



Versuch MagMat: Magnetische Eigenschaften der Materialien (IGP)

1. Grundlagen

1.1. Bedeutung magnetischer Werkstoffe

Magnetische Erscheinungen sind seit dem Altertum bekannt. Bis Mitte des 19. Jahrhunderts war der Kompass jedoch die einzige wichtige Anwendung des Magnetismus. Erst mit der Entwicklung der elektrotechnischen Industrie am Ende des 19. Jahrhunderts entstand eine ständig steigende Nachfrage nach Magnetwerkstoffen. Gegenwärtig finden Magnetwerkstoffe als unentbehrliche Komponenten in verschiedensten technischen Gebieten Anwendung:

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

Die zahlreichen **Anwendungsmöglichkeiten** können in 3 Wirkprinzipien eingeordnet werden:

- 1 Erzeugung mechanischer Kräfte,
- 2 Energieumwandlung (elektromechanisch, elektrothermisch),
- 3 Elektromagnetische Abschirmung/Kopplung.

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

1.2 Magnetismus

Die phänomenologische Beschreibung magnetischer Erscheinungen kann bereits auf Basis des *Rutherford - Bohrschen Atommodells* erklärt werden. Demnach erzeugen die um ihre eigene Achse (**Spinmoment**) und den Atomkern (**Bahnmoment**) rotierenden Elektronen magnetische Momente. Das Moment des Atomkerns selbst ist sehr gering und deshalb für die hier dargestellten Betrachtungen vernachlässigbar. Die Überlagerung der in der Elektronenhülle eines Atoms auftretenden Momente erfolgt unterschiedlich. Sie ist abhängig vom Umlaufsinn und von der Spinorientierung der einzelnen Elektronen, ihrem Energieniveau und damit von der Besetzung der Elektronenschalen.

Danach unterscheidet man:

Diamagnetische Stoffe (Cu, Ag, Au, Hg, Pb u.a.)

Die Zahl der Elektronen und ihre Bewegungsrichtungen sind so aufeinander abgestimmt, dass es zu einer **Kompensation der Teilmomente** kommt. Damit sind solche Substanzen ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes nicht magnetisch. Erst durch Anlegen eines Magnetfeldes wird infolge der Wechselwirkung des einwirkenden Magnetfeldes mit den sich bewegenden ladungsbehafteten Teilchen (Lorentzkraft) der magnetische Gleichgewichtszustand gestört und ein resultierendes magnetisches Moment auf atomarer Ebene erzeugt, das dem äußeren Feld entgegengerichtet ist. Das Gesamtfeld ist somit kleiner als im Vakuum. Aus genügend starken Magnetfeldern werden diamagnetische Körper herausgestoßen.

Paramagnetische Stoffe (Na, K, Mg, Al, Sn, Pt u.a.)

Hier liegt **keine vollständige Kompensation der Teilmomente** auf atomarer Ebene vor (z.B. bei nicht abgeschlossenen Elektronenschalen, ungeraden Elektronenzahlen). Ohne äußeres Magnetfeld sind die Orientierungen der atomaren magnetischen Momente jedoch durch die thermische Bewegung statistisch gleich verteilt, so dass keine makroskopische Magnetisierung resultiert (s. Abb. 1).



Abb. 1: Schematische Darstellung der regellosen Ausrichtung der atomaren magnetischen Momente beim Paramagnetismus

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

Ferromagnetische Stoffe (Fe, Co, Ni u.a.)

Materialien, die

- auf atomarer Ebene ausreichend große magnetische Momente (infolge nicht vollständiger Besetzung **innerer** Schalen) besitzen und
- hinreichende atomare Abstände aufweisen, die eine Wechselwirkung dieser magnetische Momente direkt (bei Metallen) oder indirekt über die Sauerstoffionen (bei Oxidkeramiken) zu lassen,

können ohne Einwirkung eines äußeren Feldes unterhalb einer kritischen Temperatur (Curie-Temperatur) in einem magnetisch geordneten Zustand, d.h. in eine spontane Magnetisierung, übergehen.

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

Abb. 2 zeigt eine mögliche solche **spontane Domänenanordnung**.

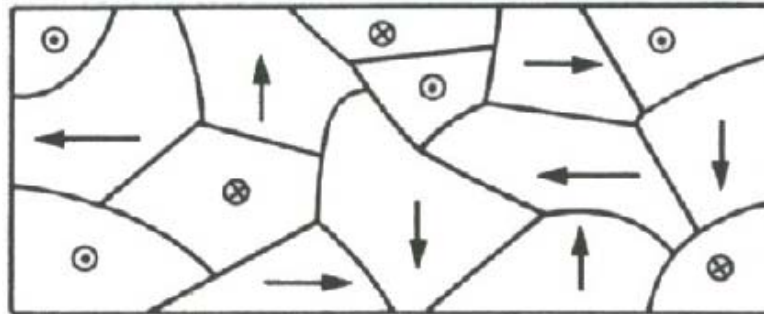


Abb. 2: Mögliche spontane Anordnung Weißscher Bezirke ferromagnetischer Materialien

An den Rändern aneinanderliegender Domäne ändert sich die Magnetisierungsrichtung keineswegs sprunghaft, sondern schrittweise innerhalb einer **Bloch-Wand** (vgl. Abb. 3).

