

Versuch 20: Transformator und Ferromagnetische Hysterese

Es werden die Hysteresekurven verschiedener ferromagnetischer Materialien aufgezeichnet und miteinander verglichen. Hierbei werden im speziellen die Eigenschaften des (idealen und realen) Transformators untersucht. Anhand der Hysteresekurven kann die Sättigungsinduktion, die Remanenz, und die Koerzitivfeldstärke bestimmt werden. Außerdem werden die Anfangs- und Maximalpermeabilität ferromagnetischer Stoffe gemessen.

Literatur

Eine detaillierte Beschreibung findet man z.B. im Buch von D. Meschede, Gerthsen Physik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

Vorkenntnisse

magnetische Flussdichte \vec{B} - magnetische Feldstärke \vec{H} - Induktionsgesetz - Durchflutung - Magnetisierung \vec{M} - magnetische Suszeptibilität χ - Permeabilität μ - magnetisches Moment \vec{m} - Diamagnetismus - Paramagnetismus - Curie-Gesetz - Ferromagnetismus - Antiferromagnetismus - Ferrimagnetismus - Curie-Weiß Gesetz - spontane Magnetisierung - Domänen - Blochwände - Entmagnetisierungsfeld - Hysterese - Stetigkeit von \vec{B} und \vec{H} an Grenzflächen - Magnetfelder von Spulen - idealer und realer Transformator

Physikalische Grundlagen

Wird ein Stoff einem Feld \vec{H} ausgesetzt, so werden im Stoff vorhandene magnetische Momente \vec{m} ausgerichtet, beziehungsweise magnetische Momente induziert, was eine makroskopische Magnetisierung \vec{M} des Stoffes bewirkt, welche dem angelegten Feld proportional ist:

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad \text{mit} \quad \chi : \text{Suszeptibilität} \quad (1)$$

Dadurch folgt für die Flussdichte \vec{B} :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (2)$$

mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

Einheiten: $[\vec{B}] = 1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ T}$ (Tesla) $[\vec{H}] = 1 \text{ A/m}$.

Für die Umrechnung cgs- auf SI-System gilt: $1 \text{ Oe} = 1000/(4\pi) \text{ A/m}$ und $1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ Vs/m}^2$.

Induktion und Durchflutung

Nach dem *Induktionsgesetz* ist die in n Windungen induzierte Spannung U_{ind} der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses Φ proportional:

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Dabei wird unter Φ das Integral

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B_{\perp} dA \quad (4)$$

verstanden, wobei A die durchflossene Fläche einer Leiterschleife bedeutet und B_{\perp} die senkrecht zu dieser Fläche stehende Komponente der magnetischen Induktion ist. Aus dem *Durchflutungsgesetz* vom Ampère ergibt sich für eine auf einen ferromagnetischen, *ringförmigen* Kern gewickelte Spule von n Windungen die magnetische Feldstärke

$$H = |\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{l} \quad (5)$$

Hierbei ist I der Spulenstrom und l die mittlere Länge der Feldlinien im Kern. Ändert sich I zeitlich, so erscheint bei konstanter Permeabilität an den Enden der Spule die Spannung U_L :

$$U_L = n^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{l} \frac{dI}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad \text{mit} \quad L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{l} \cdot n^2 \quad (6)$$

Der „Selbstinduktionskoeffizient“ L stellt eine Spuleneigenschaft dar. Die Verwendung des ferromagnetischen Kerns erhöht L wegen des sehr großen Zahlenwertes von μ_r beträchtlich. (Man beachte, dass in diesem Beispiel die Fläche einer Spulenwicklung A senkrecht von B durchdrungen wird.)

Bemerkung: Der Wechselstromwiderstand einer Spule mit dem Selbstinduktionskoeffizienten L ist $R_L = \omega \cdot L$ mit $\omega = 2\pi f$. Er steigt also proportional mit der Frequenz f des Wechselstroms. Diese Eigenschaft der Spule benutzt man, um Wechselströme von Gleichströmen zu trennen, da der Gleichstromwiderstand der Spule nahezu konstant ist und auch viel kleiner gehalten werden kann als ihr Wechselstromwiderstand.

