

Theoretische Grundlagen

Magnetische Grundgrößen

Durchflutung Θ

Laut dem Durchflutungssatz ist die magnetische Umlaufspannung $V(\partial A) = I(A)$ gleich der rechtswendig umfassten Durchflutung Θ .

In der Laborübung ist der Rand der Fläche (∂A) der mittlere Umfang der Spule. Der Strom $I(A)$ der durch die Fläche tritt ist der Spulenstrom, wobei dieser für N Windungen, N mal durch die Fläche tritt. Es gilt

$$\theta = N * I \quad [\theta] = [A] \quad (1)$$

Magnetische Feldstärke H

Die magnetische Feldstärke ist der lokale Repräsentant der Durchflutung. Sie gilt als die längenbezogene magnetische Spannung

$$H = \frac{\theta}{l} \quad [H] = \left[\frac{A}{m}\right] \quad (2)$$

Wobei l für die Länge des Flächenrandes (∂A) gilt.

Magnetischer Fluss Φ

Vom Satz des magnetischen Hüllenflusses geht hervor, dass ein durch die geschlossene Oberfläche eines Raumteiles eintretender Fluss, gleich dem austretenden entspricht. Das heißt der magnetische Fluss ist vom Verhalten ähnlich dem elektrischen Strom, wegen seiner gleichartigen Eigenschaften (Satz der Erhaltung der elektrischen Ladung). Der Unterschied besteht darin, dass es beim Fluss zu keinem Materietransport (Ladungsträger) kommt. Er berechnet sich mittels seines lokalen Repräsentanten, der magnetischen Flussdichte B .

$$\Phi = \int B \, dA \quad [\Phi] = [Vs] = [Wb] \quad (3)$$

Magnetische Flussdichte B

Die magnetische Flussdichte beschreibt die Flussverteilung im Raum. Sie ist über die Permeabilität μ mit der magnetischen Feldstärke verknüpft. Im allgemeinen Fall gilt

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad [B] = \left[\frac{Vs}{m^2}\right] = [T] \quad (4)$$

Ist nun die Flussdichte auch abhängig von der Ausrichtung der magnetischen Momente so gilt

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (5)$$

Magnetische Polarisation I , Magnetisierung M

Die Magnetisierung und die magnetische Polarisation bezeichnen die gleiche physikalische Größe, etwa das Maß der Ausrichtung der magnetischen Momente im Material. Die beiden Größen I und M hängen über die Konstante μ_0 zusammen:

$$\vec{I} = \mu_0 \vec{M} \quad [I] = [T], \quad [M] = \left[\frac{A}{m}\right] \quad (6)$$

Permeabilität μ

Die Permeabilität zeigt den proportionalen Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte und Feldstärke. Sie setzt sich aus der magnetischen Feldkonstante sowie der einheitenlosen, materialabhängigen relativen Permeabilität zusammen.

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad [\mu_0] = \left[\frac{Vs}{Am} \right], \quad [\mu_r] = [1] \quad (7)$$

Bei para- und diamagnetischen Werkstoffen kann diese meist als konstant angesehen werden. Anders ist dies bei ferromagnetischen Stoffen, wobei die Magnetisierung von der Vorgeschichte des Materials abhängt.

Suszeptibilität χ

Die Suszeptibilität spiegelt den reinen Materialeinfluss ohne die Permeabilität des leeren Raumes wieder:

$$\chi = \mu_r - 1 \quad [\chi] = [1] \quad (8)$$

Bei dia- und paramagnetischen Stoffen weicht die relative Permeabilität nur so geringfügig von 1 ab, sodass aus schreibtechnischer Bequemlichkeit die Suszeptibilität benutzt wird.

Magnetische Widerstand R_m

Der magnetische Widerstand gibt das Verhältnis zwischen Fluss und Durchflutung an.

$$R_m = \frac{\theta}{\Phi} \quad [R_m] = \left[\frac{A}{Vs} \right] \quad (9)$$

Der magnetische Widerstand ist abhängig vom Material und der Geometrie des Objektes. Bei ferromagnetischen Materialien ist er auch von der Vorgeschichte der Magnetisierung abhängig.

