

Grundpraktikum

Versuchsreihe: Materialwissenschaft

Magnetismus

B304

Stand 01.04.2018

Ziel:

Einführung in die Theorie des Magnetismus, "Sichtbarmachen" inhomogener magnetischer Felder an der Oberfläche eines Ferromagneten und oszilloskopische Aufzeichnung der Hysteresekurven verschiedener ferromagnetischer Materialien

Inhalt

1 Einleitung

2 Grundlagen des Magnetismus

2.1 Magnetische Ordnung

2.2 Eigenschaften dia-, para-, ferro- und ferrimagnetischer Materialien

3 Ferromagnetische Materialien und Anwendungen

3.1 Magnetische Domänen und Blochwände

3.2 Ferromagnetische Hysteresekurven

3.3 Materialaspekte für Transformatorkerne

4 Bittertechnik

4.1 Versuchsprinzip

4.2 Durchführung

4.3 Auswertung

5 Oszilloskopische Aufnahme von Hysteresekurven

5.1 Versuchsprinzip.

5.2 Durchführung

5.3 Auswertung

5.3.1. Zusammenhang: Gemessene Spannungen - magnetische Größen

5.3.2. Erstellung der Hysteresekurven

1 Einleitung

Zur Theorie

In dieser Anleitung werden wichtige Grundlagen des Magnetismus angesprochen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf dem Verständnis des Ferromagnetismus. Schulwissen aus der Physik bzw. Elektrotechnik wird vorausgesetzt. Bei Unklarheiten muss das fehlende Wissen VOR VERSUCHSBEGINN nachgeholt werden (Lehrbücher, Vorlesungsskripte)

Zur Praxis

Der Versuch besteht aus zwei Teilen und befasst sich ausschließlich mit verschiedenen ferromagnetischen Materialien:

- Mithilfe der **Bitter-Technik** und eines Auflichtmikroskops wird das inhomogene Magnetfeld an der Oberfläche eines Transformatorblechs sichtbar gemacht.
- Weiterhin werden für ein AC-Signal der Strom auf der Primärseite und die sekundärseitige Spannung von Transformatoren mit unterschiedlichen Kernen gemessen. Anhand dieser Daten werden die magnetischen Hysteresekurven der Transformatorkerne als Teil der Versuchsauswertung zu Hause berechnet.

2 Grundlagen des Magnetismus

Alle Materialien besitzen magnetische Eigenschaften. Je nach Herkunft und Art der internen magnetischen Ordnung werden verschiedene Materialien z.B. als dia-, para-, ferro-, ferri- oder antiferromagnetisch bezeichnet.

Grundsätzlich sind ALLE Materialien diamagnetisch. Je nach elektronischer Struktur und Umgebungstemperatur können sie sich z.B. ZUSÄTZLICH para- bzw. ferromagnetisch verhalten. Ist dies der Fall, so kann der Diamagnetismus aufgrund seiner vergleichsweise geringen Effektgröße nicht mehr festgestellt werden. Er wird überlagert. Dies gilt insbesondere für den Ferro- und Ferrimagnetismus.

In diesem Abschnitt werden zunächst die Zusammenhänge der dia-, para-, ferro- und ferrimagnetischen Ordnung mit der elektronischen Struktur der jeweiligen Materialien behandelt. Weiterhin werden die wichtigsten typischen Materialeigenschaften aufgelistet.

2.1 Magnetische Ordnung

Die interne magnetische Ordnung bestimmt das Verhalten eines Materials beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes, d.h., ob es z.B. in das äußere Feld hineingezogen wird und dieses in seinem Inneren verstärkt oder abgestoßen wird und schwächend wirkt.

Magnetische Momente von Atomen und Ionen

Ob ein Atom ein permanentes (d.h. unabhängig von äußeren Bedingungen und unabhängig von zeitlichen Fluktuationen) magnetisches Gesamtmoment besitzt oder nicht, wird durch seine Elektronenkonfiguration bestimmt. Die Betonung liegt hier auf dem GESAMTmoment, denn sowohl die Bahnbewegung jedes Elektrons, als auch sein Spin rufen jeweils ein magnetisches Moment hervor. Im Fall von Eisen, Kobalt und Nickel dominiert das magnetische Spinnmoment. Ein permanentes atomares Gesamtmoment besteht NUR in den Atomen, in denen ein Elektron und damit ein Spin ungepaart ist.