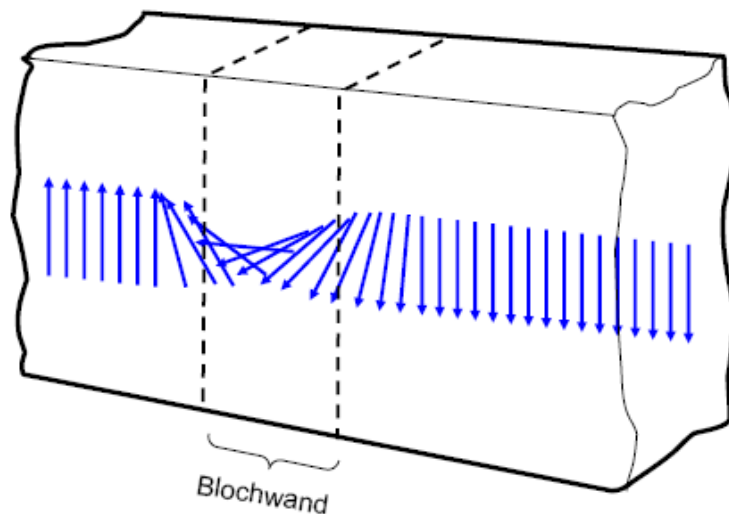


Abb. 3: Blochwand zwischen zwei 180°Domäne und Umkehr der atomaren magnetischen Momente

Da sich das Magnetfeld der spontanen Domänenanordnung im Material schließt, scheinen auch ferromagnetische Materialien nach außen nicht magnetisch zu sein, solange kein äußeres Magnetfeld angelegt war oder ist (vgl. Abb. 4a).

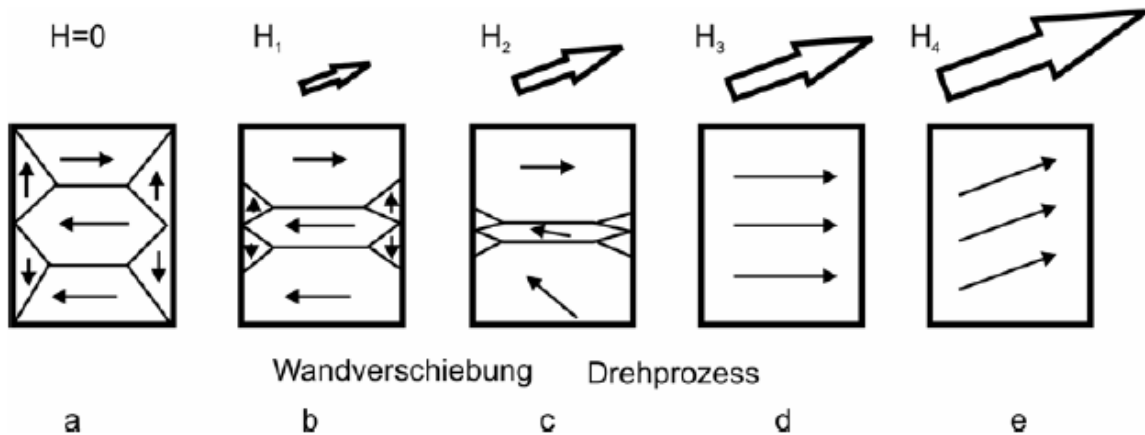


Abb. 4: Ablauf der Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials

- nach außen unmagnetischer Zustand
- reversible Wandverschiebung
- weitere Wandverschiebung und Drehprozesse
- Wandverschiebung beendet (magnetischer Einbereich in leichter Richtung)
- reversible Drehprozesse, Sättigung

Das Anlegen eines sehr kleinen Magnetfeldes bewirkt Blochwandverschiebungen, die zu Anfang reversibel (b), nach Überschreiten bestimmter Potentialschwellen irreversibel (*Barkhausensprünge*) sind (c).

Sind alle Weißschen Bezirke so orientiert, dass die Magnetisierungsrichtungen mit der einer Vorzugsrichtung zusammenfallen, die mit dem äußeren Feld den kleinstmöglichen Winkel bildet (d), so ist eine weitere Steigerung der Magnetisierung bei wachsendem äußerem Feld nur möglich, wenn die Magnetisierungsvektoren aus der Vorzugsrichtung heraus in die Richtung des äußeren Feldes gedreht werden. Diese Drehprozesse sind zunächst auch reversibel. Stehen schließlich sämtliche Momente parallel zum äußeren Feld, so wird das Material als magnetisch gesättigt bezeichnet (e).

Bei Reduzierung des äußeren Magnetfeldes bis auf Null verschwindet die Magnetisierung nicht vollständig. Es bleibt eine Restmagnetisierung B_r bestehen. Diese verschwindet erst bei Anlegen eines entgegengesetzten Feldes in Höhe der Koerzitivfeldstärke B_c (Achtung nur $B=0$!).

Bei weiterer Variation der äußeren Feldstärke kann die ganze Magnetisierungskurve durchfahren werden. Den Zusammenhang beschreibt die **Hysteresekurve** oder $B(H)$ -Kennlinie (s. Abb. 5).

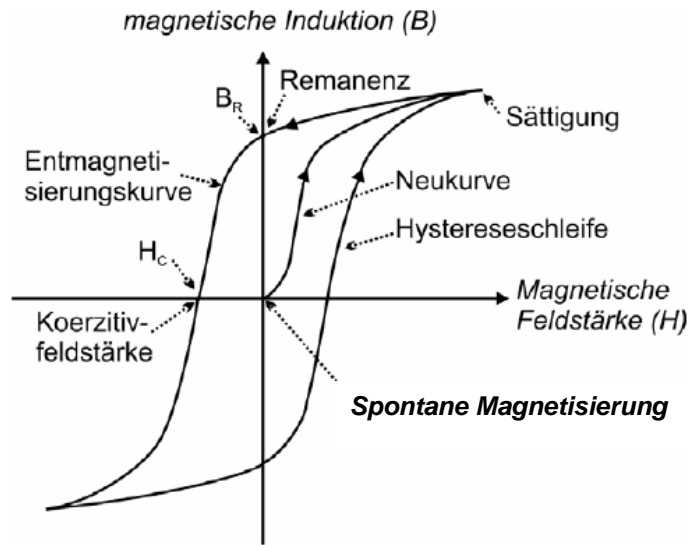


Abb. 5 Hystereseurve $B(H)$ mit Neukurve eines ferromagnetischen Materials
 H_c – Koerzitivfeldstärke der Induktion, B_r – Remanenzinduktion, B_s – Sättigungsinduktion

Bei Ferromagnetika können 3 spezielle Ordnungszustände auftreten:

Antiferromagnetismus: (MnO, FeO, CoO, NiO u.a.)