Magnetische Stoffeigenschaften

Diamagnetismus

Die Atome diamagnetischer Stoffe haben eine aufgefüllte Elektronenschale, die Summe der Drehimpulsvektoren verschwindet, und somit ist ohne Einwirkung eines Fremdfeldes kein eigenes, resultierendes magnetisches Moment vorhanden. Bringt man nun eine diamagnetische Substanz in ein magnetisches Feld, so induziert dieses in den Elektronenhüllen der Atome einen Strom, dessen Magnetfeld dem äußeren entgegengerichtet ist. Diamagnetismus führt so zu einer Abschwächung des Magnetfeldes in der Substanz. In Materialien deren Atome, Ionen oder Moleküle keine ungepaarten Elektronen besitzen, ist Diamagnetismus die einzige Form von Magnetismus. Hier ist die Suszeptibilität daher negativ und bis zu einer kritischen Temperatur von dieser unabhängig.

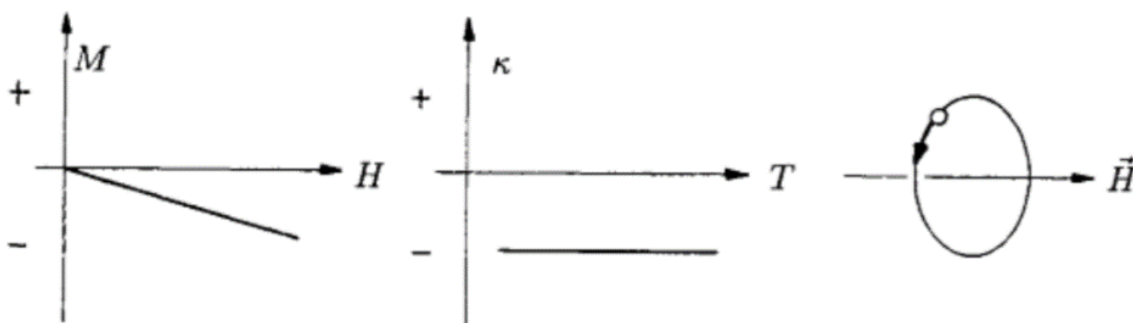


Abbildung 1: Kennlinien des Diamagnetismus

Paramagnetismus

Der Paramagnetismus ist eine schwache bis mittlere Form des Magnetismus, bei dem die Magnetisierung parallel zum angelegten Feld orientiert ist. Die Magnetisierung M ist proportional zur Feldstärke H , die Suszeptibilität ist positiv. Die Suszeptibilität erweist sich umgekehrt proportional zur Temperatur.

Die Atome tragen ein permanentes magnetisches Moment. Durch das angelegte Feld werden diese permanenten Dipole gegen die Wirkung der Temperaturbewegung teilweise parallel ausgerichtet.