Magnetische Ordnung - ohne Einfluss eines äußeren Magnetfeldes

Besitzen die Atome eines Materials kein permanentes magnetisches Gesamtmoment, so kann auch keine magnetische Ordnung existieren. Sind diese jedoch vorhanden, so entscheidet neben der Umgebungstemperatur die Wechselwirkung zwischen den atomaren Momenten im Festkörper über deren Ordnung. Diese Wechselwirkung konkurriert mit der Entropie (Unordnung), die mit steigender Temperatur energetisch zunehmend bevorzugt wird. Dies

bedeutet, dass einige Materialien mit schwachen magnetischen Wechselwirkungen bei gegebener Temperatur keine Ordnung besitzen, während andere mit starker Wechselwirkung eine solche aufweisen können. Steigt die Temperatur nun, so wird auch das Material mit starken Wechselwirkungen ab einer bestimmten kritischen Temperatur diese Ordnung verlieren. Diese kritische Temperatur ist materialspezifisch und wird für ferromagnetische Materialien als Curie-Temperatur T_c bezeichnet.

Die magnetische Ordnung, die im praktischen Teil dieses Versuches ausgenutzt wird, ist die ferro- und ferrimagnetische. Bei beiden Arten des geordneten Magnetismus existiert eine sogenannte spontane Magnetisierung.

Magnetische Ordnung - unter Einfluss eines äußeren Magnetfeldes

Ein äußeres Magnetfeld H beeinflusst die Magnetisierung M des Materials. Die Magnetisierung ist eine richtungsabhängige Größe. Teilt man die Summe der Vektorkomponenten aller magnetischer Momente, die in Feldrichtung weisen, durch das betrachtete Volumen, so erhält man die Magnetisierung in Feldrichtung. Sie wird angegeben in Ampere pro Meter. Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, so verändert sich die Anzahl der Momente, die in diese Richtung weisen, d.h. die Magnetisierung in Feldrichtung wird beeinflusst.

Wirkt ein äußeres Magnetfeld, so werden in JEDEM Material magnetische Momente induziert, die zuvor noch nicht vorhanden waren. Durch das äußere Feld werden die Rotationsachsen der Elektronenbahnen zu Präzessionsbewegungen angeregt und somit entstehen Kreisströme. Nach der Lenzschen Regel sind die dabei entstehenden Momente dem äußeren Feld entgegengerichtet und schwächen dieses Feld im Inneren des Materials ab. Dieses Verhalten nennt sich diamagnetisch und es wird von JEDEM Material gezeigt (denn sie alle besitzen Atome mit Elektronen). Für diamagnetische Materialien nimmt die Magnetisierung beim Anlegen eines äußeren Feldes in Feldrichtung ab. Das Material hat eine negative Suszeptibilität χ . Diese Abnahme ist linear zur magnetischen Feldstärke.

Sind zusätzlich bereits permanente atomare Momente vorhanden, so werden die bereits vorhandenen magnetische Momente in Richtung des äußeren Feldes ausgerichtet. Demzufolge nimmt die Magnetisierung in Feldrichtung zu. Das Material hat eine positive Suszeptibilität χ . Werden zuvor chaotisch verteilte Momente mit zunehmender Feldstärke zunehmend in Feldrichtung ausgerichtet, so nimmt die Magnetisierung linear zu. Dies ist paramagnetisches Verhalten. Werden nun bereits spontan ausgerichtete Momente durch ein äußeres Feld beeinflusst, so kommt es in Ferromagneten zu einer starken und nicht linearen Erhöhung der Magnetisierung (siehe Hysteresekurve in Abschnitt 3).

2.2 Eigenschaften dia-, para-, ferro- und ferrimagnetischer Materialien

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften und Unterschiede zwischen verschiedenen Klassen magnetischer Materialien in den **Tabellen 1 bis 4** aufgelistet. Die Suszeptibilität χ beschreibt die Steigung der Magnetisierungskurve (Magnetisierung M gegen äußere Feldstärke H aufgetragen).