Hier sind die Domäne aufgrund kleinerer Verhältnisse von Atomabstand zu Elektronenschalenradius antiparallel ausgerichtet (s. Abb. 6).

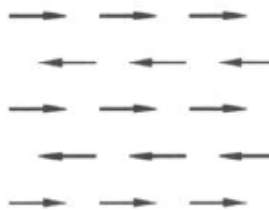


Abb. 6: Antiparallele Ausrichtung gleichgroßer Domänen bei Antiferromagnetika

Trotz des geordneten magnetischen Zustandes ist daher die makroskopische Magnetisierung ohne äußeres Magnetfeld Null.

Ferrimagnetismus: (Fe_3O_4 , $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $BaFe_{12}O_{19}$ oder $SrFe_{12}O_{19}$ u.a.)

Hier liegt eine antiferromagnetische Ordnung vor, dessen magnetische Momente aufgrund eines unsymmetrischen Gitteraufbaus unterschiedlich groß sind und deshalb sich nur teilweise kompensieren (s. Abb. 7).

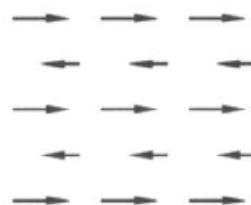


Abb. 7 Antiparallele Ausrichtung ungleichgroßer magnetischer Domäne bei Ferrimagnetika

Superparamagnetismus:

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

Neben dieser physikalischen Klassifizierung werden Ferromagnetika technisch auch in **weich-** und **hartmagnetische** Stoffe unterschieden. Abb. 8 stellt die B-H-Kennlinien von einem typisch hartmagnetischen und typisch weichmagnetischen Werkstoff gegenüber.

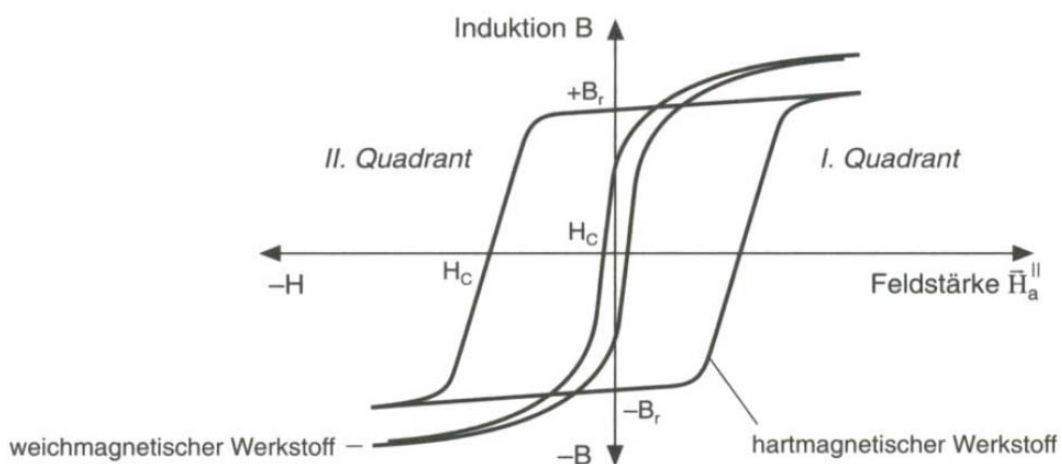


Abb. 8 Qualitative Gegenüberstellung der $B(H)$ - Kennlinien eines typisch hart- und weichmagnetischen Werkstoffes

Ist die Richtung der spontanen Magnetisierung nur sehr locker an die Vorzugsrichtung gebunden, so ist die Koerzitivfeldstärke klein. Das Material wird als **weichmagnetisch** bezeichnet. Ist die Bindung dagegen sehr fest, die Koerzitivfeldstärke also hoch ($> 1 \text{ kA/m}$), so spricht man von **hartmagnetischem** Material.

Weichmagnetische Materialien werden in der Regel zur Führung des magnetischen Flusses eingesetzt, hartmagnetische dagegen – auch mit „permanentmagnetisch“ bezeichnet – werden für die Flusserzeugung und damit als passive Feldquelle verwendet.

1.3. Kennwerte zur Eigenschaftsbeschreibung und ihre Aussagefähigkeit

Bei Magnetfeldern in einem Material wird der Zusammenhang zwischen der Induktion B und der Feldstärke H beschrieben durch Gl. (1):

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \mathbf{H} \quad (1)$$

mit μ_0 - die **absolute Permeabilität** im Vakuum.

Sie ist eine Konstante. Ihr Wert beträgt $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am.

μ_r bezeichnet die **relative Permeabilität** des Materials. Sie gibt die „verstärkende“ oder „schwächende“ Wirkung des jeweiligen Stoffes im Magnetfeld gegenüber dem luftleeren Raum an.

Analog zum elektrischen Feld kann die Änderung der magnetischen Flussdichte in einem Material auch durch eine additive Größe zur Induktion im Vakuum beschrieben werden.

Es gilt:

$$\mathbf{B(H)} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M(H)}) \quad (2)$$

bzw.

$$\mathbf{B(H)} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J(H)} \quad (3)$$

wobei M - die Magnetisierung des Materials und
 J - seine magnetische Polarisation kennzeichnet.

