiert die ausgerichteten Elektronenspins untereinander und es kommt zur Remanenz. Die Ausrichtung der magnetischen Momente kann durch Wärmezufuhr, welche die Bewegung der Elektronen und damit die Durchmischung der magnetischen Momente der Elektronenspins fördert, gestört werden. Auch harte Schläge auf einen Permanentmagneten zerstören die Magnetisierung. Schließlich wird die Magnetisierung durch ein Gegenfeld der Koerzitivfeldstärke zerstört, weil auf die magnetischen Momente der ausgerichteten Elektronenspins durch das Gegenfeld eine Kraft wirkt, die versucht, die magnetischen Momente in die entgegengesetzte Richtung zu drehen.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetische Spannung

Die magnetische Spannung beschreibt das Magnetfeld zwischen Nord- und Südpol unter Berücksichtigung des Abstands der Pole. Ist das Magnetfeld an einer bestimmten Stelle sehr groß, so ist die magnetische Spannung auch entsprechend groß. Ähnliches gilt in der Elektronik. Die elektrische Spannung ist gleich dem elektrischen Feld multipliziert mit dem Abstand der Pole. Ein großes elektrisches Feld bei einem großen Abstand der Pole kann nur mit einer entsprechend großen Spannung erzeugt werden.

Ausführliche Erklärung

Wie über elektrische Felder eine elektrische Spannung definiert wird, so kann man auch über magnetische Felder eine magnetische Spannung definieren. Dazu ist es hilfreich, sich den elektrischen Fall noch einmal vor Augen zu halten:

Liegt zwischen zwei elektrisch geladene Kondensatorplatten eine elektrische Spannung (***U***) von beispielsweise 1'000 Volt an und haben diese Kondensatorplatten 1 Meter Abstand (***d***), so kann das elektrische Feld (***E***) direkt angegeben werden: Es gilt:

$$E = \frac{U}{d}$$

Das elektrische Feld beträgt also 1'000 V/m.

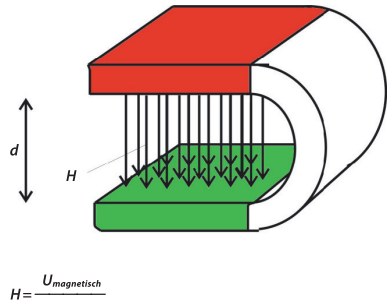
Umgekehrt kann man die elektrische Spannung zwischen den Platten erhalten, indem man das elektrische Feld (wenn dieses entlang des Weges konstant ist) mit der Länge des Weges, also dem Abstand der Platten, multipliziert.

Ist das elektrische Feld vom Ort (***x***) abhängig, so muss die elektrische Spannung durch ein Wegintegral über das elektrische Feld ausgerechnet werden:

$$U = \int_0^d E(x)dx$$

wobei bei Ortsunabhängigkeit von ***E*** wie gehabt einfach mit der Weglänge d multipliziert werden kann:

$$U = \int_0^d E dx = E \cdot d$$



*Die Abbildung veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der magnetischen Spannung **U** zwischen Nordpol und Südpol des Hufeisenmagneten und der magnetischen Feldstärke **H**. Die Formel gilt dabei nur für den einfachen Fall eines ortsunabhängigen Magnetfeldes **H**.*
*Herrscht in einem Hufeisenmagneten ein Magnetfeld der Stärke **H** und haben die Pole einen Abstand **d**, so ist die magnetische Spannung zwischen den Polen **U = H • d**. Ist der Abstand größer, so muss die Spannung zwischen den Polen größer sein, um das gleiche Feld zu erhalten.*

Man kann sich die elektrische Spannung wie die Kraft einer Pumpe vorstellen, die in einem Stromkreislauf die Ladungen wie in einem Wasserkreislauf das Wasser pumpt. Die Wassermenge entspricht dem Strom und hängt bei gegebener Pumpkraft (Spannung) nur von der Dicke der Leitungsrohre ab (Widerstand). Die Leistung (***P***) der Pumpe entspricht dem Produkt aus Pumpstärke (Spannung, ***U***) und Wassermenge (Strom, ***I***):

$$P = U \cdot I$$

Ebenso kann man sich die magnetische Spannung vorstellen. Durch die Spannung zwischen zwei Magnetpolen mit konstantem Abstand wirkt eine Kraft auf magnetische Momente, die proportional zur magnetischen Spannung ist. Bei konstantem Abstand der Pole ist also das Magnetfeld proportional zur magnetischen Spannung.

Die magnetische Spannung hängt also mit dem Magnetfeld genauso zusammen wie die elektrische Spannung mit dem elektrischen Feld:

Es muss das magnetische Feld ***H*** mit dem Abstand d der Pole, die dieses Feld erzeugen, multipliziert werden, um die magnetische Spannung zu erhalten. Ist das magnetische Feld zwischen den Polen (z.B. bei einem Hufeisenmagneten), so gilt:

$$U_{magnetisch} = \int_0^d H dx = H \cdot d$$

Dem elektrischen Strom entspricht der magnetische Fluss Φ. Mit Hilfe der magnetischen Spannung U_{mag} und dem magnetischen Fluss Φ kann also auch ein magnetischer Widerstand R_{mag} definiert werden:

$$R_{mag} = \frac{U_{mag}}{\Phi}$$

In Materialien mit großer magnetischer Permeabilität ("Durchlässigkeit") ist der magnetische Fluss sehr groß. Der magnetische Widerstand ist indirekt proportional zum magnetischen Fluss und damit indirekt proportional zur magnetischen Permeabilität. Ein Supraleiter hat einen unendlich großen magnetischen Widerstand. Die magnetische Permeabilität eines Supraleiters ist Null.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

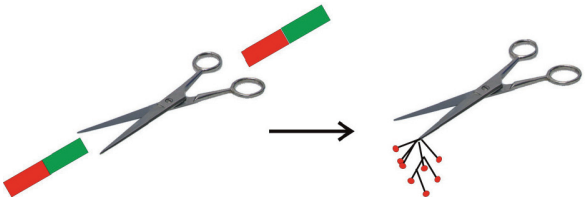
Magnetisierung

Nach einer Magnetisierung wird ein zuvor unmagnetisches Material (z.B. ein Stück Eisen) magnetisch. Nur ferromagnetische Stoffe (Eisen, Nickel und Kobalt) lassen sich zu stark magnetisieren. Die Magnetisierung wird durch eine parallele Ausrichtung der Elementarmagnete im Material erreicht. Dazu muss das Material einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt werden. Die Magnetisierung kann durch harte Schläge, hohe Temperaturen oder entgegengesetzt polarisierte magnetische Felder wieder zerstört werden (Entmagnetisierung).

Ausführliche Erklärung

Wird Materie einem Magnetfeld ausgesetzt, so kommt es grundsätzlich zu einer Magnetisierung. Durch die Magnetisierung entsteht in der Materie ein zusätzliches magnetisches Feld, welches sich mit dem äußeren Magnetfeld überlagert. Man unterscheidet Stoffe mit diamagnetischen, mit paramagnetischen und mit ferromagnetischen Eigenschaften.

Ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet, so spricht man von Paramagnetismus. In ferromagnetischen Körpern ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld ebenfalls gleichgerichtet, aber aufgrund einer besonderen Wechselwirkung, der sogenannten Austauschwechselwirkung, sehr viel stabiler als in einfachen Paramagneten.



Den Effekt der Magnetisierung kann jeder zuhause nachstellen. Wird eine eisenhaltige Schere in das Feld zwischen zwei starken Permanentmagneten gebracht, so kommt es zur Magnetisierung des Materials. Wenn die Magnete vorsichtig auseinandergezogen werden, so kann eine verbleibende Magnetisierung beobachtet werden (Remanenz). Die Schere ist selbst zu einem Magnet geworden.

In diamagnetischen Materialien ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet. Eine starke Magnetisierung ist besonders bei ferromagnetischen Stoffen (z.B. Eisen) beobachtbar.

Dies kann man leicht in einem Experiment nachprüfen:

Wird ein eisenhaltiger Körper (z.B. eine Schere) dem starken Magnetfeld eines Magneten ausgesetzt, so beobachtet man, dass die Schere z.B. eisenhaltige Stecknadeln anziehen kann, obwohl der Magnet von der Schere bereits entfernt wurde. Diese verbleibende Magnetisierung wird als Remanenz bezeichnet.

Die Magnetisierung M, die sich bei einem bestimmten äußeren Magnetfeld einstellt, wird über die magnetische Permeabilität μ quantifiziert.

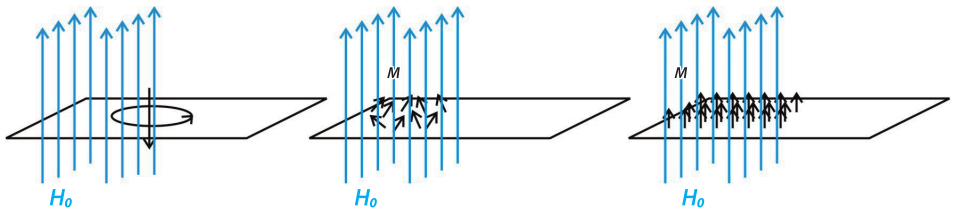
Vereinfacht dargestellt kann man sich vorstellen, dass die Permeabilität μ angibt, wie stark sich das Magnetfeld H durch den Einfluss der Materie verändert, wenn ein äußeres Magnetfeld H_0 anliegt. Dabei gilt: $H = \mu H_0$. Das Magnetfeld H wiederum ist die Summe aus dem von außen angelegten Magnetfeld H_0 und der Magnetisierung des Körpers M: $H = H_0 + M$. Somit gilt für die Magnetisierung:

$M = H - H_0 = \mu H_0 - H_0 = (\mu - 1) H_0$.

Die Permeabilität des Vakuums ist $\mu = 1$. Somit kann das Vakuum nicht magnetisiert werden.
Die Magnetisierung M des Vakuums ist $M = 0$.

Paramagnetische Stoffe haben eine Permeabilität, die etwas größer als 1 ist. Die Permeabilität diamagnetischer Stoffe ist etwas kleiner als 1. Dadurch ist die Magnetisierung negativ. Dies heißt, sie ist dem von außen einfallenden Feld H_0 entgegengerichtet. Bei einem Supraleiter ist die Permeabilität $\mu = 0$. Die Magnetisierung eines Supraleiters ist also dem äußeren Feld entgegengerichtet und vom Betrag genauso groß wie das äußere Feld. Dadurch ist das Innere des Supraleiters feldfrei und der Supraleiter schwebt im Magnetfeld.

Ferromagneten können sehr große Permeabilitätszahlen haben. Bei Eisen kann μ Werte bis 10'000 erreichen, besondere ferromagnetische, sogenannte amorphe Metalle, erreichen Werte von $\mu = 150'000$. Bei so großen Permeabilitäten ist die Magnetisierung in einem äußeren Magnetfeld H_0 näherungsweise $M = \mu H_0$.



*Die Magnetisierung **M** kommt bei Diamagneten durch die Induktion eines Kreisstroms zu Stande, der seiner Ursache (dem äußeren Feld) entgegengerichtet ist. **M** ist also $\mathbf{H_0}$ entgegengerichtet (links). Bei einem paramagnetischen Stoff existieren kleine Elementarmagnete im Material, die sich parallel zum äußeren Feld ausrichten und die Magnetisierung verursachen (mitte). In einem Ferromagneten wird diese Ausrichtung zusätzlich durch die Austauschwechselwirkung stabilisiert und die Magnetisierung ist insgesamt sehr viel größer (rechts).*

Auch bei Para- und Ferromagneten kommt es zur Induktion von Kreisströmen. Diese diamagnetische Magnetisierung wird jedoch vom stärkeren Para- und Ferromagtnetismus überlagert

Zum Verständnis der physikalischen Ursache für Magnetisierung kann man sich vorstellen, dass jeder Stoff aus Atomen mit Atomkernen und Elektronen besteht. Für die Magnetisierungseffekte sind vor allem die Elektronen verwantwortlich.

Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, so werden unter dem Einfluss dieses Magnetfeldes Bewegungen der Elektronen, also Ströme, induziert. Dies verursacht den Diamagnetismus (siehe Abbildung). Nach der Lenzschen Regel sind diese Ströme so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirken. Im Stoff ist deshalb die Magnetisierung dem äußeren Feld entgegengerichtet. Es kann jedoch sein, dass zusätzliche paramagnetische oder ferromagnetische Eigenschaften den Diamagnetismus des Stoffs überlagern. Die Elektronen besitzen nämlich einen sogenannten Elektronenspin, welcher magnetische Eigenschaften besitzt. Die Elektronenspins bilden Elementarmagnete im Material. Der Spin besitzt ein festes magnetisches Moment. Wenn nicht an jedem einzelnen Atom alle Elektronenspins von jeweils einem Elektron mit entgegengesetztem Spin kompensiert werden (meist in Materialien mit einer geraden Anzahl von Elektronen pro Atom), dann können die magnetischen Momente dieser Spins sich im äußeren Magnetfeld ausrichten. In diesem Fall verhält sich die Probe selbst wie ein Magnet. Die Magnetisierung ist dem äußeren Feld gleichgerichtet.