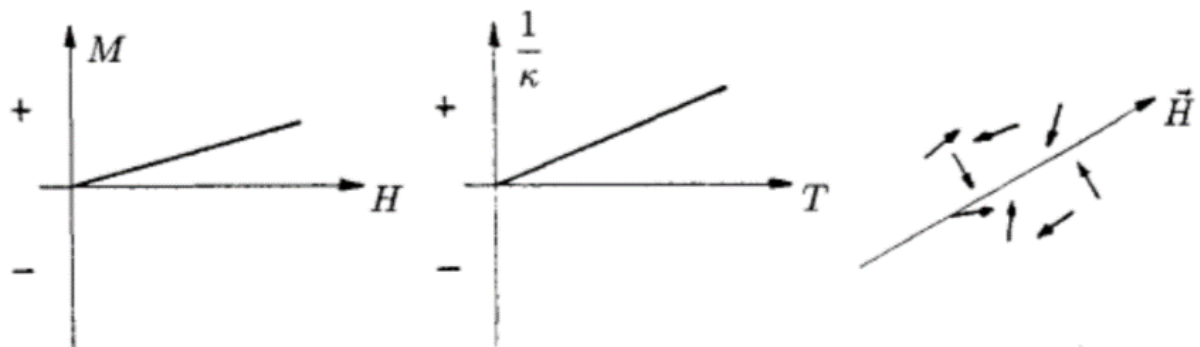


Abbildung 2: Kennlinien des Paramagnetismus

Ferromagnetismus

Die bedeutendste Art des Magnetismus ist der Ferromagnetismus. Die entstehende Magnetisierung M ist parallel zur angelegten Feldstärke H . Es handelt sich um eine Sättigungsmagnetisierung und daher weist sie schon bei kleinsten Feldstärken sehr hohe Werte auf. Die Suszeptibilität ist positiv und kann Beträge von $K = 10^5$ annehmen. Der Ferromagnetismus ist ein temperaturabhängiges Phänomen. Die Sättigungsmagnetisierung nimmt mit steigender Temperatur ab, bis sie schließlich bei der Curie Temperatur praktisch verschwindet und Werte einer paramagnetischen Magnetisierung annimmt.

Beim Ferromagnetismus sind die magnetischen Momente einzelner Teilchen nicht unabhängig voneinander, sondern richten sich spontan parallel aus. Die Kopplung der magnetischen Momente erstreckt sich aber nicht über das ganze Material, es ist auf kleine Bereiche, die sogenannten Weiss'schen Bezirke, beschränkt. Die Ausrichtung dieser ist statistisch verteilt, sodass der Gesamtkörper unmagnetisch erscheint. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes richten sich die Weiss'schen Bezirke gleichnamig aus. Diese Gleichrichtung bleibt auch nach Entfernen des äußeren Feldes erhalten, man erhält eine permanente Magnetisierung. Die Magnetisierung kann man durch Erhitzen jenseits der Curie-Temperatur oder mechanischer Erschütterung aufgehoben werden.

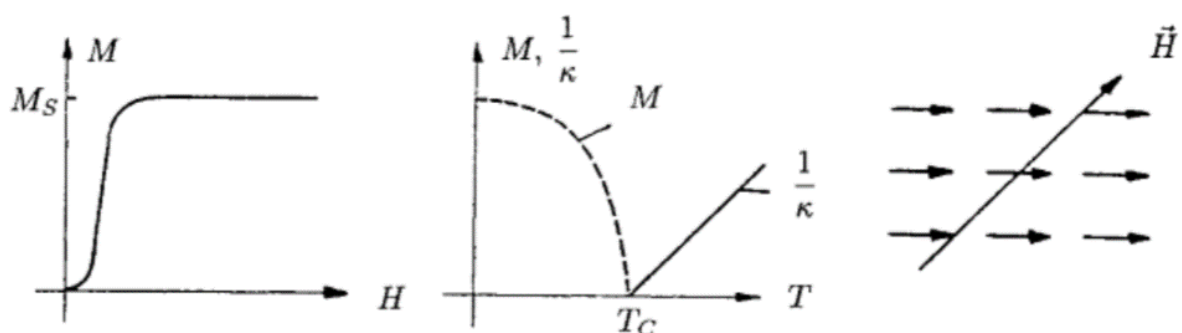


Abbildung 3: Kennlinien des Ferromagnetismus

Der magnetische Grundkreis

Abbildung 4 zeigt einen magnetischen Grundkreis. Er besteht aus einem hochpermeablen Material, welches einen geringen magnetischen Spannungsabfall aufweist und einen Luftspalt, an welchen der Großteil der Leistung des magnetischen Kreises verrichtet wird. Der magnetische Widerstand in der Luft ist um ein Vielfaches größer als in Materialien mit einer hohen Permeabilität. Diese Unterschiede

ermöglichen die Einstellung großer Flussdichten und folglich einer dementsprechenden Feldstärke an gewünschten Orten.