Die $B(H)$ - und $J(H)$ - bzw. $M(H)$ -Abhängigkeiten sind messtechnisch mit verschiedenen Geräten bestimmbar. Die Umrechnung ist durch Subtraktion oder Addition des Vakuumanteils ($\mu_0 H$) möglich.

Unter Einbeziehung der Gl. (1) kommt man zur Definition der **magnetischen Suszeptibilität** χ gemäß Gl. (4):

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (4)$$

Bei nichtferromagnetischen Stoffen sind μ_r und χ Materialkonstanten:

<u>diamagnetisch:</u>	$\mu_r < 1$ ($1 - 7 \cdot 10^{-6} \dots 1 - 2 \cdot 10^{-4}$),	$\chi < 0$,
<u>paramagnetisch:</u>	$\mu_r > 1$ ($1 + 1 \cdot 10^{-8} \dots 1 + 4 \cdot 10^{-4}$),	$\chi > 0$.

Dagegen sind μ_r und χ bei ferromagnetischen Stoffen abhängig von der magnetischen Feldstärke H und der magnetischen Vorgeschichte. Für die Größe gilt:

<u>ferromagnetisch:</u>	$\mu_r \gg 1$ (...100 ... $5 \cdot 10^5$)
-------------------------	--

Setzt man ein ferromagnetisches Material im nichtmagnetisierten Zustand einem äußeren Magnetfeld aus, so ergibt sich zunächst die **Neukurve** (vgl. Abb. 5). Man erhält sie auch durch Verbinden der Umkehrpunkte der Hystereseschleifen bei zyklischer Magnetisierung mit größer werdender Aussteuerung (s. Abb. 10).

Die Neukurve wird als Grundlage praktischer Berechnungen von magnetischen Kreisen verwendet. In der Literatur wird sie auch **Magnetisierungskurve** oder **Kommutierungskurve** genannt.

Die Hystereseschleife, die sich bei Sättigung einstellt, heißt **Grenzkurve** oder **permanente Zustandskurve**.

Bei **hartmagnetischen Materialien** werden aufgrund ihrer Applikation (Felderzeugung!) vorrangig folgende Kennwerte benutzt:

- die **Remanenz B_r** ($H=0$),
- die **Koerzitivfeldstärken $B_H C$** ($B=0$) oder **$J_H C$** ($J=0$),
- das **maximale Energieprodukt $(BH)_{max}$** .

Der $(BH)_{max}$ -Wert bezeichnet die Kenn- oder Gütezahl des Materials und gibt gleichzeitig bei vielen Anwendungen den günstigsten (optimalen) Arbeitspunkt an.

Diese 3 Kennwerte sind alle in der **Entmagnetisierungskennlinie** (s. Abb. 9) zu finden.

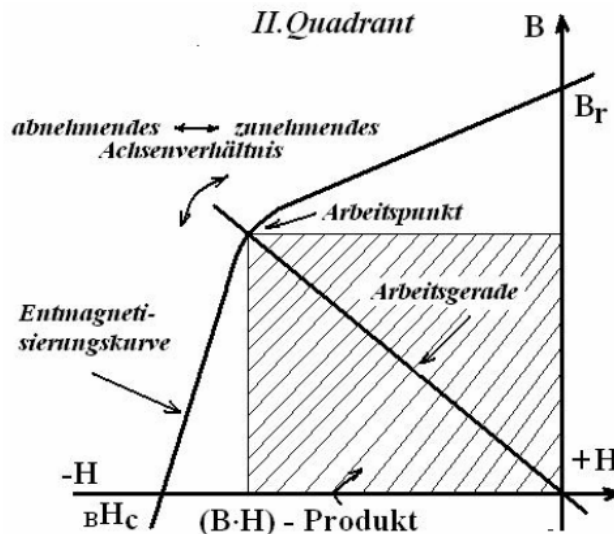


Abb. 9: Entmagnetisierungskennlinie eines hartmagnetischen Materials mit den Kennwerten

Sie stellt den Teil der remanenten Zustandskurve eines Magnetwerkstoffes im 2. Quadranten dar.

Zur Bewertung von **weichmagnetischen Werkstoffen** sind dagegen aufgrund ihrer Anwendung (Flussführung/-leitung!) vorrangig folgende Kennwerte wichtig:

- die **relative Permeabilität μ_r** ,
- die **Sättigungsinduktion B_s** ,

c) die **Ummagnetisierungsverluste** P_{vU} (bei AC-Anwendungen)

Da die relativen Permeabilitäten von der Feldstärke abhängen, wurden diskrete Werte in Abhängigkeit der Aussteuerung, die natürlich von der Anwendung bestimmt wird, definiert.

Die **Anfangspermeabilität** μ_i ist die Neigung der Tangente an die Neukurve im Koordinatenursprung des B-H-Diagramms.

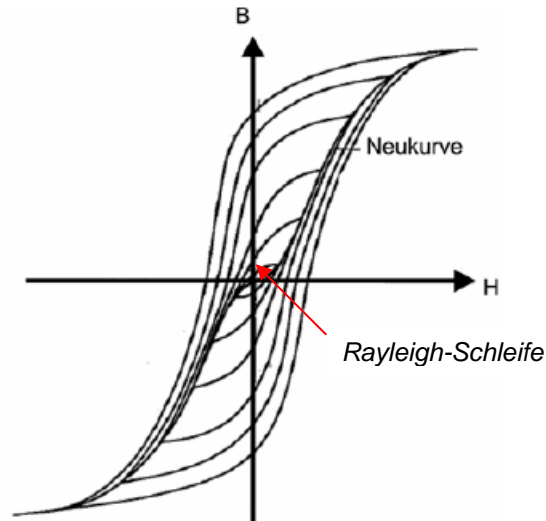


Abb. 10: Hystereseschleifen eines Ferromagnetikas bei zyklischer Magnetisierung mit wachsender Aussteuerung

Messtechnisch ermittelt man sie bei kleiner Aussteuerung im Wertebereich $(0,1 \dots 0,2) H_C$. Dann beschreibt die B-H-Kennlinie eine Lanzettenartige Schleife, die sogenannte **Rayleigh-Schleife** (vgl. Abb. 10). Aus der mittleren Steigerung dieser Hystereseschleife wird die Anfangspermeabilität μ_i mit Gl. (5):

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (H = (0,1 \dots 0,2) H_C) \quad (5)$$

ermittelt.