Von einem Ferromagneten spricht man dann, wenn es zu einer Stabilisierung der Ausrichtung der atomaren Spins kommt. Dies wird durch die Austauschwechselwirkung verursacht. Jeder der winzigen Elementarmagnete wird in seiner Ausrichtung stabilisiert. Der Körper bleibt dann auch als Ganzes merklich magnetisch, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird und man beobachtet Remanenz. Bei Paramagneten verschwindet dagegen die Magnetisierung sofort, wenn das äußere Feld ausgeschaltet wird.

Eine Entmagnetisierung eines magnetisierten ferromagnetischen Körpers kann erreicht werden, wenn die ausgerichteten Elektronenspins erneut durchmischt werden.

Dies kann durch Hitze (Erwärmung über die sogenannte Curie-Temperatur), durch starke Stöße oder durch ein magnetisches Feld mit umgekehrter Polarisation erreicht werden.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Magnetismus

Magnetismus ist ein Überbegriff für sämtliche Erscheinungen, die auf magnetische Kräfte zurückgeführt werden. Historisch wurden magnetische Kräfte erstmals an Steinen aus der griechischen Stadt Magnesia beobachtet. Der Magnet bzw. der Magnetismus sind nach dieser griechischen Stadt Magnesia benannt. Der physikalische Hintergrund magnetischer und elektrischer Kräfte wurde erst im 19. Jahrhundert geklärt und 1864 von James Clerk Maxwell mit Hilfe der Maxwellgleichungen mathematisch formuliert.

Ausführliche Erklärung

Unter Magnetismus versteht man die physikalische Erscheinung magnetischer Kräfte. Bereits 500 v. Christus erkannten die Griechen elektrische und magnetische Anziehungs- und Abstoßungskräfte. So existieren Belege der Beobachtung von elektrischen Anziehungskräften zwischen Papierschnipseln und geriebenem Bernstein. Die hierbei wirkenden Kräfte entstehen durch die elektrostatische Aufladung des geriebenen Bernsteins. Thales von Milet beschrieb 500 v. Christus im alten Griechenland die Kraftwirkungen von Steinen aus der Stadt Magnesia auf Eisenteilchen. Der Fundort bei Magnesia gab dem Phänomen des Magnetismus seinen Namen. Es wird sogar angenommen, dass die Chinesen bereits 800 v. Christus, 300 Jahre vor den griechisch dokumentierten Beobachtungen, die Kräfte des Magnetsteins erkannten. Um 1'000 n. Christus wurde in China bereits ein erster primitiver Kompass entwickelt.

Viele Forscher beschäftigten sich seit der Renaissance (um 1500) mit dem Phänomen des Magnetismus. Dabei gab es oft Verwechslungen zwischen Magnetismus und Elektrizität. Umgekehrt bewerteten manche Forscher beide Phänomene als grundsätzlich unterschiedlich. Coulomb bestätigte 1785, dass es im Gegensatz zur Elektrizität unmöglich ist, einen Magneten in seinen Nord- und seinen Südpol zu trennen. Zerbricht man einen Permanentmagneten, so erhält man immer wieder kleinere Magnete mit je einem Nord- und einem Südpol.

1820 erkannte Oersted, dem der Unterschied zwischen Elektrizität und Magnetismus wohl bekannt war, den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Kräften, als er die Ablenkung einer Kompassnadel durch einen stromdurchflossenen Draht entdeckte.

Eine vollständige Erklärung aller elektrischen und magnetischen Erscheinungen im physikalisch mathematisch exakten Sinne erfolgte erst 1864 durch den Physiker James Clerk Maxwell. Er schrieb die nach ihm benannten Maxwellgleichungen auf, welche die elektrischen und magnetischen Felder sowie die resultierenden Kräfte vollständig beschreiben. Die Grundgleichungen des Magnetismus sind zwei der vier Maxwellgleichungen, welche die Vektorfelder der magnetischen Flussdichte beschreiben.

Diese beiden zeitabhängigen Maxwellgleichungen für den Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ mit der Stromdichte $\vec{j}$ und der Änderung der elektrischen Feldstärke $\dot{\vec{E}}$ lauten:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

und

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \frac{1}{c^2}\dot{\vec{E}}.$$

Dabei treten die Permeabilitätskonstante des Vakuums μ_0, die Stromdichte $\vec{j}$ und die Lichtgeschwindigkeit c auf.

Laut den Maxwellgleichungen gibt es nur geschlossene magnetische Feldlinien. Dies wird durch die Gleichung $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ beschrieben. Die Gleichung sagt aus, dass der "offene" Anteil der Feldlinien, das ist die sogenannte Divergenz des magnetischen Feldes, gleich Null ist. Mathematisch ist dies äquivalent dazu, dass es keine magnetischen Monopole, also Magnete mit nur einem Nord- oder nur einem Südpol gibt.

$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \frac{1}{c^2}\dot{\vec{E}}$ sagt aus, dass geschlossene magnetische Feldlinien entweder von Strömen $\vec{j}$ verursacht werden, also von bewegten Ladungen, oder allgemein von der Änderung eines elektrischen Feldes $\dot{\vec{E}}$. Letzteres ist relevant für die Beschreibung elektromagnetischer Wellen, welche sich als wechselseitig erzeugende elektrische und magnetische Schwingungen in den Raum ausbreiten. Die letztgenannte Gleichung erklärt die Beobachtung von Oersted: Die magnetische Kompassnadel ist selbst ein kleiner Permanentmagnet. Der stromdurchflos-

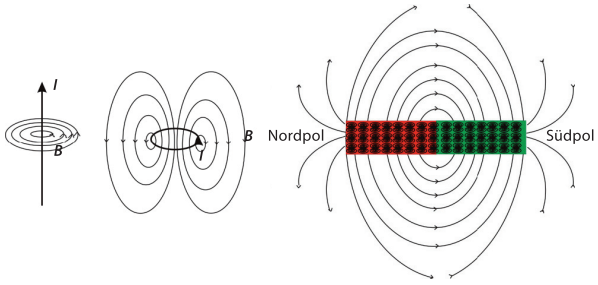
sene Draht verursacht nun aber magnetische Feldlinien, die mit dem Magnetfeld der Kompassnadel wechselwirken und auf die Nadel eine Kraft ausüben.

Von Ladungen selbst gehen wiederum elektrische Kräfte aus. Dies beschreiben ebenfalls zwei Maxwellgleichungen:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

und

$\nabla \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} = \mathbf{0}$. Hierbei bezeichnet ρ die Ladungsdichte als wichtigste Quelle des elektrischen Feldes $\vec{E}$. ε_0 bezeichnet die Dielektrizitätskonstante des Vakuums. Geschlossene Feldlinien (Rotationen) des elektrischen Feldes $\nabla \cdot \vec{E}$ werden analog zu geschlossenen magnetischen Feldlinien durch die Änderung des magnetischen Flusses $\dot{\vec{B}}$ verursacht.



*Die Abb. Zeigt schematisch das Magnetfeld eines Stroms **I** (links) (in den Maxwellgleichungen bezeichnet **j** die Stromdichte, also Strom auf Fläche bezogen). Das Magnetfeld umschließt den Leiter in geschlossenen Wirbeln. Entsprechend kommt das Magnetfeld einer Leiterschleife zu Stande (mitte). Viele Leiterschleifen zusammen (in "gestapelter" Form) ergeben das Magnetfeld einer Spule. Dies ist identisch mit dem Magnetfeld eines Permanentmagneten (rechts). In einem Permanentmagneten bzw. grundsätzlich in magnetisiertem Material sind die Elektronenspins parallel ausgerichtet. Dies ist äquivalent zu vielen Kreisströmen mit untereinander parallel ausgerichteten zugehörigen magnetischen Momenten. Das äußere Magnetfeld kommt dann durch die Überlagerung der Beiträge aller elementaren magnetischen Momente zu Stande.*

Eine klare Trennung von Elektrizität und Magnetismus und gleichzeitig die vereinheitlichte Beschreibung von Elektrizität und Magnetismus in der Physik wurde erstmalig durch die Maxwellgleichungen geleistet. Hier werden die Kräfte von Elektrizität und Magnetismus durch Felder, nämlich magnetische Felder und elektrische Felder, erklärt.

Heute spricht man von der Theorie des Elektromagnetismus. Die Theorie zeitlich veränderlicher Felder der Elektrizität und des Magnetismus wird als Elektrodynamik bezeichnet. In der Elektrodynamik werden also Magnetismus und Elektrizität vollständig behandelt.

Durch sogenannte "Materialparameter" wie die magnetische Permeabilität μ, wird die Wirkung magnetischer Felder auf Materie beschrieben. Dies kann ebenfalls über die Maxwellgleichungen berechnet werden. Dazu muss man noch Effekte wie Magnetisierung und elektrische Polarisation in die Gleichungen einbauen. Heute sind vor allem eine zunehmende Genauigkeit bei der Bestimmung der Materialparameter und die Behandlung von Quantenobjekten in der Quantenelektrodynamik zur klassischen Elektrodynamik hinzugekommen und aktuelle Forschungsgebiete.

2007 wurde die Entdeckung des sogenannten Riesenmagnetwiderstandes durch den Physiker Grünberg mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Maximale Einsatztemperatur

Permanentmagnete dürfen nicht jeder beliebigen Temperatur ausgesetzt werden. Bei hohen Temperaturen verschwindet das Magnetfeld. Dies liegt daran, dass die Elementarmagnete, welche durch eine Magnetisierung parallel ausgerichtet wurden, bei hohen Temperaturen aufgrund der Wärmeenergie wieder neu durchmischt werden und nicht parallel ausgerichtet bleiben. Jeder Magnet hat deshalb eine maximale Einsatztemperatur. Diese wird vom Hersteller angegeben (z.B. als Buchstabe in der Güte des Magneten).

Ausführliche Erklärung

Ferromagnetische Materialien werden in einem äußeren Magnetfeld magnetisiert. Wird das äußere Feld abgeschaltet, so verbleibt eine Remanenz. Das Material bleibt also magnetisch und kann selbst als Magnet eingesetzt werden. Die Remanenz geht jedoch bei hohen Temperaturen zurück. Die Magnetisierung verschwindet. Jeder Magnet hat eine maximale Einsatztemperatur, die zur Vermeidung von Entmagnetisierung festgelegt wird. Oberhalbdieser Temperatur, die vom Material des Magneten abhängt, kann es zu einer Entmagnetisierung kommen. Das Material muss dann abkühlen und neu magnetisiert werden.

Um diesen Effekt zu verstehen, muss man den physikalischen Hintergrund der Remanenz betrachten. Remanenz kann leicht verstanden werden, wenn man die Magnetisierung auf einer mikroskopischen Ebene der einzelnen Atome betrachtet.

In ferromagnetischen Materialien gibt es an jedem Atom ein magnetisches Moment, welches durch den Elektronenspin eines ungepaarten Elektrons verursacht wird. Dieses magnetische Moment wirkt selbst wie ein kleiner Magnet mit einem Nord- und einem Südpol. Durch ein äußeres Magnetfeld wirkt nun auf die magnetischen Momente aller Elektronenspins eine Kraft, welche die Spins dreht und parallel zum äußeren Magnetfeld ausrichtet. Sind die magnetischen Momente erst einmal ausgerichtet, so kommt es in ferromagnetischen Materialien zu einer Stabilisierung dieser Ausrichtung durch die Austauschwechselwirkung zwischen den Elektronenspins.

Die Austauschwechselwirkung führt dazu, dass es energetisch günstiger ist, wenn alle Elektronenspins parallel stehen. Allerdings hat diese Wechselwirkung nur eine begrenzte Stärke. Die Elektronen selbst sind beweglich und durch äußeren Einfluss kann die Ausrichtung der Elektronenspins verändert werden.

Wie also alle Elektronenspins du ch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet wurden, ist es denkbar, die Elektronenspins wieder zu durchmischen, wenn man das System so stark stört, dass die Austauschwechselwirkung zwischen den Elektronenspins überwunden wird.

Dies kann durch ein äußeres Magnetfeld geschehen, welches dem Magnetfeld der Elektronenspins entgegengerichtet ist.

Durch harte mechanische Stöße kann das Material ebenfalls entmagnetisiert werden, weil die Ausrichtung der Elektronenspins dann mechanisch gestört wird.