Diamagnetische Materialien	
Permanentes magn. Moment	nein
Interne atomare Wechselwirkung	nein
Spontane Magnetisierung	nein
Antwort auf äußeres Magnetfeld	kleine Ströme (und damit kleine magnetische Momente) werden induziert, da die Orbitalbahnen der Elektronen durch das Feld leicht verändert werden, die induzierten Momente wirken dem Feld entgegen
Temperaturabhängigkeit	nein
Suszeptibilität χ	$\chi \approx 0, \chi < 0$, konstant

Typische Vertreter	alle Elemente mit gefüllten Elektronenschalen
--------------------	---

Tab. 1: Übersicht der wichtigsten Eigenschaften diamagnetischer Materialien

Paramagnetische Materialien	
Permanentes magn. Moment	ja
Interne atomare Wechselwirkung	schwach
Spontane Magnetisierung	nein, ungeordnete magnetische Struktur, fluktuiert zeitlich
Antwort auf äußeres Magnetfeld	im Mittel geringe Ausrichtung in Feldrichtung
Temperaturabhängigkeit	schwach
Suszeptibilität χ	$\chi \approx 0$, $\chi > 0$, konstant
Typische Vertreter (bei Raumtemperatur)	Mn, Al, Pt, O ₂ , Ionen der seltenen Erden, ...

Tab. 2: Übersicht der wichtigsten Eigenschaften paramagnetischer Materialien

Ferromagnetische Materialien	
Permanentes magn. Moment	Ja
Interne atomare Wechselwirkung	stark
Spontane Magnetisierung	ja, zeitlich stabil
Antwort auf äußeres Magnetfeld	mit dem Feld Ausrichtung, bis alle Momente vollständig in Feldrichtung weisen, damit auch Veränderung der vorherigen magnetischen Struktur (magnetische Domänen)
Temperaturabhängigkeit	Ja, Sättigungsmagnetisierung M_S sinkt mit T , oberhalb der Curie-Temperatur T_c paramagnetisch
Suszeptibilität χ	$\chi \gg 0$, nicht konstant, Funktion von H und magnetischer Vorgeschichte \rightarrow Hysterese
Typische Vertreter	Fe, Co, Ni

Tab. 3: Übersicht der wichtigsten Eigenschaften ferromagnetischer Materialien

Ferrimagnetische Materialien	
Permanentes magn. Moment	Ja
Interne atomare Wechselwirkung	stark
Spontane Magnetisierung	ja, zeitlich stabil
Antwort auf äußeres Magnetfeld	mit dem Feld Ausrichtung, bis alle Momente vollständig in Feldrichtung weisen, damit auch Veränderung der vorherigen magnetischen Struktur (magnetische Domänen)
Temperaturabhängigkeit	Ja, Sättigungsmagnetisierung M_S sinkt grundsätzlich mit T , oberhalb der Néel-Temperatur T_N paramagnetisch
Suszeptibilität χ	$\chi \gg 0$, nicht konstant, Funktion von H und magnetischer Vorgeschichte \rightarrow Hysterese
Typische Vertreter	Fe ₃ O ₄ , Ba-Ferrit

Tab. 4: Übersicht der wichtigsten Eigenschaften ferrimagnetischer Materialien

3 Ferromagnetische Materialien und Anwendungen

3.1 Magnetische Domänen und Blochwände

In Ferromagneten bilden sich unterhalb der Curie-Temperatur Bereiche mit paralleler Ausrichtung der magnetischen Momente aus. Diese werden als magnetische Domänen bezeichnet. Die Grenze zwischen diesen Bereichen wird magnetische Domänenwand genannt. **Abb. 2** zeigt die Rotation der atomaren magnetischen Momente in einer 180°-Blochwand. Blochwände erstrecken sich über 40 bis 10^4 Atome (einige 10 nm bis mehrere μm) [2]. Ihre Ausdehnung wird im Wesentlichen durch zwei konkurrierende Energiebeiträge bestimmt: Die Austauschenergie zwischen den Atomen begünstigt die Parallelausrichtung der magnetischen Momente und damit einen möglichst langsamen Wechsel der Magnetisierungsrichtung von einem Atom zum nächsten. Der Anisotropieenergiebeitrag ist hingegen minimiert im Fall eines abrupten Wechsels der Ausrichtung zwischen zwei benachbarten Domänen. Das Ergebnis ist eine stufenweise Rotation der Ausrichtung von Atom zu Atom (siehe **Abb. 2**).