Die **Amplitudenpermeabilität** μ_a bestimmt man aus den Maximalwerten der Induktion B_{\max} und der magnetischen Feldstärke H_{\max} bei alternierender Aussteuerung ohne Vormagnetisierung nach Gl. (6):

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{\max}}{H_{\max}} \quad (6)$$

Sie wird auch als Wechselfeldpermeabilität bezeichnet und dient als Grundlage praktischer Berechnungen magnetischer Kreise mit Wechselstromerregung.

Die **differentielle Permeabilität** μ_d stellt den Anstieg der Hystereseurve im Arbeitspunkt nach Gl. (7) dar:

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH} \quad (7)$$

Bei sehr kleinen Wechselfeldaussteuerungen in einem Arbeitspunkt auf der Hystereseurve, der durch eine Gleichstromvormagnetisierung bestimmt wird, werden kleine Lanzetten förmige Hystereseschleifen durchfahren (s. Abb. 11).

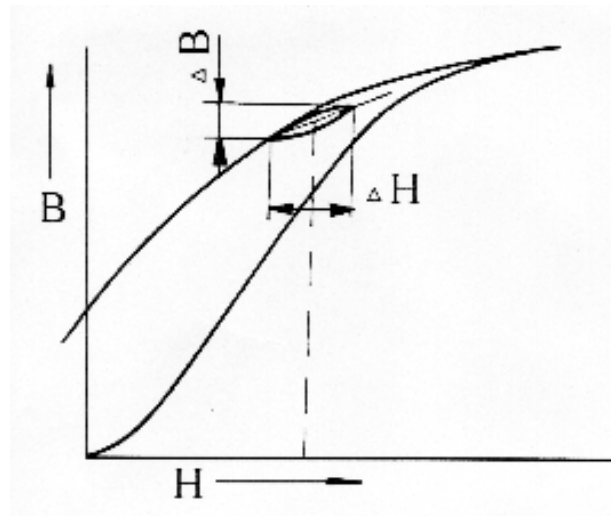


Abb. 11: Ermittlung

der reversiblen Permeabilität μ_{rev}

Aus ihrem mittleren Anstieg

$$\mu_{rev} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (8)$$

erhält man die **reversible Permeabilität** μ_{rev} .

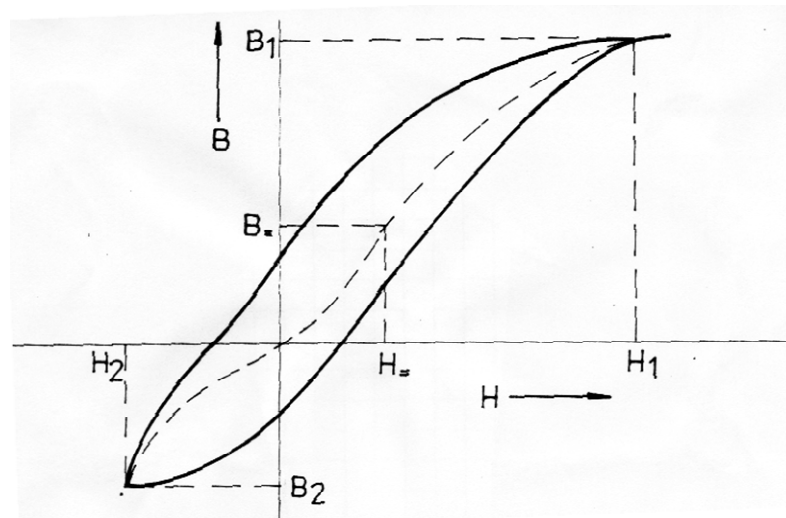
Liegt der Arbeitspunkt im 2. Quadranten der B-H-Kennlinie, so bezeichnet man den Anstieg als **permanente Permeabilität** μ_p .

Wird einer Vormagnetisierung ein größeres Wechselfeld überlagert, dann erfolgt eine unsymmetrische Aussteuerung der Hystereseurve (s. Abb. 12).

Als mittlere Permeabilität ergibt sich:

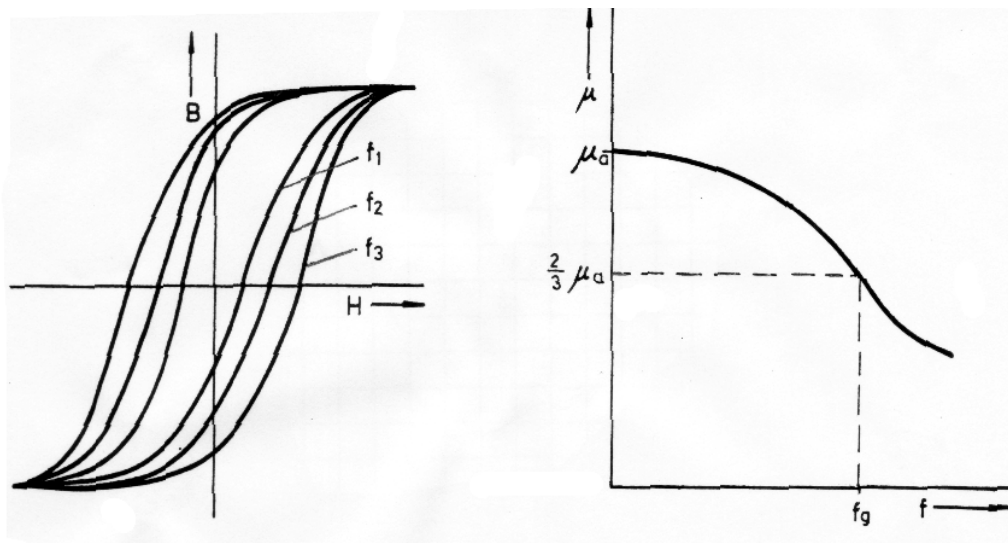
$$\mu_{\ddot{u}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{(B_1 - B_2)}{(H_1 - H_2)} \quad (9)$$