Eine dritte Möglichkeit, die Remanenz aufzuheben, besteht darin, das magnetisierte Material zu erwärmen. Die Temperatur eines Festkörpers wird durch die Bewegungsenergie der einzelnen Atome bestimmt. Durch Erwärmen eines Ferromagneten nimmt auch die Bewegung der Elektronenspins zu. Mit steigender Bewegungsenergie (thermischer Energie) wiederum nimmt die Wahrscheinlichkeit dafür zu, dass sich ein Elektronenspin trotz der Austauschwechselwirkung aus seiner parallelen Ausrichtung verdreht. Ist die thermische Energie größer als die Austauschwechselwirkung, so kommt es zu einer raschen Unordnung der ursprünglich ausgerichteten Elektronenspins. Die Temperatur, bei der ein Ferromagnet in einen Paramagneten übergeht, ist die sogenannte Curie-Temperatur. Oberhalb der Curie-Temperatur wird ein magnetisiertes Material vollständig entmagnetisiert. Die Remanenz sinkt also auf Null. Da die Austauschwechselwirkung für jedes Material charakteristisch ist, haben verschiedene Materialien auch verschiedene Curie-Temperaturen. Sie liegt bei 769 °C für Eisen, 1127 °C für Kobalt und 358 °C für Nickel.

Die maximale Einsatztemperatur kann also die Curie-Temperatur des Materials grundsätzlich nicht übersteigen. Um auch teilweise Entmagnetisierungen zu vermeiden, liegt die maximale Einsatztemperatur meist ein ganzes Stück unterhalb der Curie-Temperatur. Die Unordnung der Elektronenspins nimmt mit der Temperatur stetig zu.

Auch Materialverzerrungen oder generelle Materialinstabilitäten können bereits bei Temperaturen weit unter der Curie-Temperatur auftreten. Die maximale Einsatztemperatur wird deshalb so festgelegt, dass unterhalb der maximalen Einsatztemperatur keinesfalls eine Entmagnetisierung des Magneten durch Wärme auftritt. Der Hersteller charakterisiert die maximale Einsatztemperatur seiner Magnete durch einen Buchstaben in der Güte. Eine Güte von 50M beispielsweise charakterisiert einen Magneten mit einem Energieprodukt von 50 Mega Gauss Oersted und einer maximalen Einsatztemperatur von 100°C (M). Weitere Kürzel sind "N" für 80°C, "H" für 120°C, "SH" für 150°C, "UH" für 180°C und "EH" für 200°C.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Maxwellgleichungen

Die Maxwellgleichungen sind die grundlegendsten Gleichungen der Elektrodynamik. Dies ist die physikalische Theorie zur Beschreibung aller Erscheinungen des Elektromagnetismus. Formuliert hat die Maxwellgleichungen der Physiker James Clerk Maxwell im Jahre 1864. Alle elektrischen und magnetischen Effekte können mit Hilfe der Maxwellgleichungen berechnet werden, beispielsweise die Größe der elektrischen und magnetischen Kräfte bei gegebenen Ladungs - oder Stromverteilungen.

Ausführliche Erklärung

Die Theorie des Magnetismus entbehrte lange Zeit einer exakten mathematischen Beschreibung. Eine vollständige Erklärung der Erscheinungen im physikalischen Sinn erfolgte erst 1864 durch James Clerk Maxwell. Die von ihm gefundenen vier Maxwellgleichungen bilden bis heute die Grundlage der Elektrodynamik. Im Wesentlichen wird durch die Maxwellgleichungen beschrieben, wie groß die elektrischen und magnetischen Felder und damit auch die entsprechenden Kräfte sind, wenn bestimmte Ladungs - oder Stromverteilungen vorliegen. Dabei erkannte Maxwell, dass elektrische und magnetische Phänomene nicht unabhängig voneinander sind. So gehen von einem bewegten elektrischen Feld auch magnetische Felder aus.

In einer elektromagnetischen Welle beeinflussen sich zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder wechselseitig. Die Erweiterung der Vakuum Maxwellgleichungen zu den Maxwellgleichungen in Materie berücksichtigt weiter noch Phänomene der elektrischen Polarisation und der Magnetisierung und kann somit auch die Ausbreitung elektrischer und magnetischer Felder in Materie beschreiben.

In den Maxwellgleichungen wird ein mathematischer Differentialoperator verwendet, der auch als "Ableitungsvektor" bezeichnet wird. Er hat als Symbol ein Dreieck, welches auf einer Spitze steht:

$$\vec{\nabla} = (\partial/\partial x \quad \partial/\partial y \quad \partial/\partial z)$$

wobei $\partial/\partial x$ die partielle Differentiation nach der Variablen x bezeichnet. Dadurch wird der Anteil der "von einem Punkt ausgehenden Feldlinien", z.B. des elektrischen Feldes $\vec{E}$ mit Hilfe der sogenannten Divergenz eines Feldes ($\nabla \cdot \vec{E}$) beschrieben. Andererseits sind geschlossene Schleifen aus Feldlinien möglich, sogenannte Wirbel. Diese werden mit Hilfe der Rotation ($\nabla \times \vec{E}$) charakterisiert.

Die zeitunabhängigen Maxwellgleichungen beschreiben den Verlauf der elektrischen Felder ($\vec{E}$) und der magnetischen Flussdichte ($\vec{B}$) bei gegebenen statischen Ladungen ρ und Strömen $\vec{j}$ im Vakuum bzw. näherungsweise im Luftraum:

1) $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

2) $\nabla \times \vec{E} = 0$

3) $\nabla \cdot \vec{B} = 0$

4) $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j}$

ε_0 bezeichnet die Dielektrizitätskonstante des Vakuums und μ_0 die magnetische Permeabilität des Vakuums.

Konkret kann man sich die Aussagen dieser Gleichungen wie folgt denken:

1) Von Ladungen gehen Feldlinien aus. Ladungen sind somit die Quellen (positive Ladungen) bzw. Senken (neg. Ladungen) des elektrischen Feldes. Diese Feldquellen werden durch die Divergenz charakterisiert. Die Stärke des elektrischen Feldes, welches von einer Ladung verursacht wird, ist der Ladung proportional.

2) Das elektrische Feld hat jedoch im Ruhezustand keine Wirbel. Die Wirbel werden über die oben bezeichnete Rotation berechnet.

3) Die magnetische Flussdichte dagegen hat keine Quellen. Es gibt keine "magnetischen Monopole", also kein physikalisches Objekt, von dem einfach nur magnetische Feldlinien ausgehen würden. **4)** Stattdessen verursachen Ströme Wirbel der magnetischen Flussdichte und damit auch das Magnetfeld. Dabei ist die Stärke des Magnetfeldes dem eingeschlossenen Strom proportional.

Die zeitabhängigen Maxwellgleichungen berücksichtigen neben den genannten Phänomenen noch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder. Die zeitliche Änderung eines Feldes wird durch einen Punkt charakterisiert. Dieser symbolisiert die Ableitung nach der Zeit.

Beim elektrischen Feld bezeichnet also $\dot{\vec{E}} = \frac{d}{dt}\vec{E}$ die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes. Damit lauten die zeitabhängigen Maxwellgleichungen im Vakuum:

1) $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

2) $\nabla \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} = 0$

3) $\nabla \cdot \vec{B} = 0$

4) $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \frac{1}{c^2}\dot{\vec{E}}$

Nach Gleichung **2)** verursacht also eine zeitlich veränderliche magnetische Flussdichte zusätzliche Wirbel im elektrischen Feld. Ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld (Gleichung **4)** bedingt wiederum zusätzliche Wirbel im magnetischen Feld. Mit Hilfe der Gleichungen **2)** und **4)** kann beispielsweise das Verhalten elektromagnetischer Wellen bestimmt werden. Die Größe ***c*** ist die Lichtgeschwindigkeit, die mit den Konstanten ε_0 und μ_0 folgendermaßen verknüpft ist:

$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$.

Die Einführung materialspezifischer Parameter ist zu einer Beschreibung der Ausbreitung elektrischer und magnetischer Felder in Materie notwendig. In Materie kommt es durch elektrische Felder zur elektrischen Polarisation und durch magnetische Felder zur Magnetisierung. Die zeitabhängigen Maxwellgleichungen in Materie berücksichtigen dies folgendermaßen:

1) $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} - \nabla \cdot \frac{\vec{P}}{\epsilon_0}$

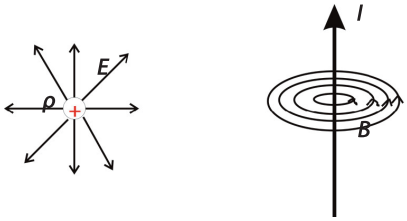
2) $\nabla \times \vec{E} + \dot{\vec{B}} = 0$

3) $\nabla \cdot \vec{B} = 0$

4) $\nabla \times \vec{B} = \frac{1}{c^2}\dot{\vec{E}} + \mu_0 \dot{\vec{P}} + \mu_0 \nabla \times \vec{M} + \mu_0 \cdot \vec{j}$

Quellen des elektrischen Feldes sind nach Gleichung **1)** also nicht nur echte Ladungen ρ sondern auch die Polarisation $\vec{P}$. Die Polarisation ist dabei von der materialspezifischen Dielektrizität (Polarisierbarkeit) abhängig.

Die Wirbel der magnetischen Flussdichte werden nach Gleichung **4)** durch Ströme $\vec{j}$, zeitlich veränderliche elektrische Felder (inklusive Polarisationen) und durch Magnetisierungen $\vec{M}$ verursacht. Da die Magnetisierung von der materialspezifischen magnetischen Permeabilitätskonstanten abhängt, steckt über $\vec{M}$ Information in der 4. Maxwellgleichung, die aussagt, wie sich das Material in äußeren Feldern magnetisieren lässt und die magnetische Flussdichte beeinflusst.



*Die Abbildungen zeigen den Unterschied zwischen einem Divergenzfeld, welches wie das elektrische Feld von einer Ladungsdichte **ρ** ausgeht (linke Seite) und einem Rotationsfeld, welches wie das magnetische Feld einen stromdurchflossenen Draht mit einem Strom **I** umschliesst (rechte Seite).*

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Monopol / Dipol / Multipol

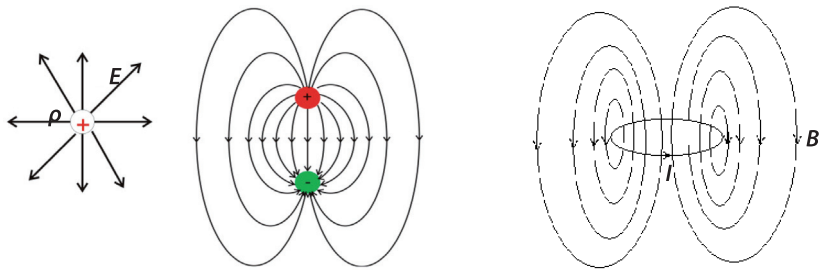
Eine einzelne Ladung wird als Monopol bezeichnet (von monos (griech.) = allein, einzeln). Von ihr geht ein elektrisches Monopolfeld aus. Das Magnetfeld einer Leiterschleife oder das elektrische Feld von 2 entgegengesetzt geladenen Teilchen ist dagegen ein Dipolfeld (von di (gr.) = zwei). Zwei entgegengesetzte Ladungen mit festem Abstand entsprechen dem Dipol. Es gibt keine magnetischen Monopole und demnach nur Magnete mit einem Nord- und einem Südpol. Bei komplizierteren Ladungsverteilungen spricht man von Multipolen.

Ausführliche Erklärung

Monopol, Dipol, Quadrupol und, allgemein gesprochen, höhere Multipole, sind Bezeichnungen für entsprechend strukturierte Anteile elektrischer oder magnetischer Felder. Mit den zugehörigen Momenten, also Monopolmoment, Dipolmoment und Quadrupolmoment, werden mathematisch unterscheidbarer Anteile von beliebig strukturierten elektrischen oder magnetischen Feldern charakterisiert. Dabei ist das elektrische Feld einer Punktladung ein reines Monopolfeld. Dieses Feld besteht nur aus einem Monopolmoment.

Bei magnetischen Feldern gibt es grundsätzlich keinen Monopol. Dies wird durch die Gesetze des Elektromagnetismus, die Maxwellgleichungen, ausgedrückt. Man sagt, dass das niedrigste nichtverschwindende Multipolmoment des magnetischen Feldes das Dipolmoment ist.

Da es keine magnetischen Monopole gibt, kann auch kein Permanentmagnet mit nur einem einzigen Pol hergestellt werden. Jeder Magnet hat mindestens 2 Pole, einen Nord- und einen Südpol.



Die Abbildung zeigt einen elektrischen Monopol. Er ist gemäß der Maxwellgleichungen die Quelle des elektrischen Feldes. Die Feldlinien verlaufen von der Ladung weg (bei neg. Ladungen auf diese zu) wie die Stacheln eines Igels. In der Mitte ist ein elektrischer Dipol gezeigt. Rechts ist das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Leiterschleife zu sehen. Auch ein einzelner Elektronenspin, also ein sogenannter Elementarmagnet, hat diese Form des Magnetfeldes. Aus den Maxwellgleichungen folgt, dass diese Form des Magnetfeldes die einfachstmögliche Form ist. Sie gleicht von außen dem Feld des elektrischen Dipols. Deshalb spricht man auch davon, dass das Magnetfeld ein Dipolfeld ist. Komplizierte Stromverteilungen haben auch Feldanteile höherer Ordnung. Es gibt jedoch keinen magnetischen Monopol.