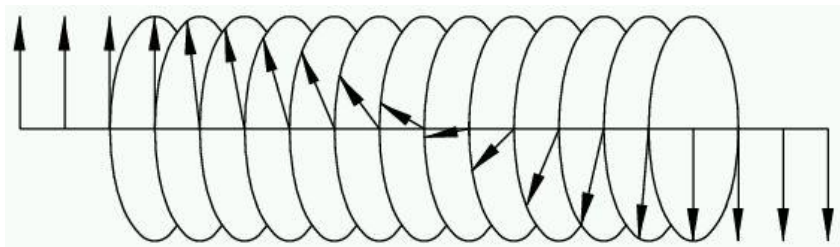


Abb. 2: Rotation der atomaren magnetischen Momente in einer 180 °-Blochwand [3].

Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, so verändern sich zunächst die Größe der Domänen und die Ausrichtung der Magnetisierung innerhalb der magnetischen Domänen. Diese mikroskopischen Vorgänge beeinflussen direkt die effektive Magnetisierung des Materials und damit auch die Form der ferromagnetischen Hysteresekurve.

3.2 Ferromagnetische Hysteresekurven

Allgemein

Zeigt eine Materialgröße eine hysteretische Abhängigkeit von der treibenden Kraft, so finden verlustbehaftete, irreversible Prozesse statt. D.h., nachdem das Material diesen Prozess durchlaufen hat, wird eine entgegengesetzte Kraft benötigt, um das Material wieder in seinen Ausgangszustand zu überführen. Die Fläche innerhalb der Hystereseschleife ist dabei ein Maß für die Arbeit, die benötigt wird, um das Material vom einen Endzustand in den anderen zu bringen.

Ferromagnetische Hysteresekurve (ferrimagnetische Hysteresekurve)

Abb. 3 zeigt eine Schemazeichnung einer ferromagnetischen Hysteresekurve.

Zwischen der magnetischen Feldstärke H (Angabe in Ampere pro Meter) und der magnetischen Induktion B (Angabe in Tesla) bestehen folgende Zusammenhänge:

$$B = \mu_0 (M + H) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

mit μ_0 - Permeabilität des Vakuums [$4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am]

μ_r - relative Permeabilität (materialspezifisch und dimensionslos)

M - Magnetisierung [A/m]

χ - Suszeptibilität (dimensionslos)

Wie man anhand von Abb.3 erkennen kann, ist der Zusammenhang zwischen H und B relativ komplex. Im Gegensatz zu μ_0 ist μ_r keine Konstante (sonst wäre die Hysteresekurve linear), sondern abhängig von H sowie dessen vorherigen Verlauf.

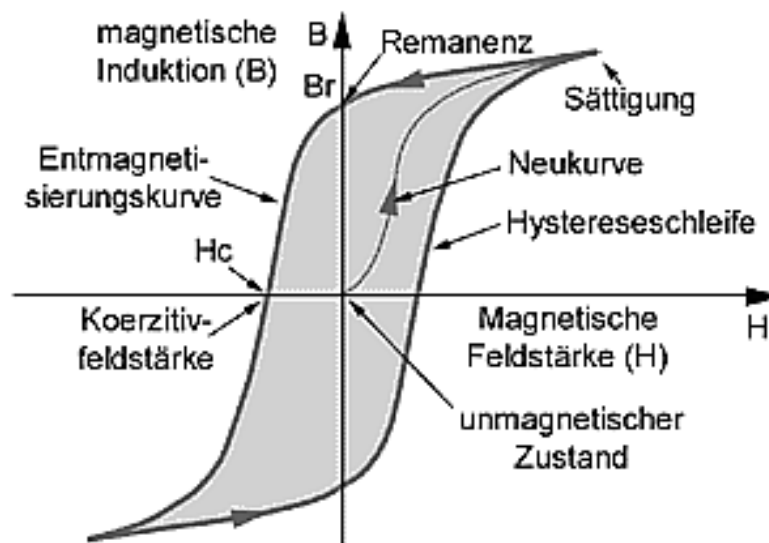


Abb. 3: Schema einer ferromagnetischen Hysteresekurve [1].