Man bezeichnet sie als **Überlagerungspermeabilität** $\mu_{\ddot{u}}$.

Abb. 12: Ermittlung der Überlagerungspermeabilität $\mu_{\ddot{u}}$

Die B-H-Kennlinie eines ferromagnetischen Stoffes ist weiterhin abhängig von der Frequenz f und der Temperatur ϑ

Die Frequenzabhängigkeit zeigt Abb. 13.

Abb. 13: Einfluss der Frequenz auf die Hystereseschleife und Permeabilität, ($f_3 > f_2 > f_1$)

Ursache für den Einfluss der Frequenz sind die sich ändernden **Ummagnetisierungsverluste**. Sie setzen sich zusammen aus **Hystereseverluste**, **Wirbelstromverluste** und **Zusatzverluste**.

Es gilt Gl.(10):

$$P_{vU} = P_{vh} + P_{vwb} + P_{vz} \quad (10)$$

wobei P_{vU} die Ummagnetisierungsverluste, P_{vh} die Hystereseverluste, P_{vwb} die Wirbelstromverluste und P_{vz} die Zusatzverluste bezeichnen.

Die Größe der von der Hystereseschleife eingeschlossenen Fläche ist, je nachdem wie sie aufgenommen wurde, proportional nur der Hystereseverlustrichte (statische Hysteresekurve) oder den gesamten Ummagnetisierungsverlusten pro Volumeneinheit (dynamische Hysteresekurve).

Oberhalb einer bestimmten Frequenz tritt bei allen magnetischen Werkstoffen ein deutlicher Abfall der Permeabilität auf.

Als **Grenzfrequenz f_g** charakterisiert man die Frequenz, bei der die Permeabilität auf 2/3 der Anfangspermeabilität μ_i gesunken ist.

Die Temperaturabhängigkeit geht auf die thermische Bewegung der Atome/Moleküle zurück. Bei $T = 0$ K erreicht man die höchste Sättigungsmagnetisierung. Mit zunehmender Temperatur verringert sich diese. Oberhalb der **Curie-Temperatur** verschwindet die Magnetisierung. Das Material verhält sich dann paramagnetisch. Man unterscheidet **reversible** und **irreversible** Temperatureinflüsse. Zur Berechnung geben die Magnetwerkstoffhersteller in den Datenunterlagen entsprechende **Temperaturkoeffizienten** an.

1.4. Ermittlung der Kennwerte

Die oben aufgeführten verschiedenen Kennwerte zur Eigenschaftsbeschreibung können messtechnisch nur **indirekt** über die Messung der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Feldstärke bestimmt werden. Dafür stehen verschiedene Messsonden und Messmethoden zur Verfügung.

Die **gebräuchlichsten Messsonden** sind Flussmesser, **Hall-Generatoren** und Förstersonden. Soll das magnetische Feld mit hoher Genauigkeit gemessen werden, arbeitet man mit **SQUID-Sensoren**.

Für die meisten ingenieurtechnischen Anwendungen ist es erforderlich, den Verlauf der gesamten B-H-Kennlinie (Hysteresekurve) eines magnetischen Werkstoffes zu bestimmen. Derartige Messungen führt man in einem geschlossenen Magnetkreis durch, der aus einem Magnetisierungsjoch (Messjoch) und der darin eingespannten Probe besteht. Solche kommerziellen Geräte werden als **Permagraph** bezeichnet.

Werden für werkstofflichen Untersuchungen die J-H-Kennlinien benötigt, werden **Vibrationsmagnetometer** verwendet. Sind weiterführende Strukturaufklärungen erforderlich, werden die Kernresonanzspektroskopie (NMR), die Mössbauer- oder Neutronenspektroskopie und/oder die Tunnelmikroskopie genutzt.

2. Versuchsaufbau/-anordnung

2.1. Gesamtdarstellung

- Magnetisierungsjoch (vgl. Abb. 14.)