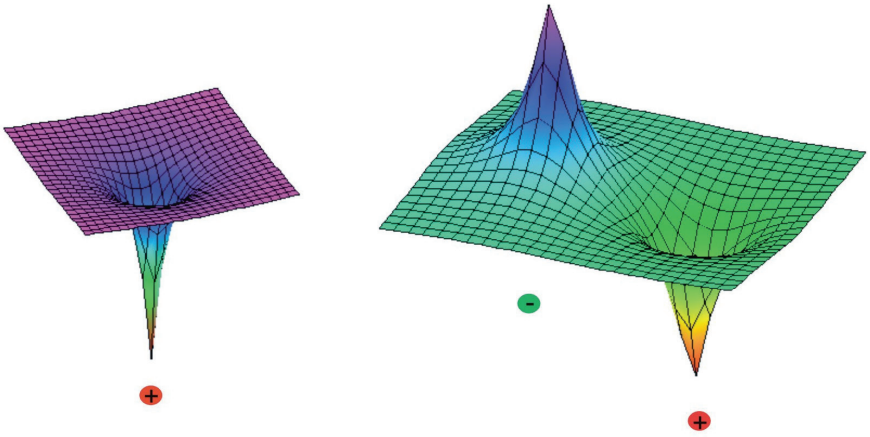
Mathematisch wird die Berechnung der verschiedenen Multipolmomente einer beliebigen Feldverteilung mit Hilfe des Verfahrens der sogenannten Multipolentwicklung gelöst. Dabei wird eine sogenannte Reihenentwicklung der Abstandsabhängigkeit für das magnetische Feld vorgenommen.

In der Elektrodynamik entstehen durch die Bewegungen der elektrischen und magnetischen Felder neue Phänomene wie elektromagnetische Wellen. Auch hierfür ist eine Multipolentwicklung möglich. Man erhält dann die Multipolmomente der Strahlungsfelder. Die niedrigste nichtverschwindende Multipolstrahlung ist die Dipolstrahlung.

Beispielhaft soll das mathematische Verfahren der Multipolentwicklung magnetischer Felder einer beliebigen Stromverteilung dargestellt werden. Das Verfahren ist sehr aufwändig und wird hier nur gezeigt, um eine typische Anwendung der höheren Mathematik in der Physik zu demonstrieren.

Die Multipolentwicklung wird meist nicht direkt an der Formel für das magnetische Feld oder die magnetische Flussdichte durchgeführt sondern am magnetischen Vektorpotenzial $\vec{A}(\vec{r})$, welches vom Ort $\vec{r}$ abhängt:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{R^3} d^3r' \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$$



Die Abbildung zeigt die Amplitude elektrischer Felder in der Ebene der Ladungen. Die gezeigten Flächen sind dabei dreidimensionale Darstellungen der Stärke des elektrischen Feldes in dieser Ebene und unterschiedlich von den direkten Darstellungen der Felder über Feldlinien wie in der letzten Abbildung gezeigt.

Bei einer Darstellung der Feldlinien wird auch die Richtung der magnetischen Kräfte angezeigt. Hier dagegen sieht man links einen Graph für die Stärke eines elektrischen Monopolfeldes, das über die Farbdarstellung des 3D - Plots dargestellt wird. Das elektrische Feld ist am Ort der Ladung besonders groß und klingt dann mit dem Quadrat des Abstandes ab. Rechts ist ein elektrisches Dipolfeld zu sehen. Das Dipolfeld wird von zwei entgegengesetzten Ladungen erzeugt. Magnetische Felder sind immer Dipolfelder oder Felder höherer Ordnung, da es keine einzelnen magnetischen Ladungen gibt.

mit der sogenannten Coulomb - Eichung $\vec{\nabla} \cdot \vec{A}(\vec{r}) = 0$

Dabei bezeichnet $\vec{j}(\vec{r}')$ die Stromverteilung am Ort der sogenannten "gestrichenen" Variablen $\vec{r}', \mu_0$ bezeichnet die magnetische Permeabilität des Vakuums.

$|\vec{r} - \vec{r}'|$ bezeichnet den momentanen Abstand zwischen dem Punkt, an welchem das Magnetfeld bestimmt wird ($\vec{r}$) und dem Ort der Ladungsverteilung ($\vec{r}'$).

Nun wird eine Taylorentwicklung der Funktion $\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$ um den Ursprung der gestrichenen Koordinaten (welche die Stromverteilung charakterisieren) durchgeführt:

$$\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r^3} \cdot (\vec{r} \cdot \vec{r}') + \dots$$

Dabei sind nur die ersten beiden Ordnungen der Entwicklung gezeigt. Die höheren Ordnungen sind durch ... abgekürzt.

Somit folgt:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi \cdot r} \int_{R^3} d^3r' \vec{j}(\vec{r}') + \frac{\mu_0}{4\pi \cdot r^3} \int_{R^3} d^3r' \vec{j}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} \cdot \vec{r}') + \dots$$

Mit dem Monopolmoment $\frac{\mu_0}{4\pi \cdot r} \int_{R^3} d^3r' \vec{j}(\vec{r}')$

und dem Dipolmoment $\frac{\mu_0}{4\pi \cdot r^3} \int_{R^3} d^3r' \vec{j}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} \cdot \vec{r}')$.

Die komplizierteren höheren Momente werden an dieser Stelle nicht mehr gezeigt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz - Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Nord- und Südpol

Nord- und Südpol sind die beiden verschiedenen Pole eines Permanentmagneten. Dabei geht das magnetische Feld vom Nordpol aus und verläuft, wie über Feldlinien dargestellt werden kann, zum Südpol. Im Inneren des Magneten schließen sich die Feldlinien dann wieder. Gleichnamige Pole stoßen sich ab (also Nord- gegen Nordpol bzw. Süd- gegen Südpol). Entgegengesetzte Pole ziehen sich dagegen gegenseitig an. Die magnetische Kraft auf ein ferromagnetisches Material (z.B. Eisen) ist am Nordpol wie auch am Südpol anziehend.

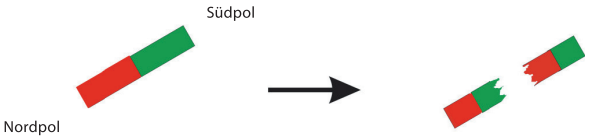
Ausführliche Erklärung

Jeder Magnet hat zwei Pole. Dies ist eine grundlegende Eigenschaft, welche elektrische Felder und Magnetfelder unterscheidet.

Ein Magnetfeld entsteht, wenn ein Strom fließt. Also immer dann, wenn sich elektrische Ladungen bewegen. In diesem Fall entsteht jedoch immer ein Feld mit zwei Polen, einem Nordpol und einem Südpol. Man spricht deshalb auch von einem Dipolfeld. Es gleicht dem elektrischen Feld von zwei entgegengesetzten Ladungen, dem elektrischen Dipol.

Auch in einem Permanentmagneten, also in einem magnetisierten Material, existieren elementare Elektronenspins mit einem magnetischen Moment, die als Elementarmagnete verstanden werden können. Das makroskopische Magnetfeld des Permanentmagneten ergibt sich als Summe der Beiträger aller Elementarmagnete. Die Elektronenspins haben dabei die gleiche Wirkung wie atomare Kreisströme und besitzen jeweils einen magnetischen Nord und Südpol.

Während eine elektrische Ladung, beispielsweise ein negativ geladenes Elektron, ein elektrisches Feld verursacht, gibt es keine einzelne "magnetische Ladung". Es ist nicht möglich, nur einen einzelnen magnetischen Pol herzustellen.
Man sagt, dass das elektrische Feld Quellen besitzt (nämlich die elektrische Ladung) und das magnetische Feld dagegen quellenfrei ist. Es entsteht als Dipolfeld (mit Nord- und Südpol), wenn sich elektrische Ladungen bewegen. Ein echter Beweis für die Quellenfreiheit des Magnetfeldes existiert nicht, aber bis heute hat auch niemand eine "magnetische Ladung" beobachtet.



Jeder Magnet hat einen Nord- und einen Südpol. Wenn man einen Permanentmagneten zerbricht, so hat man zwei kleinere Magnete, die ebenfalls jeweils einen Nord- und einen Südpol besitzen. Dies kann man angesichts der Tatsache verstehen, dass ein Magnetfeld durch ausgerichtete Elektronenspins im Material zu Stande kommt. Diese besitzen wie winzige Kreisströme im Material ein magnetisches Moment und bedingen an jedem Punkt einen Nord- und einen Südpol, deren Kräfte sich zu dem makroskopischen Magnetfeld überlagern.

Mit Hilfe der Maxwellgleichungen kann jedoch mathematisch bewiesen werden, dass es keine einzelnen magnetischen Pole gibt. Man muss dazu jedoch die Maxwellgleichungen akzeptieren, da deren Gültigkeit selbst nicht bewiesen werden kann.

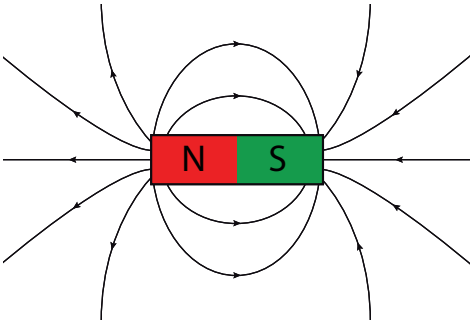
Nähert man den Nordpol eines Stabmagneten an den Nordpol eines anderen Magneten an, so stoßen sich beide Magnete ab. Nähert man dagegen den Südpol eines Stabmagneten an den Nordpol eines anderen Magneten an, so wirkt die Kraft zwischen den Magneten anziehend.

Zum Test dieser Behauptung braucht man nur einen Magneten an einem Ende in die Hand zu nehmen und man wird feststellen, dass das freie Ende immer von einer Seite eines anderen Magneten angezogen wird, von der anderen Seite dieses Magneten jedoch abgestoßen wird.

Zwischen gleichnamigen Polen verschiedener Magnete (also zwischen Nordpol und Nordpol oder zwischen Südpol und Südpol) wirken also immer abstoßende Kräfte. Zwischen ungleichnamigen Polen verschiedener Magnete (also zwischen Nordpol und Südpol) wirken dagegen anziehende Kräfte.

Das Magnetfeld gibt eine Vorstellung davon, welche Kraftwirkung von einem Magneten ausgeht. In der Physik wird die Stärke eines Magnetfeldes meist über die magnetische Flussdichte ***B*** angegeben und wird in der Einheit Tesla oder Gauss gemessen.

Mit Hilfe von Feldlinien kann man ein Magnetfeld visualisieren. Dabei verlaufen die Feldlinien magnetischer Felder immer in geschlossenen Schleifen. Die Feldlinien von Magnetfeldern haben also keinen Anfang und kein Ende. Der Grund dafür, dass die Feldlinien geschlossene Schleifen bilden, liegt dabei gerade darin begründet, dass das Magnetfeld quellenfrei ist, also immer einen Nord- und einen Südpol besitzt.



Startet man am Nordpol eines Magneten, so laufen die Feldlinien senkrecht von der Oberfläche des Nordpols des Magneten weg und krümmen sich zum Südpol bis sie senkrecht auf der Oberfläche des magnetischen Südpols ankommen. Im magnetischen Material selbst laufen die Feldlinien jedoch wieder zum Ausgangspunkt am Nordpol zurück und bilden somit eine geschlossene Schleife.

Die Kraftwirkung des Magneten auf einen magnetischen Probekörper, also z.B. eine Kompassnadel ist proportional zur Dichte der Feldlinien. Die Ausrichtung der Kompassnadel erfolgt tangential zu den Feldlinien.

Experimentell kann man sich eine Vorstellung von der Existenz des Magnetfeldes um den Magneten herum verschaffen, indem Eisenfeilspäne auf ein Blatt Papier gestreut werden, unter dem sich ein Magnet befindet. Die Eisenspäne ordnen sich dann in geschwungenen Strukturen an, welche als Abbild der Feldlinien verstanden werden können.

Nord- und Südpol eines Magneten sind per Definition festgelegt. Die Feldlinien laufen per Definition vom Nord- zum Südpol. Das bedeutet, dass es kein physikalisches Prinzip gibt, das festlegt, welcher Pol eines Magneten der Nordpol und welcher der Südpol ist.

Auch die Erde besitzt ein Magnetfeld. Dieses wird von unterirdischen Strömen des flüssigen Erdinneren verursacht. Der Nordpol der Erde ist jedoch definiert als Durchstoßpunkt der gedachten Drehachse der Erde durch die Erdoberfläche in Richtung des Polarsterns. Dieser Punkt wird deshalb auch genauer als "geographischer Nordpol" bezeichnet. Ein magnetischer Pol der Erde befindet sich zwar in der Nähe des geographischen Nordpols, dies ist jedoch gerade der magnetische Südpol der Erdkugel. So zeigt der Nordpol der Kompassnadel nach Norden, weil sich dort der magnetische Südpol der Erde befindet, welcher in der Nähe des geographischen Nordpols liegt.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Oersted

Die Einheit zur Messung des Magnetfeldes ist das Oersted (Oe) und benannt nach Hans Christian Oersted, der 1820 die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms erkannte. Die bekanntere Einheit Tesla wird nicht zur Messung von Magnetfeldern (H) verwendet sondern zur Messung der magnetischen Flussdichte (B). Ein Magnetfeld von 1 Oe ist sehr schwach. Einer magnetischen Flussdichte von 1 Tesla entspricht im Vakuum ein Magnetfeld von 10'000 Oersted.