In **Abb. 4** werden die strukturellen Veränderungen der magnetischen Domänen dargestellt, die während einer Magnetisierung entlang der Neukurve auftreten können.

- Im Nullpunkt:** Die Ausrichtung der Magnetisierung in den magnetischen Domänen ist zufällig verteilt und die Magnetisierung hebt sich nach außen auf. Es ist deshalb von außen keine Magnetisierung messbar.
- Geringe Steigung der Magnetisierungskurve:** Die Bezirke, die günstig zum äußeren Feld ausgerichtet sind, wachsen zugunsten anderer. Dieser Prozess ist mit einer Verschiebung der Domänenwände verbunden. Dies geschieht zunächst reversibel. Defekte im Material erschweren bzw. verhindern dabei z.B. die Blochwandverschiebung. Ab einer kritischen Feldstärke können die Wände diese Hindernisse überwinden und die Steigung der Kurve nimmt abrupt zu. Dieser Prozess ist nun irreversibel, d.h., es muss wieder Energie ins System gebracht werden, um ihn rückgängig zu machen und die Blochwände ein zweites Mal über die Defekte zu bewegen.
- Es ist nur noch eine Domäne vorhanden, dessen Ausrichtung der Feldrichtung am nächsten kommt. Die Magnetisierung ist entlang einer sogenannten leichten Richtung orientiert.
- Im letzten Schritt findet eine **Rotation der magnetischen Momente** statt. Nun sind ALLE Momente in Feldrichtung ausgerichtet und das Material befindet sich in Sättigung. Ein weiterer Anstieg der Magnetisierung M ist nicht mehr möglich. Jedoch steigt M immer noch mit H an (siehe Gl. 1).

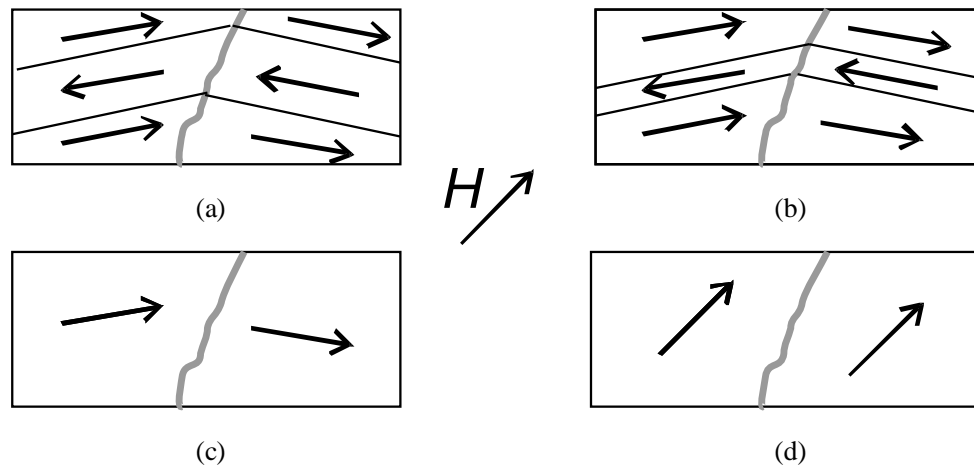


Abb. 4: Ferromagnet im äußeren Magnetfeld H . Die Pfeile im Material weisen in Richtung der magnetischen Momente einer magnetischen Domäne. Eine Korngrenze ist in der Mitte des Materials skizziert. Die Bezirke werden von sogenannten Blochwänden voneinander getrennt. Die Bilder (a) bis (d) repräsentieren die sich verändernde Struktur der Bezirke während die Magnetisierung eine Neukurve durchläuft. D. h., von (a) nach (d) nimmt die Feldstärke kontinuierlich zu.