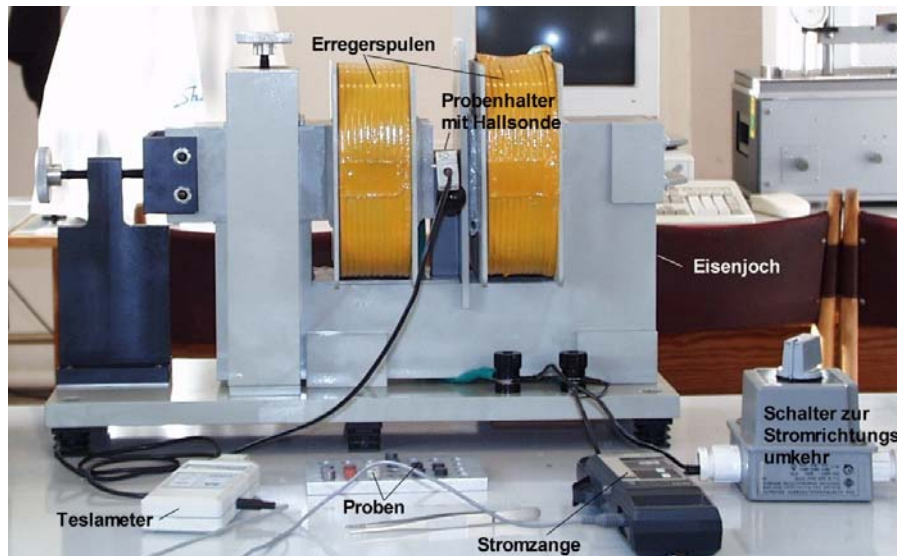


Abb. 14: Magnetisierungsjoch zur Ermittlung der B-H-Kennlinien

- Gleichstromversorgungsgerät (0...36V/0 ...40A) und Schalter zur Stromrichtungs umkehr,
- Stromzange (0 ... 10 ... 100 A) mit Analogausgang zur Messung des Spulenstromes,
- Teslameter mit Analogausgang und Probenhalter (mit integrierter Hallsonde) zur Messung der magnetischen Flussdichte B,
- A/D-Wandler und PC zur Aufnahme der Messreihen, aus denen die B-H-Kennlinien ermittelt werden können (**Bitte einen Datenwechselträger zum Übertragen der Messdaten mitbringen!**)

2.2. Technische Daten

- | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------------|-----------------|
| - Erregerwicklung-Windungszahl: | w_E | = 2 · 198 | |
| - max. Spulenstrom: | $I_{E,max}$ | = 25 | A |
| - Polfläche: | A_P | = (82,5 · 82,5) | mm ² |
| - mittlere Eisenlänge: | l_{Fe} | = (872- δ) | mm |
| - Luftspaltbreite: | δ | = 0 ... 40 | mm |

2.3. Probenmaterialien

- Abmessungen: \varnothing = 10 mm, Länge = 10 mm
- Material (Achtung: Zuordnung könnte vertauscht sein!):

Probennummer	Material
P1	allg. Baustahl, St 37-2, 1.0114, DIN 17006
P2	Reineisen, Hyperm 0 (RFe 80), DIN 17405
P3	Keramik Al ₂ O ₃
P4	Hexaferrit, HF 8/22, DIN 17410
P5	plastgebundener Ferrit, HF3/16p, DIN 17410
P6	Weichferrit

3. Versuchsaufgaben

- 3.1. Prüfen Sie die Übereinstimmung der Vorzeichen der Anzeigen der Messgeräte (Stromzange, Teslameter) mit den Pfeilrichtungen auf den Spulen des Magnetisierungsjoches (= positive Durchflutungsrichtung) und Schalterstellungen!
- 3.2. Ermitteln Sie mit dem Probenhalter ohne Probekörper und den eingestellten Polabstand $\delta = 20$ mm die Abhängigkeit $B_\delta = f(I)$ für $I = 0 \dots I_{\max}$.
- 3.3. Prüfen Sie den Restmagnetismus jedes Probenpaares bei offenem magnetischem Kreis und im Magnetisierungsjoch. Dazu sind die Probenteile eines Probenpaares in der gekennzeichneten Pfeilrichtung in den Probenhalter des Teslameters anzuordnen.
Dokumentieren Sie die gemessenen Flussdichten. Entmagnetisieren Sie dann die Proben im Magnetisierungsjoch durch iterative Einstellung der Koerzitivfeldstärke jH_C (Ausreichend entmagnetisiert bedeutet $|B| < 1$ mT).
- 3.4. Nach dem Entmagnetisieren des Probenpaares nehmen Sie zunächst die Messwerte für die Neukurve $B(H)$ über den A/D-Wandler und den bereitgestellten PC auf. Dazu ist nach Aktivierung des Messprogramms „Dagview“ (s. Anleitung am Versuchsplatz) der Erregerstrom langsam und gleichmäßig von Null bis zur maximalen Aussteuerung ($I_{E,\max} = 25$ A!) mit Hilfe des Stromreglers („grob“) am Stromversorgungsgerätes zu stellen. Danach reduzieren Sie den Strom wieder langsam und gleichmäßig bis auf Null. Bei $I_E = 0$ A schalten Sie den Schalter für die Stromrichtung von Stellung „1“ auf „2“ und erhöhen den Strom langsam und gleichmäßig von Null bis zur maximalen negativen Aussteuerung ($I_{E,\max} = -25$ A!). Unmittelbar danach können Sie den Strom wieder langsam und gleichmäßig auf Null stellen, bei Null umschalten und auf $+I_{E,\max}$ fahren, so dass Sie die vollständige Hysteresekurve aufgenommen haben.
Deaktivieren Sie die Messwertaufzeichnung von „Dagview“!
Kontrollieren Sie die Richtigkeit ihrer Messwerterfassung durch Import der Messdaten in MS Excel und entsprechender grafischen Darstellung. Bei unzureichenden Messpunktabständen oder erkennbaren Messfehlern wiederholen Sie die Messreihe!
- 3.4. Wiederholen Sie die Prozeduren von Aufgabe 3.3 und 3.4 für jedes Probenpaar.