Ausführliche Erklärung

Das Oersted (Oe) ist ein Maß für die magnetische Feldstärke. Die Einheit Oersted ist benannt nach dem dänischen Physiker und Chemiker Hans Christian Oersted. Hans Christian Oersted entdeckte 1820 die magnetische Wirkung des elektrischen Stroms und trug somit zur Erforschung des Magnetismus wesentlich bei. Er war nicht der erste Physiker, der einen Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität erkannte. Allerdings gerieten frühere Entdeckungen immer wieder in Vergessenheit. Viele Physiker verwechselten auch einfach elektrische und magnetische Kräfte. Erst Hans Christian Oersted erkannte die Bedeutung seiner Entdeckung für moderne elektrotechnische Anwendungen.

Der Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus wurde 1864 durch Maxwell mit Hilfe der Maxwellgleichungen vollständig beschrieben. Mit den Formulierungen von Maxwell erhielt die klassische Elektrodynamik ihre heute noch anerkannte Formulierung.

Die Einheit Oersted für die magnetische Feldstärke ist im sogenannten cgs-System definiert. Im cgs-System wird eine Größe aus den physikalischen Basiseinheiten Zentimeter (cm), Gramm (g) und Sekunde (s) gebildet. Daneben gibt es noch die Basiseinheiten für Strom (Ampere), Temperatur (Kelvin), Stoffmenge (mol) und Lichtstärke (candela).

Heute ist allgemein das internationale Einheitensystem oder auch SI-System anerkannt. Demnach werden statt Gramm das Kilogramm (kg) und statt Zentimeter der Meter (m) verwendet. Im SI-System wird die magnetische Feldstärke in Ampere/Meter (A/m) gemessen.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Fällen gibt es keine glatte Umrechnung für das Oersted im SI-System. Das Oersted wird so definiert, dass ein Magnetfeld von 1 Oe im Vakuum einer magnetischen Flussdichte von 0,1 Millitesla (mT) entspricht.

Das Tesla ist im Gegensatz zum Oersted jedoch eine SI-Einheit und der Zusammenhang zwischen Magnetfeld H und magnetischer Flussdichte B wird durch die Permeabilitätskonstante des Vakuums (μ_0) bestimmt:

$B = \mu_0 H$.

Die Permeabilitätskonstante μ_0 hat im SI-System den Wert $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$. Dadurch kommt der nicht glatte Zusammenhang 1 Oersted = 79.577 A/m = $\frac{1000}{4\pi} A/m$ zu Stande.

Oftmals findet man in der Literatur auch die Einheit Tesla als Maß für die Magnetfeldstärke. Dies ist jedoch nicht ganz richtig. Wie erwähnt, sind Tesla bzw. Gauss die Einheiten der magnetischen Flussdichte. Das Magnetfeld wird in der Einheit Oersted (1 Oe = 79.577 A/m) angegeben, also in Ampere pro Meter (A/m).

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Pauli-Prinzip

Das Pauli-Prinzip ist benannt nach dem Physiker Wolfgang Ernst Pauli. Das Pauli-Prinzip ist ein sehr grundlegendes Prinzip der Physik, welches sagt, dass sich Elektronen mit völlig gleichen Eigenschaften nicht am gleichen Ort aufhalten können. Dies ist nicht selbstverständlich. So können sich beispielsweise identische Heliumatome am gleichen Ort aufhalten. Mit Hilfe des Pauli-Prinzips war erstmals der Aufbau der Elektronenhülle von Atomen verständlich.

Ausführliche Erklärung

In seiner einfachsten Formulierung sagt das Pauli-Prinzip, dass in einem Atom keine zwei Elektronen exakt den gleichen Zustand einnehmen dürfen. Unter dem Zustand eines Elektrons versteht man dabei den physikalisch messbaren Zustand, den ein Elektron hinsichtlich Energie, Drehimpuls, Orientierung des Drehimpulses und Orientierung des Elektronenspins einnimmt. All diese physikalischen Größen werden für Quantenteilchen, also auch für Elektronen, mit sogenannten Quantenzahlen abgekürzt. Dabei steht n für die Energie, l für den Drehimpuls, m für die Orientierung des Drehimpulses, s für den Spin und sm für die Ausrichtung des Elektronenspins. Ein Satz von Quantenzahlen besteht also aus dem Set (n, l, m, s, sm).

Das Pauli-Prinzip sagt, dass zwei Elektronen in einem Wasserstoffatom nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen. Allgemeiner dürfen nach dem Pauli-Prinzip sämtliche sogenannte "Fermionen", zu denen auch die Elektronen zählen, nicht in all ihren Eigenschaften übereinstimmen.

Entdeckt wurde das Pauli-Prinzip von dem Physiker Wolfgang Ernst Pauli, der für diese von ihm selbst als "Ausschließungsprinzip" bezeichnete Entdeckung 1945 den Nobelpreis bekam.

Das Pauli-Prinzip hat viele Konsequenzen. Es wird beispielsweise zur Erklärung der Elektronenkonfigurationen von verschiedenen Elementen herangezogen. Selbst die Stabilität von Neutronensternen wird mit dem Pauli-Prinzip erklärt. Neutronensterne sind nämlich so schwer und kompakt, dass es außer der Abstoßung der Neutronen, die wegen des Pauli-Verbots nicht den gleichen Ort einnehmen dürfen, keine bekannte Kraft gibt, die dem Gravitationsdruck in einem Neutronenstern Stand halten könnte.

Ohne die enorme abstoßende Kraft der Neutronen in einem Neutronenstern, welche durch das Pauli-Verbot kommt, würde ein Neutronenstern unter seinem eigenen Gewicht zu einem Punkt kollabieren. Dies passiert auch ab einer gewissen Grenzmasse und es verbleibt ein schwarzes Loch. Das Pauli-Prinzip ist also im Rahmen herkömmlicher Kräfte gültig aber nicht grundsätzlich unüberwindbar.

Auch die Austauschwechselwirkung der Elektronen in einem Festkörper, welche für die Erscheinung des Ferromagnetismus verantwortlich ist, kann nur mit dem Pauli-Prinzip verstanden werden.

In der heutigen Formulierung lautet das Pauli-Prinzip: "Die Gesamtwellenfunktion eines Systems von N Fermionen ist total antisymmetrisch bezüglich der Vertauschung zweier Teilchen". Dies klingt zunächst sehr abstrakt, kann jedoch am Beispiel derAustauschwechselwirkung verständlich gemacht werden.

Elektronen sind sogenannte Fermionen. Alle Teilchen mit halbzahligem Spin sind Fermionen. Der Elektronenspin besitzt die Quantenzahl ½. Elementarteilchen können mathematisch ganz allgemein mit einer sogenannten Wellenfunktion beschrieben werden. Man kann die Elektronen auch mit einem Produkt aus Wellenfunktionen beschreiben, wobei dann jeder Faktor der Gesamtwellenfunktion für eine bestimmte Eigenschaft steht. So beschreibt die Ortswellenfunktion den Ort, die Spinwellenfunktion den Spin usw...

Die Elektronen können sich laut des Pauli-Prinzips nicht am gleichen Ort befinden, wenn sie sich in keiner weiteren Quantenzahl (wie beispielsweise der Richtung des Spins) unterscheiden. Dies folgt aus der Formulierung der "totalen Antisymmetrie bezüglich der Vertauschung zweier Teilchen". Genauer muss das Pauli-Prinzip so verstanden werden, dass die Wellenfunktionen von benachbarten Elektronen in einem Festkörper antisymmetrisch zueinander sein müssen. Das bedeutet, dass sich die Elektronen genau in einer oder in drei Eigenschaften unterscheiden müssen ("antisymmetrisch" sein müssen), wenn alle anderen Eigenschaften gleich, also "symmetrisch", sind. Die Elektronen dürfen sich auch nicht genau in zwei Eigenschaften unterscheiden. Das Produkt zweier antisymmetrischer Wellenfunktionen ist sonst wieder symmetrisch. Generell ist das Produkt einer geraden Anzahl

antisymmetrischer Wellenfunktionen immer symmetrisch und das Produkt einer ungeraden Anzahl antisymmetrischer Wellenfunktionen ist immer antisymmetrisch. Die symmetrischen Wellenfunktionen verändern die Gesamtwellenfunktion nicht.

Es muss also eine ungerade Anzahl von Funktionen antisymmetrisch sein, wenn alle anderen Funktionen, die die Eigenschaften der Teilchen beschreiben, symmetrisch sind. Bei den benachbarten Elektronen in einem Festkörper handelt es sich um Elektronen mit antisymmetrischer Orts-Wellenfunktion. Alle anderen Funktionen sind symmetrisch. Man kann sich dies so vorstellen, dass die Elektronen sich hinsichtlich ihres Ortes unterscheiden aber sonst in keiner weiteren Größe. In der Sprache der Symmetrie von Wellenfunktionen würde man sagen: Die Ortswellenfunktion der Elektronen ist antisymmetrisch, alle Wellenfunktionen außer der Spinwellenfunktion sind symmetrisch, also muss die letzte verbleibende Wellenfunktion, nämlich die Wellenfunktion der Spinausrichtung, ebenfalls symmetrisch sein, damit die Gesamtwellenfunktion antisymmetrisch ist, wie es das Pauli-Prinzip verlangt.

Die Elektronen dürfen sich also im Spin nicht unterscheiden.
Aus dem gleichen Grund also, warum die Elektronen innerhalb eines Atomes nicht am gleichen Ort auch die gleiche Spinausrichtung haben können, dürfen die Elektronen benachbarter Atome in einem ferromagnetischen Festkörper keine unterschiedliche Ausrichtung des Elektronenspins haben, da sie ansonsten bezüglich aller Eigenschaften symmetrisch wären.

Deshalb stabilisieren sich in einem Ferromagneten die Elektronenspins untereinander aufgrund des Pauli-Prinzips. Diese Wechselwirkung wird Austauschwechselwirkung genannt, wie die Formulierung des Pauliverbots von einer notwendigen Antisymmetrie bei der "Vertauschung" bzw. dem "Austausch" der Teilchen spricht.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Permanentmagnet / Dauermagnet

Permanentmagnete (Dauermagnete) sind Stoffe, die beständige magnetische Kräfte zeigen. Sie können ferromagnetische Stoffe (z.B. Eisen) anziehen oder stossen sich an gleichnamigen Polen (Nord - an Nordpol, Süd - an Südpol) gegenseitig ab. Eine Entmagnetisierung eines Permanentmagneten ist durch Hitze, starke mechanische Erschütterung oder starke äussere Magnetfelder möglich. Neben den Permanentmagneten gibt es noch Elektromagnete.

Ausführliche Erklärung

Der Nordpol eines Permanentmagneten zieht den Südpol eines anderen Permanentmagneten an und umgekehrt. Zwischen gleichnamigen Polen (Nord - an Nordpol, Süd - an Südpol) wirken dagegen abstoßende magnetische Kräfte. Ferromagnetische Stoffe (Eisen, Kobalt, Nickel und einige Legierungen) werden von Permanentmagneten grundsätzlich angezogen.

Permanentmagnete sind magnetische Stoffe, die im Gegensatz zum Elektromagneten keinen Strom für ihr Magnetfeld benötigen. Permanentmagnete bestehen immer aus ferromagnetischen Materialien, deren Elementarmagnete, die atomaren Spins, durch einen Prozess der Magnetisierung parallel ausgerichtet wurden.

Dies kann beim Erkalten von geschmolzenen ferromagnetischen Gesteinen geschehen. Derartige Steine wurden historisch von den alten Griechen nähe der Stadt Magnesia gefunden. Die Stadt Magnesia ist somit der historische Namensgeber für den Magnetismus.

Permanentmagnete lassen sich jedoch auch künstlich herstellen.

Dabei werden stark ferromagnetische Metalle, meist Legierungen, wie beispielsweise Samarium - Kobalt, durch starke äußere Magnetfelder magnetisiert. Dieser Prozess der Magnetisierung zeigt eine sogenannte Hysterese, also ein nicht symmetrisches Verhalten des Materials beim Vergrößern des äußeren Magnetfeldes und anschließender Erniedrigung des Magnetfeldes. Die Hysterese entsteht, weil die Ausrichtung der Elementarmagnete im Ferromagneten durch die Austauschwechselwirkung stabilisiert wird und deshalb ein bereits magnetisiertes Material andere Eigenschaften hat als ein noch nicht magnetisierter Ferromagnet.