3.3 Materialaspekte für Transformatorkerne

Die Gestalt der Hysteresekurve spielt eine entscheidende Rolle bei der Frage nach den Anwendungsmöglichkeiten ferromagnetischer Materialien [4]. Für den Transformatorbau verwendet man Kerne mit möglichst schlanker Hysteresekurve (geringe Koerzitivfeldstärke), um die Ummagnetisierungsverluste zu minimieren. Eine hohe Permeabilität reduziert die Anzahl der nötigen Wicklungen auf der Sekundärseite und damit die dort auftretenden Kupferverluste. Bei Transformatorenkernen können neben den Hystereseverlusten Wirbelstromverluste auftreten. Wirbelströme sind ringförmige Ströme innerhalb eines Leiters, die durch die zeitliche Änderung der magnetischen Induktion B in dem Material induziert werden. Diese Ströme erwärmen den Kern und entziehen damit dem Wechselstromkreis Energie. Die Ausbildung von starken Wirbelströmen in elektrisch leitenden Kernmaterialien kann vermieden werden, indem der Kern aus vielen dünnen, elektrisch voneinander isolierten Blechen aufgebaut wird. Durch die Verwendung von nichtleitenden Ferrimagnetika (Ferrite) können Wirbelstromverluste nahezu ausgeschlossen werden.

4 Bittertechnik

4.1 Versuchsprinzip

An einer polierten Oberfläche eines ferromagnetischen Stoffes können manche Domänenwände nach einem **Verfahren von Bitter** sichtbar gemacht werden. Schneidet die Oberfläche die Begrenzung unterschiedlich zueinander orientierter Domänen, so können sich lokale Feldgradienten an der Oberfläche bilden. Wegen der räumlichen Nähe der unterschiedlichen Orientierungen können diese Feldgradienten sehr stark sein. Überschichtet man die Oberfläche des Materials mit einer Suspension kolloidaler ferromagnetischer Teilchen, so setzen sich diese unter anderem an den magnetischen Domänenwänden ab und markieren diese als **Bitter-Streifen**.

4.2 Durchführung

Für diesen Teil des Versuchs steht Ihnen eine Probe aus technischem Eisen zur Verfügung, deren polierte Oberfläche mit einem Ferrofluid zu benetzen ist. Über die am Mikroskop angebrachte Kamera sollen sechs Bilder mit einem Objektiv mit 20-facher Vergrößerung aufgenommen werden, davon eines ohne Ferrofluid und 5 an unterschiedlichen Stellen der Probenoberfläche.

4.3 Auswertung

- Bereiten Sie Bilder eventuell durch Verwendung geeigneter Software auf, um Strukturen und Details besser sichtbar zu machen.
- Beschreiben Sie unter Angabe der Maße die Gestalt der Anordnung dessen, was Sie sehen.
- Interpretieren Sie: Was verursacht vermutlich das, was Sie sehen? Um was könnte es sich im Einzelfall handeln (Staub, Kratzer, Ferriteilchen auf Domänenwänden, Korngrenzen,...)? Begründen Sie!
- Glauben Sie, dass Sie alle Domänenwände an der Oberfläche des Materials sehen? Begründen Sie Ihre Antwort.

5 Oszilloskopische Aufnahme von Hysteresekurven

5.1 Versuchsprinzip.

Vor Versuchsbeginn sind zum Verständnis des Versuchsprinzips folgende, grundlegende Fragen vorzubereiten:

- Aufgrund welcher physikalischer Prinzipien funktioniert ein Transformator?
- Warum kann ein ferromagnetisches Material dadurch charakterisiert werden, dass es als Kern eines Transformatoraufbaus verwendet wird?