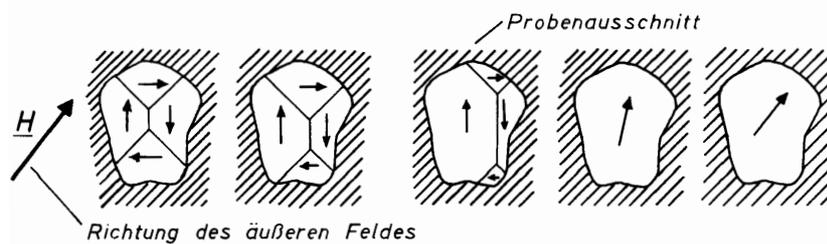
Magnetisch geordnete Zustände, Ferromagnetismus

Fügt man Atome, die bereits ein magnetisches Moment \vec{m} besitzen (Paramagneten) zu einem Festkörper (kristallin oder amorph) zusammen, so wechselwirken die magnetischen Momente mit ihren Nachbarmomenten. Diese gegenseitige Beeinflussung bewirkt, dass Gleichung 1 keine globale Gültigkeit mehr besitzt. Stattdessen wird \vec{M} zu einer komplizierten Funktion von \vec{H} . Es ergibt sich eine *Hysteresekurve*.

Ferromagnetische Festkörper

Durch die *parallele Spinausrichtung* der atomaren Momente gibt es lokale Bereiche (*Domänen*) konstanter Magnetisierung. Für den gesamten Körper ist jedoch bei Fehlen eines äußeren Feldes der unmagnetisierte Zustand der energetisch günstigste. Die Magnetisierungsrichtung der einzelnen Domänen unterscheiden sich daher, so dass der Körper nach außen hin unmagnetisiert erscheint. Die Bereiche gleicher Magnetisierungsrichtung werden von *Blochwänden* begrenzt, in denen sich die Magnetisierungsrichtung über 100 bis 1000 Atomabstände hinweg in die Richtung des Nachbarbereichs dreht.

Der Magnetisierungsprozess bei ferromagnetischen Stoffen

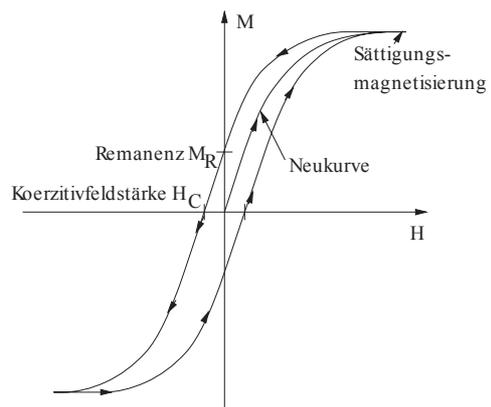


Bei Anlegen eines Magnetfeldes an einen ferromagnetischen Stoff (z. B. Fe) werden zunächst die Bereiche, deren Magnetisierungsrichtungen schon teilweise in die Richtung des äußeren Magnetfeldes zeigt, auf Kosten der Nachbarbereiche vergrößert. Dies geschieht durch reversible und irreversible Bewegungen der Blochwände. Nach Abschluß der Wandbewegungen wird die Magnetisierungsrichtung in die Richtung des äußeren Feldes gedreht.

Hysterese

Die Hysterese wird im Wesentlichen von der Behinderung der Blochwandbewegungen des ferromagnetischen Festkörpers verursacht.

Kehrt eine Blochwand nach Abschalten des äußeren Feldes \vec{H}_A nicht mehr in ihre Ausgangslage zurück, weil sie an einer anderen Stelle festgehalten wird, so resultiert daraus eine Restmagnetisierung, die *Remanenz*. Um die Blochwand von diesem Ort zu lösen und die Magnetisierung wieder zu Null zu machen, muss ein Feld in entgegengesetzter Richtung angelegt werden. Die Größe dieses Feldes nennt man *Koerzitivfeldstärke*. Da die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke durch Hindernisse für die Blochwandverschiebung bedingt sind, sind für ihre Größe neben Materialeigenschaften des verwendeten Stoffes auch die Herstellungsbedingungen des Festkörpers mit ausschlaggebend.



Misst man also \vec{M} als Funktion von \vec{H} bei einer ferromagnetischen Probe, so erhält man qualitativ immer einen Zusammenhang wie im Bild dargestellt.

Die Hysteresekurve ist zum Koordinatenursprung punktsymmetrisch. Die Neukurve und die bis zur Sättigung ausgesteuerte Hysteresekurve haben für jeden Werkstoff eine charakteristische Form.