4 Versuchsauswertung

- 4.1 Berechnen Sie aus den unter Pkt. 3.1. gemessenen Werten die $H_{\delta}(I)$ - Kennlinie des Magnetisierungsjoches. Stellen Sie die $B_{\delta}(I)$ und $H_{\delta}(I)$ grafisch dar. Machen Sie den Einfluss des Luftspaltes und des Eisenkerns deutlich! Diskutieren Sie den Einfluss des Eisens auf die Messgenauigkeit der Versuchsanordnung zur Bestimmung der B-H-Kennlinien der Proben!
- 14 Punkte**
- 4.2 Stellen Sie aus unter 3.4 gemessenen Messwerten die Neukurven aller Proben P1 - P6 in ein gemeinsames Diagramm dar. Bestimmen Sie die relativen Permeabilitäten μ_j , μ_a , und μ_d (bei $H = 50 \text{ kA/m}$) sowie die dazugehörigen Suszeptibilitäten χ_j , χ_a , und χ_d . Stellen Sie die Werte in einer Tabelle gegenüber!
- 26 Punkte**
- 4.3 Ordnen Sie die Proben P1 - P6 allein anhand der unter 4.2 ermittelten Neukurven und berechneten Permeabilitäten den Magnetismusarten zu. Begründen Sie Ihre Zuordnung!
- 12 Punkte**
- 4.4 Stellen Sie aus den unter 3.4 gemessenen Messwerten die Hysteresekurven aller Proben P1 - P6 in ein gemeinsames Diagramm dar. Entnehmen Sie daraus die Koerzitivfeldstärken B_{HC} und Remanenzinduktionen B_r !. Stellen Sie die Werte in einer Tabelle gegenüber! Diskutieren Sie die technische Bedeutung der Proben P1 - P6 anhand der ermittelten magnetischen Kennwerte!
- 24 Punkte**
- 4.5 Berechnen Sie die magnetischen Kennwerte B_{HC} und B_r der Probe P4 bei einer Temperaturerhöhung um 60 K? Wie ändert sich die B-H-Kennlinie der Probe P4? Welche Auswirkungen hat das für die Auslegung eines Permanentmagnetmotors? Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus für den Konstrukteur? Die Temperaturkoeffizienten für Hartferrite (P4) betragen:
 $\alpha(B_{HC}) = +0,001 \text{ K}^{-1}$ und $\alpha(B_r) = -0,002 \text{ K}^{-1}$.
- 12 Punkte**
- 4.6 Welche Verluste entstehen beim Einbringen von Werkstoffen der Proben P1 - P6 in ein Wechselfeld? Diskutieren Sie die Unterschiede! Berücksichtigen Sie dabei die unterschiedlichen elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Proben!

12 Punkte

Summe: 100 Punkte

5 Literatur

- /1/ Vorlesung Werkstoffe
- /2/ *Michalowsky, L.: Magnettechnik: Grundlagen und Anwendungen. Fachbuchverlag Leipzig-Köln, 1993*
- /3/ *Racho, R.; Kuklinski, P.; Krause, K.: Werkstoffe für die Elektrotechnik und Elektronik. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1985*
- /4/ *Reinboth, H.: Technologie und Anwendung magnetischer Werkstoffe. 3., überarb. und erg. Aufl., Verl. Technik, 1970*
- /5/ DIN 17410 Dauermagnetwerkstoffe, Mai 1977
- /6/ DIN 17405 Weichmagnetische Werkstoffe

6 Kontrollfragen

- 6.1 Beschreiben Sie 3 verschiedene Applikationen von magnetischen Werkstoffen hinsichtlich Prinzip/ Wirkungsweise und Anforderungen!
- 6.2 Erläutern Sie die atomistische Deutung des Magnetismus auf Basis des Bohrschen Atommodells!
- 6.3 Stellen Sie die Abhängigkeiten $B(H)$ von dia-, para- und ferromagnetischen Materialien qualitativ – aber relativ zur Abhängigkeit im Vakuum - in einem Diagramm dar, begründen Sie die Verläufe!
- 6.4 Was sind spontane Magnetisierungen, wo treten sie auf und welche Ursachen haben sie?
- 6.5 Was sind Domäne, Blochwände, Barkhausensprünge?
- 6.6 Stellen Sie die vollständige $B(H)$ -Kurve eines ferromagnetischen Materials dar, erläutern Sie den Verlauf und erklären Sie charakteristische Werte?
- 6.7 Was sind weichmagnetische und hartmagnetische Materialien?
- 6.8 Welcher Teil der vollständigen $B(H)$ -Kurve ist hinreichend, um die Eigenschaften von weichmagnetischen Materialien zu charakterisieren?
- 6.9 Welcher Teil der vollständigen $B(H)$ -Kurve ist hinreichend, um die Eigenschaften von hartmagnetischen Materialien zu charakterisieren?

- 6.10 Welche Eigenschaftskennwerte werden zur Beschreibung von weichmagnetischen Materialien verwendet?
- 6.11 Welche Eigenschaftskennwerte werden zur Beschreibung von hartmagnetischen Materialien verwendet?
- 6.12 Wie erhält man aus der $B(H)$ -Kurve die $J(H)$ -Abhängigkeit?
- 6.13 Was sind $J_H c$ und $B_H c$, was sagen sie aus, und wie ist das Größenverhältnis bei weich- und hartmagnetischen Materialien?
- 6.14 Welche Materialien kann man entmagnetisieren?
- 6.15 Erklären Sie mögliche zerstörungsfreie Entmagnetisierungsmethoden!
- 6.16 Erläutern Sie das Prinzip einer Hallsonde!
- 6.17 Stellen Sie allgemein den Verlauf des Zusammenhanges $B_\delta(I)$ eines elektrisch erregten magnetischen Kreises mit einem Luftspalt der Breite δ dar! Wann ist der Zusammenhang linear?
- 6.18 Mit welchen Materialien kann man magnetische Gleichfelder abschirmen und warum?
- 6.19 Mit welchen Materialien kann man magnetische Wechselfelder abschirmen und warum?
- 6.20 Welche Verluste entstehen in einem ferromagnetischen Material, wenn von einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld durchdrungen wird?

7 Versuchsverantwortlicher/ Kontakt

Dr.-Ing. Bernd Halbedel Arrheniusbau, Zi 216
Tel.: 03677 69 2784 Fax: 03677 69 3278
Email : bernd.halbedel@tu-ilmenau.de