Durch die Hysterese verbleibt im Ferromagneten auch ein Magnetfeld, wenn das äußere Magnetfeld abgeschalten wird. Das magnetisierte Material wird damit zu einem Permanentmagnet. Die verbleibende magnetische Flussdichte wird als Remanenz bezeichnet.

Ein Permanentmagnet bleibt so lange magnetisch, bis die Ausrichtung der atomaren Spins durch äußeres Einwirken (Hitze, starke Schläge, magnetische Felder) wieder gestört wird.

Während ein Elektromagnet einfach durch Abschalten des Stroms ausgeschaltet werden kann und durch Umkehrung der Stromrichtung umgepolt werden kann, ist es nicht ohne weiteres möglich, einen Permanentmagneten "auszuschalten". Daher auch die Bezeichnung "permanent". Die Anwendung von Hitze oder starken Schlägen führt nämlich zu einer Entmagnetisierung des Permanentmagneten. Die magnetischen Kräfte sind dann verschwunden und das Material müsste erneut magnetisiert werden. Im Extremfall kann sogar das Material beschädigt werden. Jeder Permanentmagnet besitz deshalb eine maximale Einsatztemperatur. Oberhalb dieser Temperatur können Schäden auftreten. Oberhalb der materialspezifischen Curie - Temperatur wird der Magnet in jedem Fall vollständig entmagnetisiert.

Die Stärke eines Permanentmagneten hängt vom verwendeten Material ab, aber auch von der Genauigkeit, mit der die Magnetisierung des Materials durchgeführt wird.

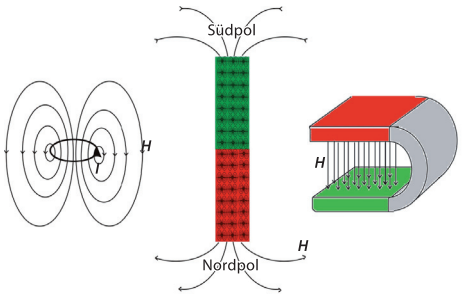
Die Magnetisierung führt nur dann zu einer großen Remanenz, wenn eine vollständige Ausrichtung aller atomaren Spins erreicht wird. Dies erfordert ein geeignetes Material und technisches Know - How.

Wie durch die Maxwell - Gleichungen beschrieben, gehen Magnetfelder immer von bewegten Ladungen aus. Es gibt nur Magnetfelder durch Ladungsbewegung, bei der immer ein Magnetfeld mit einem Nordpol und einem Südpol entsteht.

Die magnetischen Kräfte der Permanentmagnete werden durch mikroskopische Ladungsbewegung in der Materie erklärt. So bewegen sich die Elektronen in den Atomen mit einer großen Geschwindigkeit. Die Elektronen haben dabei einen charakteristischen Elektronenspin. Aus dem gesamten Bewegungszustand der Elektronen entsteht ein magnetisches Moment und damit eine magnetische Kraft.

Die magnetischen Kräfte wirken immer entlang des Magnetfeldes. Dieses kann durch Feldlinien dargestellt werden. Die Feldlinien geben dann auch die Richtung und die Größe der magnetischen Kräfte an.

Die magnetischen Kräfte eines Permanentmagneten hängen vor allem von der Größe der atomaren magnetischen Momente und von der Vollständigkeit der Ausrichtung sowie von der Größe der Austauschwechselwirkung ab. Diese Größen beeinflussen auch die gesamte magnetische Energie, die in einem Permanentmagneten gespeichert ist. Die magnetische Energie wird durch das Energieprodukt gemessen. Das Energieprodukt bestimmt die Güte eines Magneten. Die Güte ist um so größer, je größer das Energieprodukt und damit die magnetische Energie des Permanentmagneten ist.



Eine stromdurchflossene Leiterschleife (linke Abbildung) erzeugt ein Magnetfeld. Die Größe dieses Magnetfeldes wird durch das magnetische Moment bemessen. In einem ferromagnetischen Material (mitte) befinden sich zahlreiche magnetische Momente. Wenn diese alle parallel ausgerichtet sind, so entsteht ein Permanentmagnet. Der Permanentmagnet hat ein Magnetfeld, welches identisch ist zum Magnetfeld einer Spule. Im gezeigten Bild sind nur einige Feldlinien schematisch angedeutet.

Permanentmagnete können in verschiedensten Formen erzeugt werden. Auf der rechten Seite ist ein Hufeisenmagnet gezeigt. Beim Hufeisenmagnet stehen sich Nord- und Südpol gegenüber. Da die magnetischen Feldlinien als Ganzes immer geschlossen sind, verlaufen sie vom Nord- zum Südpol und dann im Material wieder zurück zum Nordpol. Im Luftraum des Hufeisenmagneten erhält man dadurch ein homogenes Magnetfeld mit parallel laufenden Feldlinien zwischen den Polen.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Permeabilität

Unter der magnetischen Permeabilität (lat. Permeare = Durchlassen) versteht man die Durchlässigkeit der Materie für die magnetische Flussdichte. Stoffe mit hoher Permeabilität werden selbst magnetisiert und verstärken somit die Flussdichte. Ihr magnetischer Widerstand ist sehr gering. Dazu gehören vor allem ferromagnetische Stoffe, wie Eisen. Die Permeabilität stellt den Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte und Magnetfeld her.

Ausführliche Erklärung

Unter Permeabilität (Lat. Permeare = Durchlassen) versteht man allgemein die Durchlässigkeit von Materie. Entsprechend bezeichnet die magnetische Permeabilität μ die Durchlässigkeit der Materie für den magnetischen Fluss.

Die Grösse eines Magnetfeldes H kann mit Hilfe der magnetischen Flussdichte B und der magnetischen Permeabilität μ ausgedrückt werden.

Allgemein gilt:

$$H = \frac{1}{\mu} B.$$

Dabei wird die magnetische Permabilität über eine Naturkonstante skaliert, die sogenannte magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$. Für jedes Material kann dann die magnetische Permeabilität über eine relative magnetische Permeabilität (auch Permeabilitätszahl genannt) μ_r und die magnetische Feldkonstante μ_0 definiert werden: $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$.

Für das Vakuum gilt per Definition $\mu_r = 1$ und demnach:

$$H_0 = \frac{1}{\mu_0} B_0.$$

Die Magnetische Flussdichte im Vakuum (B_0) ist durch die magnetische Feldkonstante μ_0 dividieren, um das entsprechende Magnetfeld im Vakuum (H_0) zu erhalten. Also entspricht im Vakuum einer magnetischen Flussdichte von B_0 = 1 Tesla (1 Vs / m²) ein Magnetfeld von

$$H_0 = \frac{10^7}{4\pi} A/m$$

Materie beeinflusst Magnetfelder nun derart, dass sich unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes in Materie eine magnetische Flussdichte ausbildet, welche von der magnetischen Permeabilität μ des Materials abhängt.Die magnetische Flussdichte in Materie ist dann besonders groß, wenn die magnetische Permeabilität μ besonders groß ist.

Die Permeabilität μ kann über den Zusammenhang $B = \mu_r \cdot B_0$ durch die Vakuum Flussdichte B_0 definiert werden. Dabei entspricht B der magnetischen Flussdichte, die sich durch den Einfluss der Materie einstellt.

Mit der Definition $B = \mu_r \cdot B_0$ folgt, dass Materie Magnetfelder verstärkt, wenn μ größer als 1 ist und Magnetfelder abschwächt, wenn μ kleiner als 1 ist.

Beide Fälle sind bekannt. Ferromagnetische Stoffe besitzen mikroskopische Elektronenspins, welche in einem äußeren Magnetfeld ausgerichtet werden. Dadurch kommt es im Außenraum zu einem zusätzlichen Magnetfeld, welches durch die ausgerichteten magnetischen Momente der Elektronenspins verursacht wird. Dieses Magnetfeld kann um viele Größenordnungen stärker sein als das äußere Magnetfeld, welches die Elektronenspins ausgerichtet hat.

Sind die Elektronenspins erst einmal ausgerichtet, so wird die Ausrichtung in Ferromagneten durch die sogenannte Austauschwechselwirkung stabilisiert. μ_r wird dadurch sehr gross und beträgt in speziellen ferromagnetischen Materialien (sogenannte amorphe Metalle) bis zu $\mu_r = 150'000$. Eisen hat etwa eine Permeabilität von $\mu_r = 10'000$.

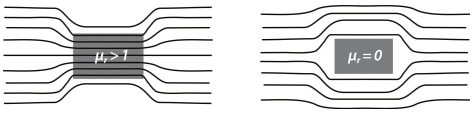
Diese ganzzahligen Werte in der Literatur sind strenggenommen immer Werte der relativen Permeabilität oder Permeabilitätszahl μ_r. In der Literatur findet man oft vereinfachend die Bezeichnung μ. Gemeint ist aber eigentlich μ_r.

Daneben gibt es Paramagnete, in welchen ebenfalls Elektronenspins vorhanden sind, die ausgerichtet werden können. Diese Ausrichtung wird in Paramagneten jedoch nicht stabilisiert. Demnach sind Paramagnete nur leichte Magnetfeldverstärker. μ_r liegt hier in der Grössenordnung 1.00001. Schliesslich gibt es noch die Diamagnete. Diese schwächen das äussere Magnetfeld ab, weil es im Inneren keine permanenten resultierenden Elektronenspins gibt, welche im äusseren Magnetfeld ausgerichtet werden könnten. Stattdessen wird beim Eindringen eines äusseren Magnetfeldes ein Strom induziert, welcher nach der Lenzschen Regel seiner Ursache entgegen gerichtet ist und somit das äussere Magnetfeld abschwächt. Diamagnetismus tritt in Materie grundsätzlich auf, allerdings wird der Diamagnetismus in Para- und Ferromagneten von den ausgerichteten Elementarmagneten überlagert.

Einen Sonderfall bilden noch die Supraleiter.

Supraleiter besitzen eine Permeabilitätszahl von Null. Damit verschwindet die magnetische Flussdichte im Supraleiter. Supraleiter besitzen also keine Durchlässigkeit für magnetischen Fluss. Die Feldlinien werden kompett aus dem Supraleiter verdrängt und laufen um diesen herum.

Supraleiter werden deshalb auch als perfekte Diamagnete bezeichnet.



Die Abbildung zeigt den Verlauf der Feldlinien durch ein Para- bzw. Ferromagnetisches Material ($\mu_r > 1$) (links) und um einen Supraleiter herum (rechts). Ein Supraleiter besitzt die Permeabilität $\mu_r = 0$. Es können überhaupt keine magnetischen Feldlinien in den Supraleiter eindringen. Vielmehr wird das Magnetfeld vom Supraleiter verdrängt.
Das ferromagnetische Material dagegen hat eine grössere Permeabilität für den magnetischen Fluss als das Vakuum bzw. der Luftraum. Die Feldlinien verdichten sich somit im Material.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Remanenz

Die Remanenz oder auch Remanenzflussdichte in einem ferromagnetischen Material (z.B. Eisen) äußert sich über messbare magnetische Kräfte, welche verbleiben, wenn das Material zeitweise einem Magnetfeld ausgesetzt war und magnetisiert wurde. Der Zahlenwert der Remanenz gibt an, wie stark die Magnetisierung ist. Die maximale Remanenz ist ein materialspezifischer Wert, der aus der Hysteresekurve bestimmt werden kann.

Ausführliche Erklärung

Unter Remanenz versteht man die Magnetisierung, welche nach Abschalten eines äußeren Magnetfeldes in einem ferromagnetischen Stoff verbleibt. Man spricht auch von Remanenzflussdichte.

Wird ein Körper einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, so kommt es zu einer Magnetisierung. Das Magnetfeld, welches durch die Magnetisierung selbst entsteht, ist in ferromagnetischen Stoffen besonders stark und dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet.

Bei Raumtemperatur sind nur die Elemente Eisen, Nickel und Kobalt ferromagnetisch. Daneben gibt es noch ferromagnetische Legierungen und Verbindungen sowie Elemente, die bei tiefen Temperaturen ferromagnetisch werden.

Ferromagnetische Stoffe wiederum zeigen eine starke Remanenz, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird.

Remanenz kann im alltäglichen Leben beobachtet werden, wenn ein eisenhaltiger Körper (z.B. eine Schere) einem starken Magnetfeld ausgesetzt wird. Man beobachtet dann, dass die Schere z.B. eisenhaltige Stecknadeln anziehen kann, obwohl der Magnet von der Schere bereits entfernt wurde.

Zur Erklärung der Remanenz kann man sich vorstellen, dass jeder Stoff aus Atomen mit Atomkernen und Elektronen besteht. Die Elektronen besitzen einen sogenannten "Spin", welcher magnetische Eigenschaften besitzt.