5.2 Durchführung

Mit dem Signalgenerator wird ein geeignetes Wechselspannungssignal erzeugt und durch Verbinden des Ausgangs mit dem Verstärker auf der Rückseite des Geräts verbunden. Das verstärkte Signal wird über den Messwiderstand mit der Primärseite verbunden. Die Spannung über dem Widerstand wird mit dem Kanal 1 (CH1) des Oszilloskops gemessen. Dabei ist auf den korrekten Anschluss der Masse (Außenleiter) zu achten. Die Sekundärseite des Transformators wird mit einem Operationsverstärker in Intergratorbeschlaltung verbunden, dessen Ausgang mit CH2 des Oszilloskops. Zur Synchronisation von Oszilloskop und Frequenzgenerator werden die beiden Geräte über "Sync" verbunden.

Achten Sie darauf, den Ausgang des Signalgenerators erst dann mit dem Verstärker zu verbinden, nachdem das Gerät eingeschaltet und sinnvolle Parameter eingestellt sind.

Für die Messung stehen Ihnen zwei Transformatorkerne der Firma Vacuumschmelze GmbH & Co. KG zur Verfügung. In Tabelle 5 werden die zur späteren Berechnung benötigten Daten der unterschiedlichen Kerne aufgelistet.

Tabelle 5: Daten der gemessenen Transformatorkerne

	l_m [mm]	A [mm ²]	$n_{\text{primär}}$	$n_{\text{sekundär}}$
Vitroperm 580 E	51,1	30	5	5
Vitrovac 6030	53,4	13	12	6