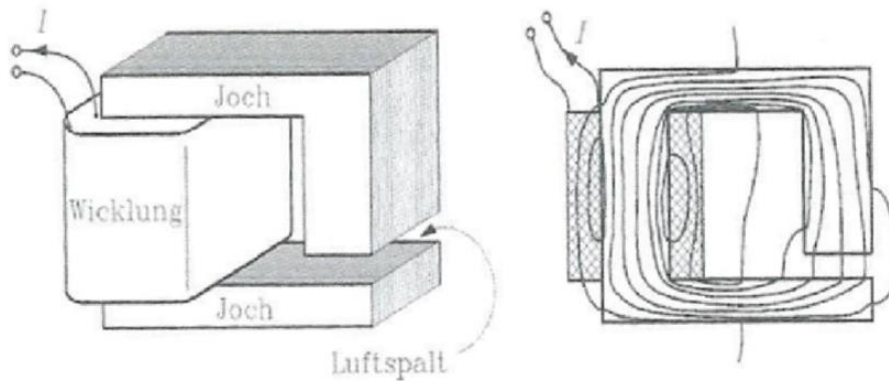


Abbildung 4: Magnetischer Grundkreis mit Luftspalt

Magnetische Erscheinungen

Induktionsgesetz

Induktionsgesetz: Die elektrische Umlaufspannung entspricht der Abnahmerate des rechtswendig umfassten magnetischen Flusses.

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (10)$$

Anders ausgedrückt ist die Spannung entlang des Randes einer Fläche gleich der zeitlichen Änderungsrate des magnetischen Flusses, der durch die Fläche tritt. Bei einer Leiterschleife mit N Windungen wird die Fläche n-mal durchtreten.

Lorentzkraft

In einem magnetischen bzw. elektrischen Feld beträgt der Kraftvektor F auf eine Ladung

$$\vec{F} = Q * (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (11)$$

Der elektrische Strom ist ein Repräsentant für bewegte Ladungsträger mit der Geschwindigkeit v . Wenn man sich aus der Richtung von v in Richtung von B bewegt und diese Bewegung im Sinne einer Rechtschraube ein weiteres Mal fortführt, gelangt man zu der Richtung des Kraftvektor F . Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

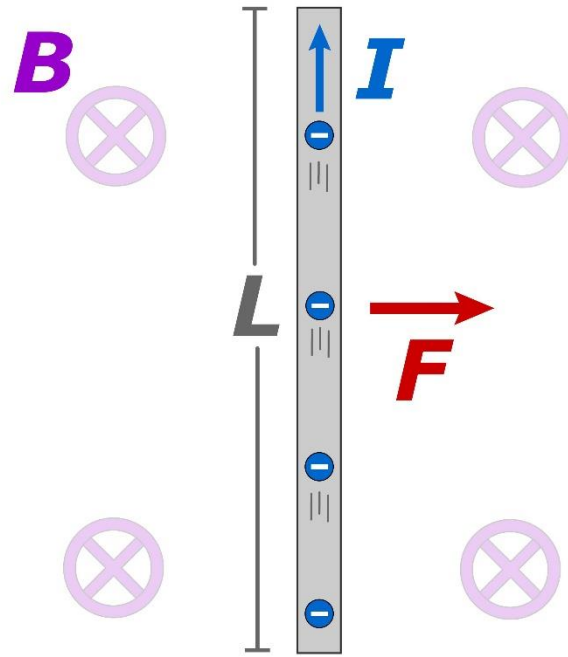


Abbildung 5: Kraftentwicklung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

Hystereseschleife

Die Hysterese im Gebiet des Ferromagnetismus beschreibt den Zusammenhang zwischen der in einem ferromagnetischen Stoff vorhandenen Feldstärke zu der sich einstellenden Flussdichte bzw. Magnetisierung. Hysterese beschreibt im Allgemeinen, dass eine veränderliche Ausgangsgröße nicht allein von der Eingangsgröße abhängig ist, hier spielt die Vorgeschichte des Materials eine tragende Rolle.