Die Physik der Remanenz hat etwas mit dem Elektronenspin zu tun. Die Elektronenspins verhalten sich wie winzige Elementarmagnete. Sie sind ohne ein äußeres Magnetfeld nicht gleichmäßig ausgerichtet und sind außerdem ständig in Bewegung. Diese Bewegung nimmt bei höheren Temperaturen zu. Stellt man sich die Elektronenspins als Stabmagnete vor, so zeigen die Pole dieser vielen winzigen Stabmagnete in verschiedene und zudem ständig wechselnde Richtungen. Der Körper ist deshalb als Ganzes nicht magnetisch.

Bei der Magnetisierung eines ferromagnetischen Körpers in einem äußeren Magnetfeld werden die Elementarmagnete alle parallel ausgerichtet. Der Nordpol aller mikroskopischen Magnete zeigt in die eine, der Südpol in die andere Richtung.

Ist die Temperatur nicht zu groß, so bleiben in einem Ferromagneten die Elektronenspins auch ausgerichtet, wenn das äußere Magnetfeld entfernt wird. Dies liegt an einer gegenseitigen Wechselwirkung der Elektronenspins, der sogenannten Austauschwechselwirkung, die in Ferromagneten besonders stark ist. Jeder Elementarmagnet wird in seiner Ausrichtung stabilisiert. Der Körper bleibt dann als Ganzes merklich magnetisch. Diese bleibende Magnetisierung ist die Remanenz.

In magnetisch harten Materialien verbleibt bei gleichem äußeren Magnetfeld eine größere Remanenz als in magnetisch weichen Materialien.

Remanenz verschwindet, wenn der magnetisierte Körper stark erhitzt wird oder stark erschüttert wird, weil dies die Ausrichtung der Elektronenspins wieder verän-

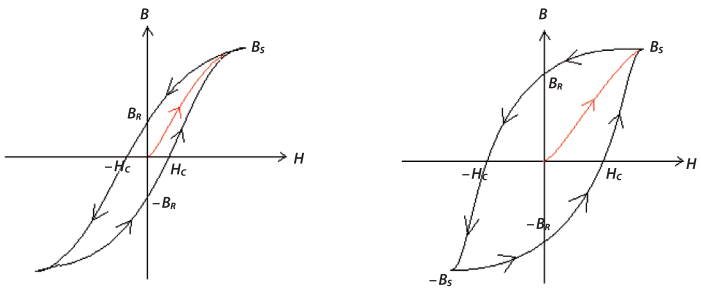


Abb. Hysteresekurve für ein magnetisch weiches Material (links) und ein magnetisch hartes Material (rechts). Für das noch unmagnetisierte Material zeigt die rote "Neukurve" den Verlauf der Magnetisierung über dem äußeren Feld an. Dabei gilt die jeweilige Kurve für den durch die Pfeile dargestellten Verlauf.

Typische Punkte der Hysteresekurve sind das Koerzitivfeld H_C, welches nötig ist, um die Remanenz des Materials durch das äußere Feld zu kompensieren, sowie die Remanenz B_R selbst, welche die verbleibende magnetische Flussdichte bei verschwindendem äußeren Magnetfeld bezeichnet. Schließlich gibt es noch die Sättigungsflussdichte B_S, bei der alle Elektronenspins ausgerichtet sind.

dert. Auch ein entgegengesetzt gepoltes Magnetfeld kann die Remanenz verschwinden lassen. Hierzu ist eine ganz bestimmte magnetische Feldstärke, das sogenannte Koerzitivfeld, nötig, damit es einerseits zur vollständigen Entmagnetisierung kommt, sich aber andererseits noch nicht eine entgegengesetzt gepolte Remanenz aufbaut.

Der Effekt, dass die Magnetisierung ferromagnetischer Körper nicht streng proportional der Änderung des äußeren Magnetfeldes folgt, also insbesondere Remanenz verbleibt, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird, wird auch als Hysterese bezeichnet.

Die Stärke der Remanenz wird über die sogenannte magnetische Flussdichte angegeben, welche in den Einheiten Tesla oder Gauss gemessen wird. Dabei gilt die Umrechnung 1 T = 1 Tesla = 10'000 Gauss = 10 kG.

In jedem Magnet ist durch die Ausrichtung der Elektronenspins eine bestimmte Menge an Energie gespeichert, welche durch das Energieprodukt angegeben wird. Die Ausrichtung der Elektronenspins wird bei hohen Temperaturen zerstört. Die gespeicherte magnetische Energie (Betrag des Energieproduktes als Zahl) sowie die maximale Einsatztemperatur (angegeben mit einer Buchstabenkombination, z.B. "N" für 80° Celsius) bestimmen die Güte des Magneten. Ein Magnet mit einer hohen Güte hat also auch eine große Remanenz und demnach starke magnetische Kräfte.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

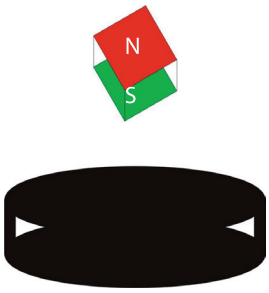
Supraleiter

Ein Supraleiter ist ein Material, das elektrischen Strom widerstandslos leiten kann. Dabei sind Supraleiter jedoch nicht nur unendlich gute Leiter sondern auch perfekte Diamagnete. Ein Diamagnet verdrängt ein magnetisches Feld und schwächt es im Inneren ab. Ein Supraleiter kann das Magnetfeld vollständig abschwächen und aus dem Inneren verdrängen. Die Feldlinien laufen vollständig um den Supraleiter herum. Das Gegenstück zu Diamagneten sind Para- und Ferromagnete, die ein äußeres Magnetfeld verstärken.

Ausführliche Erklärung

Zu den wohl phantastischsten Entdeckungen der modernen Physik gehört die Supraleitung. Es ist bereits sehr faszinierend, dass ein Material keinen elektrischen Widerstand besitzt. Weltweit bekannt geworden sind aber vor allem die Bilder, die zeigen, wie ein Supraleiter über dem Pol eines Permanentmagneten schwebt oder umgekehrt.

Viele Materialien werden bei sehr tiefen Temperaturen supraleitend. Gewöhnliches Blei beispielsweise wird bei Temperaturen des flüssigen Heliums (4 K ca. – 270° C) supraleitend. Diese extrem tiefen Temperaturen geben der Supraleitung zusätzlich Faszination. Heute wird an Hochtemperatursupraleitern geforscht. Dennoch benötigen die gefundenen Materialien immer noch sehr tiefe Temperaturen. Keramische Materialien mit speziellen Eigenschaften werden bei etwa -100° C supraleitend. Dazu ist allerdings immer noch eine extreme Kühlung, z.B. mit flüssigem Stickstoff notwendig.



Die Abbildung zeigt schematisch ein in der Presse oft gezeigtes Bild: Ein kleiner Magnet schwebt über einem supraleitenden Plättchen (schwarz).

Wer schon mal probiert hat, einen Permanentmagneten schweben zu lassen, indem er ihn mit einem Pol über den gleichnamigen Pol eines liegenden Magneten hält (z.B. Nordpol gegen Nordpol), der weiß, wie schwierig dies ist, wenn nicht gar unmöglich. Ein Supraleiter dagegen schwebt stabil im Magnetfeld, obwohl er selbst gar kein Magnet ist. Bringt man den Supraleiter in Kontakt zu einem Ferromagneten (z.B. Eisen), so sind keine magnetischen Kräfte festzustellen. Woran liegt es also, dass der Supraleiter im Magnetfeld schwebt?

Grund für die abstoßenden magnetischen Kräfte zwischen Supraleiter und einem Magnetfeld ist der Diamagnetismus des Supraleiters.

Viele Materialien sind diamagnetisch. So auch Wasser. Diamagnete besitzen keine Elementarmagnete wie Para- oder Ferromagnete, die sich in einem äußeren Magnetfeld ausrichten können. Aber es kommt zu einem Induktionseffekt, wenn ein Diamagnet in ein äußeres Magnetfeld eingebracht wird.

Es kommt zur Induktion einen Stromes im Material, der ein magnetisches Moment bedingt, welches nach der Lenzschen Regel dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet ist. So entsteht eine schwach abstoßenden Kraft. Mit extrem starken Magnetfeldern gelang es so sogar schon, einen Frosch als wasserhaltiges Lebewesen schweben zu lassen.

Ein Diamagnet (z.B. Wasser) wird also abgestoßen, wenn er ins Magnetfeld eingebracht wird, allerdings sehr schwach. Die abstoßende Kraft zwischen Magnetfeldern und diamagnetischen Stoffen ist nur bei Supraleitern stark. Supraleiter werden deshalb auch als "perfekte Diamagnete" bezeichnet. Sie zeigen eine Magnetisierung, welche die magnetische Flussdichte im Innenraum des Supraleiters komplett verdrängt. Der Supraleiter schwebt aufgrund der abstoßenden diamagnetischen Wirkung bereits über einem verhältnismäßig schwachen Magneten.

Zur Beschreibung der Stärke der Magnetisierung wird die magnetische Permeabilität μ eingeführt.

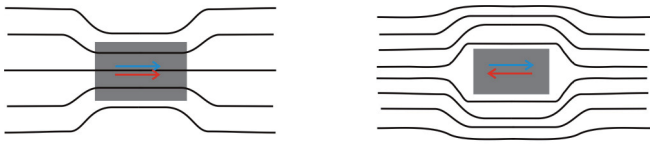
In einem äußeren Magnetfeld H_0 kommt es zur Magnetisierung M. Das gesamte Magnetfeld H in Anwesenheit des Stoffes erhält man durch Multiplikation des äußeren Magnetfeldes H_0 mit der Permeabilität μ: $H = \mu \cdot H_0$.

Dieses Magnetfeld ist die Summe aus dem äußeren Magnetfeld H_0 und der Magnetisierung M des Materials: $H = M + H_0$.

Somit gilt für die Magnetisierung: $M = H - H_0 = \mu \cdot H_0 - H_0 = (\mu - 1) \cdot H_0$.

Man nennt den Faktor (μ -1) auch die magnetische Suszeptibilität χ und es folgt $M=\chi \cdot H_0$. Para- und ferromagnetische Stoffe haben eine Permeabilität, die größer als 1 ist. Die magnetische Suszeptibilität ist somit größer Null. Die Permeabilität diamagnetischer Stoffe ist etwas kleiner als 1, die Suszeptibilität entsprechend kleiner Null. Bei einem Supraleiter ist die magnetische Permeabilität $\mu = 0$ und die Suszeptibilität $\chi = -1$. Somit dringt der magnetische Fluss gar nicht mehr in den Supraleiter ein. Man kann sich auch vorstellen, dass bei Supraleitern die Magnetisierung gleich dem äußeren einfallenden Feld ist, nur entgegengerichtet. Deshalb wird das äußere Feld im Supraleiter kompensiert.

Ein Supraleiter besitzt also keine Durchlässigkeit für magnetische Flussdichte. Er hat einen unendlich großen magnetischen Widerstand. Der Supraleiter verdrängt den magnetischen Fluss vollständig aus seinem Innenraum.



$\mu = 2 \Leftrightarrow \chi = 1$ $\mu = 0 \Leftrightarrow \chi = -1$

*Die Abbildung zeigt den Verlauf der Feldlinien des Magnetfeldes **H** in Gegenwart eines para- bzw. ferromagnetisches Materials ($\mu = 2, \chi = 1$) (links) und in Gegenwart eines Supraleiters mit ($\mu = 0, \chi = -1$) (rechts). Dabei ist das ursprünglich einfallende Feld als blauer Pfeil eingezeichnet und die Magnetisierung als roter Pfeil. In einem ferromagnetischen Material ist die Magnetisierung positiv und damit dem ursprünglichen Feld gleichgerichtet. Dies ist immer der Fall, wenn $\chi > 0$, das Material also das Magnetfeld in gleicher Richtung "aufnimmt" und damit verstärkt. In einem Diamagneten dagegen ist die Magnetisierung dem einfallenden Feld gerade entgegengerichtet. Das aufgenommene Feld ist negativ und damit $\chi < 0$.*

Während die positive Feldverstärkung sogar ein Vielfaches größer sein kann als das einfallende Feld ist die negative Abschwächung maximal bis zur vollständigen Kompensation des Feldes möglich. Diese vollständige Kompensation tritt in Supraleitern auf. Für den Supraleiter gilt $\chi = -1$. Somit $\mu = 0$. Der Supraleiter lässt also gar kein Feld durch. Ein Supraleiter ist demnach ein "perfekter Diamagnet".

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität χ (Lat. suscipere = übernehmen) beschreibt, ähnlich wie die magnetische Permeabilität, wie gut ein magnetischer Fluss ein Material durchdringen kann. Während die Permeabilität den gesamten Fluss im Inneren eines Festkörpers angibt, bezeichnet die Suszeptibilität nur den von der Materie übernommenen Anteil des magnetischen Flusses. Die Suszeptibilität χ ist deshalb genau um 1 kleiner als die Permeabilität μ: χ = μ -1.