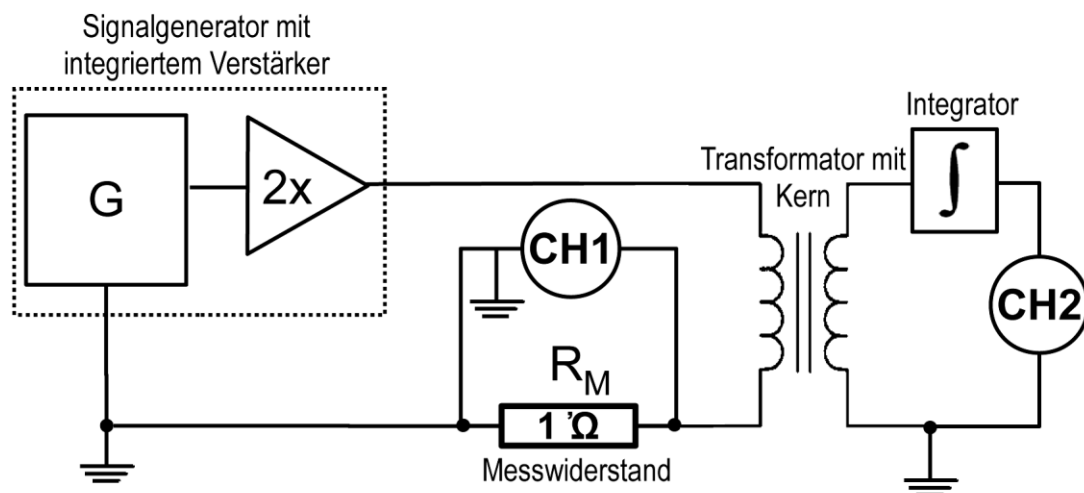


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Aufnahme der Hysteresekurve

5.3 Auswertung

- Erstellen Sie die Hysteresekurven aus den aufgenommenen Daten (siehe Abschnitt 5.3.2.).
 - Beschreiben Sie Ihr Vorgehen bei der Erstellung der Hysteresekurven kurz mit eigenen Worten.
 - Fügen Sie einen exemplarischen Ausschnitt einer Berechnungstabelle mit Spaltenbezeichnungen und Legende in den Protokollanhang!
 - Bestimmen Sie grafisch die maximale Permeabilität der Kerne durch Approximation der Kurve im geeigneten Punkt durch eine Gerade.
 - Erstellen Sie eine Tabelle, in der Sie die Kenndaten Ihrer Hysteresekurven in SI-Einheiten auflisten.
 - Nehmen Sie eine wissenschaftliche Beurteilung Ihrer Ergebnisse vor. Machen die von Ihnen abgelesenen Kenndaten Sinn? Bemühen Sie sich dazu um Vergleiche mit Literaturangaben zu der entsprechenden Materialklasse. (Stimmt die Größenordnung?)
- Beschreiben Sie die Form der Hysteresekurven der Kernmaterialien (Abbildungen in den Anhang) qualitativ und deren frequenz- und amplitudenabhängige Änderung. Begründen Sie dieses Materialverhalten mithilfe der Theorie. Wenn nötig, nehmen Sie hierzu zusätzliche Literatur zur Hilfe.
- Wie würde die entsprechende M(H)-Kurve aussehen?
- Identifizieren Sie die Kernmaterialien (weich/hart, ggf. entlang/quer zur Bandrichtung behandelt) und vergleichen Sie die Eigenschaften der verschiedenen Kernmaterialien. Beschreiben Sie hierbei die Unterschiede im Materialaufbau, die das unterschiedliche magnetische Verhalten begründen.
- Geben Sie technische Anwendungsmöglichkeiten der jeweiligen Kerne an.
- Zur Darstellung von Unterschieden zwischen verschiedenen Hysteresekurven bietet sich gegebenenfalls auch die gemeinsame Darstellung innerhalb eines Diagramms an.

5.3.1. Zusammenhang: Gemessene Spannungen - magnetische Größen

Mithilfe der Induktionsgesetze kann aus der sekundärseitig induzierten Spannung U_2 die magnetische Induktion wie folgt bestimmt werden:

$$U_2 = -n_{\text{sek}} A \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

mit n_{sek} : Anzahl der Sekundärwicklungen, A: Querschnittsfläche des Kerns

Nach Umstellen und Integrieren der Gleichung erhält man daraus:

$$B = -\frac{1}{n_{\text{sek}} A} \int U_2 dt \quad (3)$$

Die Feldstärke H der Primärspule kann über den Induktionsstrom I errechnet werden, dabei gibt l_m die mittlere magnetische Weglänge des umwickelten Kerns an:

$$H = \frac{n_{\text{prim}} I_1}{l_m}, \quad (4)$$

mit n_{sek} : Anzahl der Sekundärwicklungen.

5.3.2. Erstellung der Hysteresekurven

Gehen Sie bei der Erstellung der Hysteresekurven bitte folgendermaßen vor:

In dem Ordner jeder Messung befinden sich zwei Textdateien mit der Endung “csv“ sowie ein Screenshot des Oszilloskops. Importieren Sie die Textdateien in ein Programm zur Tabellenkalkulation und achten Sie dabei besonders auf die korrekte Interpretation der Dezimaltrennzeichen. Jeweils die erste Spalte der Dateien enthält die Zeit in Sekunden, die zweite Spalte die jeweiligen Spannungswerte in Volt. Nun lassen sich mit den folgenden zwei Gleichungen H und B aus den Messdaten berechnen. V ist dabei die Verstärkung des Integrators. Die Verstärkung beträgt $V = 9100 \text{ s}^{-1}$ in Stellung Mitte.

$$B = -\frac{U_{CH2}}{n_{sek} A \cdot V} \quad (5)$$

$$H = \frac{n_{prim}}{l_m} \left(\frac{U_{CH1}}{R_M} \right) \quad (6)$$

6 Literaturempfehlung

- http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/
- R. C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials - Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2000
- <http://www.vacuumschmelze.de/de/produkte/halbzeug-teile/weichmagnetisch/amorph-nanokristallin/vitrovac/eigenschaften-der-amorphen-co-basis-werkstoffe-mit-f-charakteristik.html>
- <http://www.vacuumschmelze.de/de/produkte/halbzeug-teile/weichmagnetisch/amorph-nanokristallin/vitrovac/eigenschaften-der-amorphen-co-basis-werkstoffe-mit-z-charakteristik.html>
- D. Meschede, *Gerthsen Physik*, Springer, 2003

7 Quellenangaben

- [1] <http://www.phyta.net/images5/hysterese01.gif>
- [2] R. C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials - Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2000
- [3] <http://www.anphy.uni-duesseldorf.de/veroff/Diplome/Volker.Solinus/node3.phtml>
- [4] Hornbogen, Eggeler, & Werner. *Werkstoffe- Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. Springer, 2008