Demnach ist nach Anlegen eines Feldes bei einem völlig entmagnetisierten ferromagnetischem Material eine wahrnehmbare Änderung vom Verlauf der $M(H)$ bzw. $B(H)$ Charakteristik gegenüber einem bereits vormagnetisierten Stoff bemerkbar. Abbildung 6 zeigt dieses Phänomen. Man nennt die Kennlinie beim Magnetisieren eines entmagnetisierten Stoffes Neukurve. Diese besitzt für kleine Feldstärken einen praktisch linear ansteigenden Teil, welcher aufgrund reversibler Wandverschiebungen entsteht. Wird die Feldstärke erhöht, so zeigt der Kurvenverlauf einen durch irreversiblen Wandverschiebungen ausgelösten, stark ansteigenden Teil. Infolge magnetischer Sättigung des Materials, vorausgesetzt die erforderliche Feldstärke wird erreicht, flacht der Verlauf stark ab. Reduziert man nun die Feldstärke auf null, so wird ein gewisser Anteil der Magnetisierung beibehalten, dieser Punkt wird als Remanenz bezeichnet.

Wird der Stoff nun mit einem, ungefähr in derselben Größenordnung gegensinnigen Feld beaufschlagt, dreht dieser Prozess die Magnetisierungsrichtung um. Hierbei wird ein markanter Punkt der Feldstärke durchquert, bei dem sich die Magnetisierung des Materials kurzzeitig verflüchtigt, die sogenannte Koerzitivfeldstärke. Der Stoff bleibt bei Wiederholung letzterer Schritte bis auf weiteres magnetisiert und weist analoges Verhalten auf.

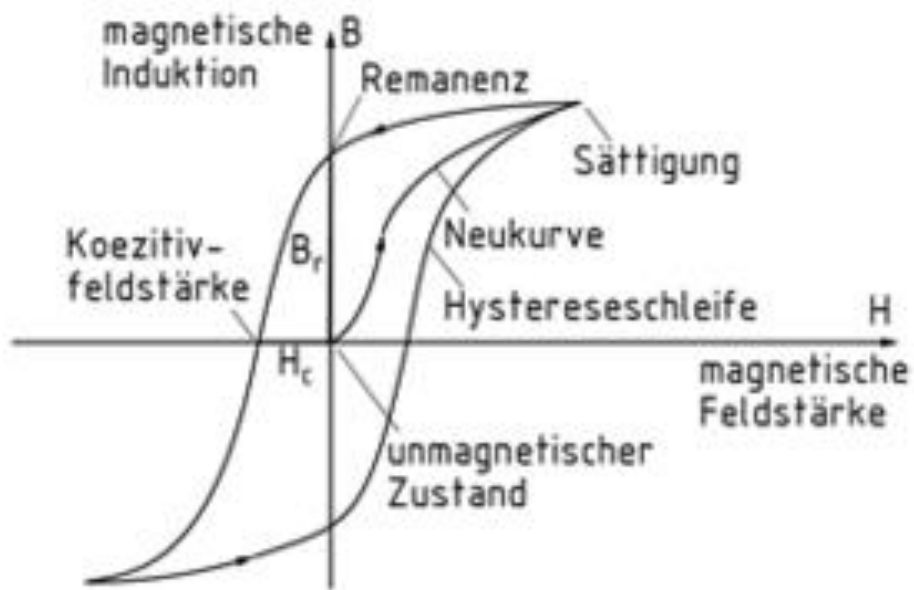


Abbildung 6: Hystereseschleife eines ferromagnetischen Materials inklusive Neukurve

In der Praxis kann aber mithilfe der Hysteresescharakteristik ein ferromagnetischer Stoff durch ein sukzessive abnehmendes, magnetisches Wechselfeld entmagnetisiert werden.