Ausführliche Erklärung

Suszeptibilität (Lat. suscipere = übernehmen) ist eng mit Permeabilität (Lat. Permeare = Durchlassen) verbunden. Die Suszeptibilität beschreibt die magnetische Polarisation bei einer äußeren magnetischen Flussdichte, also die Magnetisierung im äußeren Magnetfeld. Abgekürzt wird die Suszeptibilität mit dem griechischen Buchstaben χ. Die Permeabilität μ beschreibt das gesamte Feld, wie es unter dem Einfluss der polarisierten Materie vorliegt.

Betrachtet man die Magnetisierung M eines Materials in einem äußeren Magnetfeld H_0, so ist die Magnetisierung

direkt durch die Suszeptibilität χ gegeben. Es gilt: $M = \chi \cdot H_0$.

Das gesamte Magnetfeld H ist dann die Summe aus der Magnetisierung und dem einfallenden Magnetfeld H_0:
$H = M + H_0 = \chi \cdot H0 + H_0 = (\chi + 1) \cdot H_0$.

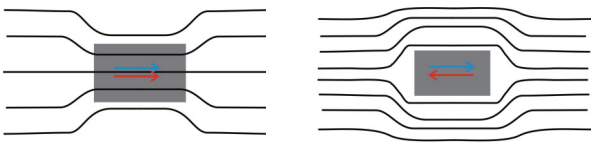
Ebenso kann man schreiben: $H = \mu \cdot H_0$. Diese Gleichung drückt aus, dass das gesamte Magentfeld im Inneren bzw. an der Oberfläche der Materie proportional zum einfallenden Feld ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die Permeabilität. Ein Beobachter würde diese Feldstärke an der Oberfläche des Materials messen. Könnte ein Beobachter jedoch zwischen dem Teil des ursprünglich einfallenden Feldes und dem durch die Magnetisierung hervorgerufenen Feld unterscheiden, so würde er feststellen, dass die Magnetisierung gerade durch die Suszeptibilität als Proportionalitätsfaktor beschrieben wird.

Es gilt also $M = \chi \cdot H_0$. Die Suszeptibilität gibt den Teil an, welcher von der Materie "aufgenommen" wurde. Die Summe aus diesem Teil und dem ursprünglich vorhandenen Teil ist dann das "durchgelassene" Magnetfeld H.

Es gilt also $H = M + H_0 = \chi \cdot H_0 + H_0 = (\chi + 1) \cdot H_0 = \mu \cdot H_0$.

Somit gilt der einfache Zusammenhang $\mu = \chi + 1$ zwischen der Permeabilität μ und der Suzeptibilität χ.
Die positive bzw. negative Aufnahme des magnetischen Feldes kann man sich klar machen, indem man den Grund für Para-/Ferro- bzw. Diamagnetismus vor Augen hält.

Besitzt ein Material Elementarmagnete, sogenannte magnetische Momente, welche sich im äußeren Feld ausrichten können (dies sind im Allgemeinen ungepaarte Elektronenspins), so wird das Material selbst zu einem Magneten, der durch das äußere Feld "aktiviert" wurde. Das gesamte Magnetfeld kann um ein Vielfaches größer sein als das einfallende Feld.



$\mu = 2 \Leftrightarrow \chi = 1$ $\quad$ $\mu = 0 \Leftrightarrow \chi = -1$

*Die Abbildung zeigt den Verlauf der Feldlinien des Magnetfeldes **H** durch ein para- bzw. ferromagnetisches Material ($\mu = 2, \chi = 1$) (links) und um einen Supraleiter mit ($\mu = 0$, $\chi = -1$) herum (rechts). Dabei ist das ursprünglich einfallende Feld als blauer Pfeil eingezeichnet und die Magnetisierung als roter Pfeil.*

In einem ferromagnetischen Material ist die Magnetisierung positiv und damit dem ursprünglichen Feld gleichgerichtet. Dies ist immer der Fall, wenn $\chi > 0$, das Material also das Magnetfeld in gleicher Richtung "aufnimmt" und damit verstärkt. In einem Diamagneten dagegen ist die Magnetisierung dem einfallenden Feld gerade entgegengerichtet. Das aufgenommene Feld ist negativ und damit $\chi < 0$. Während die positive Feldverstärkung sogar ein Vielfaches größer sein kann als das einfallende Feld ist die negative Abschwächung maximal bis zur vollständigen Kompensation des Feldes möglich. Diese vollständige Kompensation tritt in Supraleitern auf. Für den Supraleiter gilt $\chi = -1$. Somit $\mu = 0$. Der Supraleiter lässt also gar kein Feld durch. Ein Supraleiter ist demnach ein "perfekter Diamagnet".

Gibt es keine einzelnen Elektronenspins im Material, so besitzt das Material keine magnetischen Momente. In diesem Fall überwiegt ein schwacher Effekt, der immer vorhanden ist, nämlich der Diamagnetismus. Er entspricht einer Induktion eines Kreisstromes beim Einbringen der Materie in das Magnetfeld. Dieser Kreisstrom ist nach der Lenzschen Regel dem äußeren Magnetfeld (seiner Ursache) entgegengerichtet und demnach ist die Magnetisierung des Diamagneten auch dem äußeren Feld entgegengerichtet.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Weißsche Bezirke (Domänen)

Weißsche Bezirke sind Bereiche innerhalb eines ferromagnetischen Materials, in denen die Elektronenspins, die Elementarmagnete der Materie, parallel ausgerichtet sind. Es ist möglich, in Experimenten diese Bereiche zu untersuchen und ihre Existenz zu beweisen. Wird das ferromagnetische Material (z.B. Eisen) magnetisiert, so verschmelzen verschiedene Weißsche Bezirke und die Elementarmagnete richten sich alle parallel aus. Dadurch sind dann von außen magnetische Kräfte messbar. Benannt sind die Weißschen Bezirke nach dem Physiker Pierre-Ernest Weiss.

Ausführliche Erklärung

Elektronenspins, welche die elementaren magnetischen Bausteine der Materie bilden, sind in ferromagnetischen Festkörpern auch im entmagnetisierten Zustand (also wenn das Material nicht magnetisch ist) teilweise untereinander parallel ausgerichtet und nicht völlig willkürlich verteilt.

So finden sich in ferromagnetischen Materialien grundsätzlich Bereiche von einigen zehntel Millimetern Größe, in denen die Elektronenspins untereinander parallel ausgerichtet sind. Man nennt diese Bereiche Weißsche Bezirke (nach dem Physiker Pierre-Ernest Weiss) bzw. Domänen. Durch ein äußeres Magnetfeld verschmelzen viele kleine Domänen zu größeren Domänen und die Magnetisierung des Festkörpers wird nach außen hin messbar. Parallel ausgerichtete Elektronenspins sind nämlich für das messbare makroskopische Magnetfeld verantwortlich.

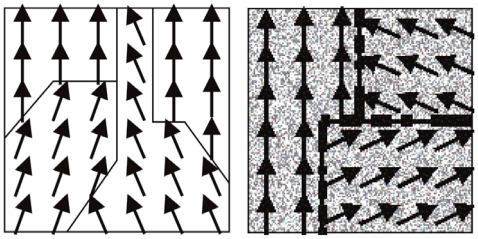
Je nachdem, wie stark die Magnetisierung des Ferromagneten ist, sind die Spins aber auch nie alle parallel, sondern meist nur in Gruppen untereinander parallel angeordnet, während zwischen verschiedenen Gruppen von Spins die Ausrichtung nicht parallel ist.

Der Bereich in einem Ferromagneten, in dem die Spins parallel ausgerichtet sind, wird als ein Weißscher Bezirk oder als eine Domänen bezeichnet. Die Domänen sind untereinander durch sogenannte Bloch-Wände abgetrennt.

Das Phänomen der Weißschen Bezirke kann in einem makroskopischen Modell illustriert werden. Dazu betrachtet man ein Set von Kompassnadeln, die drehbar auf einer Platte gelagert sind. Wenn sich die Kompassnadeln nahe genug sind, so dass es zu einer gegenseitigen Beeinflussung durch das magnetische Feld der benachbarten Nadeln kommt, dann stellt sich ein Zustand ein, in dem sich die Kompassnadeln in bestimmten Bereichen parallel ausrichten. Das Feld einer Kompaßnadel richtet die anderen Kompaßnadel aus.

Es passiert jedoch höchst selten, dass sich wirklich alle Kompaßnadeln parallel ausrichten. Meist gibt es eine Bereichsgrenze, hinter welcher eine abweichend ausgerichtete Gruppe zu finden ist, wie es in folgender Abbildung gezeigt ist.

In einem solchen Modell können alle Kompassnadeln durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden. Durch den Einfluss der Temperatur (Bewegung der Komßaßnadeln) oder mechanischen Einfluss von Außen (Schläge auf das Brett) passiert es, dass ganze Gruppen von Kompassnadeln ihre Ausrichtung simultan ändern. Dies geschieht durch die gegenseitige Wechselwirkung der Kompaßnadeln, wie auch bei Elektronenspins, oft sprunghaft für eine gesamte Gruppe.



Weißsche Bezirke sind Bereiche in einem Festkörper, in dem die magnetischen Momente der vorhandenen Elektronenspins (durch Pfeile angedeutet) untereinander parallel ausgerichtet sind. Die Weißschen Bezirke sind untereinander durch sogenannte Bloch-Wände getrennt. Die Bloch-Wände können sichtbar gemacht werden, indem eine Suspension mikroskopischer ferromagnetischer Partikel (z.B. Eisenstaub) auf das ferromagnetische Material gegeben wird. Der Staub (wie rechts angedeutet) sammelt sich dann entlang der Bereichsgrenzen verschiedener Weißscher Bezirke.

Auch an Elektronenspins kann dieses sprunghafte Verhalten direkt beobachtet werden. Man spricht dabei von sogenannten Barkhausen-Sprüngen.

Die Veränderung der Ausrichtung eines ganzen Weißschen Bezirks (Barkhausen-Sprung) führt zu einer Magnetfeldänderung. Diese kann über einen Verstärker und einen Lautsprecher hörbar gemacht werden. Die Barkhausensprünge machen sich dann als kurzes "Knacken" im Lautsprecher bemerkbar.

Ebenso kann man die Bloch-Wände im Experiment sichtbar machen, indem eine Suspension mikroskopischer ferromagnetischer Partikel (z.B. Eisenstaub) auf das ferromagnetische Material gegeben wird. Der Staub sammelt sich dann entlang der Bereichsgrenzen verschiedener Weißscher Bezirke (siehe Abbildung). Dies kann unter dem Mikroskop direkt beobachtet werden.

Zunächst scheint es nicht verblüffend, dass benachbarte Elektronenspins wechselwirken und wie die Kompassnadeln Weißsche Bezirke bilden, denn die magnetischen Momente der Elektronenspins beeinflussen sich gegenseitig, und somit könnte man annehmen, dass das Magnetfeld eines Elektronenspins das Magnetfeld eines benachbarten Elektronenspins beeinflusst. So geschieht es im Modell der Kompassnadeln.

Es kann jedoch gezeigt werden, dass diese magnetische Kraft viel zu klein ist, um die starke Stabilisierung der Elektronenspins gegen die thermische Bewegung in Ferromagneten zu erklären. Stattdessen ist für die gegenseitige Wechselwirkung der Elektronenspins und für die Ausbildung von Weißschen Bezirken im Ferromagneten vor allem die Austauschwechselwirkung verantwortlich.

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https : // www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.

Impressum und wichtige Hinweise

Impressum Schweiz
Webcraft AG
Weiherallee 11a
8610 Uster

Telefon: +41 43 399 03 51
Fax: +41 43 466 95 10
E-Mail: support@supermagnete.ch
https://www.supermagnete.ch

Impressum Europa
Webcraft GmbH
Industriepark 206
78244 Gottmadingen

Telefon: +49 7731 939 839 2
Fax: +49 7731 939 839 9
E-Mail: support@supermagnete.de
https://www.supermagnete.de

Wenn dieses Glossar für Sie hilfreich war, freuen wir uns sehr über einen Link auf die Online-Version unseres Glossars.

Für die Schweiz: **https://www.supermagnete.ch/magnetismus**
Für Deutschland: **https://www.supermagnete.de/magnetismus**
Für Österreich: **https://www.supermagnete.at/magnetismus**

Copyright
Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Glossars (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Dipl. Phys. Franz-Josef Schmitt, Berlin. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https://www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden. Ausnahme: Lehrpersonen ist es erlaubt, das gesamte Glossar oder Kapitel daraus in unveränderter Form für den Unterricht zu verwenden.

Die aktuellste Fassung des Glossars ist stets die Online-Version, aufrufbar via
https://www.supermagnete.com/magnetismus.

© 2015 Webcraft AG

Das Urheberrecht am gesamten Inhalt des Kompendiums (Texte, Fotos, Abbildungen etc.) liegt beim Autor Franz-Josef Schmitt. Die ausschliesslichen Nutzungsrechte für das Werk liegen bei Webcraft AG, Schweiz (als Betreiberin von https://www.supermagnete.ch). Ohne ausdrückliche Genehmigung von Webcraft AG darf der Inhalt weder kopiert noch anderweitig verwendet werden.