Durch Angabe von Zahlenwerten der Sättigungsmagnetisierung \vec{M}_S , der Remanenz \vec{M}_R , der Koerzitivfeldstärke \vec{H}_C und der Anfangsuszeptibilität χ_A ist ein ferromagnetischer Stoff weitgehend charakterisiert. Man nennt diese Größen daher *Bestimmungsgrößen* der Hysteresekurve. Registriert man die Hysteresekurve mit Hilfe eines magnetischen Wechselfeldes, das nicht bis zur Sättigung ausreicht, so ergibt sich eine ebenfalls punktsymmetrische Hystereseschleife. Sie liegt vollständig innerhalb der bis zur Sättigung ausgesteuerten Schleife. Die Spitzen der nicht bis zur Sättigung ausgesteuerten Kurven liegen auf der sogenannten *Kommutierungskurve*, die für kleine Aussteuerungen praktisch mit der Neukurve zusammen fällt.

Das B - H -Diagramm

In den technischen Anwendungen interessiert die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte \vec{B} von der magnetischen Feldstärke \vec{H} . Die Beziehung zwischen dem B - H - und M - H -Diagramm sind durch die Gleichungen 1 und 2 gegeben. Die B - H -Kurve ist der M - H -Kurve sehr ähnlich. Man beachte jedoch die folgenden Unterschiede:

Für sehr große Feldstärken \vec{H} geht \vec{M} gegen $\vec{M}_S = \text{const}$, \vec{B} wächst hingegen mit \vec{H} linear weiter an. Die remanente magnetische Flussdichte ist mit der Remanenz im M - H -Diagramm verknüpft durch:

$$\vec{B}(\vec{H} = 0) = \mu_0 \cdot \vec{M}(\vec{H} = 0). \quad (7)$$

Definiert man im Falle des B - H -Diagramms die Koerzitivfeldstärke \vec{H}_C durch $\vec{B} = 0$ (und nicht durch $\vec{M} = 0$), so folgt für die Betrachtung im 1. Quadranten der Kurve:

$$\vec{H}_C + \vec{M} = 0 \quad (8)$$

d. h. bei $\vec{B} = 0$ muss $\vec{M} \neq 0$, und zwar in diesem Falle < 0 sein. Die beiden Definitionen der Koerzitivfeldstärke fallen also nicht zusammen.

$$\vec{H}_C(\vec{M} = 0) \neq \vec{H}_C(\vec{B} = 0) \quad (9)$$

Die Permeabilitätsdefinitionen

Der nicht lineare Zusammenhang zwischen \vec{B} und \vec{H} führte zu verschiedenen Definitionen der Permeabilität:

1. Differentielle Permeabilität:

Sie wird für jeden Punkt der Hystereseurve definiert als

$$\mu_0 \cdot \mu_{r,\text{diff}} = \frac{d|\vec{B}|}{d|\vec{H}|} \quad (10)$$

2. Anfangspermeabilität:

Hierunter wird die differentielle Permeabilität im entmagnetisierten Zustand, d. h. auf der Neukurve bei $\vec{H} = 0$ verstanden. Obige Definitionen gelten sinngemäß übertragen auch für die Suszeptibilitäten.

Technische Bedeutung der Hystereseurve

Beispiele der Anwendung ferromagnetischer Materialien sind: Permanentmagnete, Elektromagnete, Kerne von Transformatoren, Elektromotoren, Magnetplatten und Magnetbänder.

Je nach Anwendungszweck werden an die Hystereseurven unterschiedliche Anforderungen gestellt. *Permanentmagnete* weisen eine hohe Remanenz und Koerzitivfeldstärke auf. Hingegen besitzen *Elektromagnete* eine kleine Remanenz und eine hohe Sättigungsmagnetisierung. *Transformatoren* sollten möglichst schmale und steile Hystereseurve haben. Da der Flächeninhalt der Hystereseurve ein Maß für die Energie ist, die bei einer Ummagnetisierung des Materials als Wärme auftritt. Diese Energie stellt somit einen Verlust dar.

Das entmagnetisierende Feld, Scherung

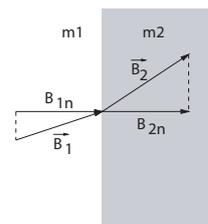
Auf einen geschlossenen ferromagnetischen Kern sei eine Spule gewickelt. Der durch diese Spule fließende Strom erzeugt ein Magnetfeld, welches wiederum das Kernmaterial magnetisiert. *Was ändert sich, wenn der ferromagnetische Kern nicht geschlossen ist?*

An den gegenüberliegenden Enden des offenen Kerns werden als Folge der Magnetisierung freie magnetische Pole entstehen. Diese erzeugen ein magnetisches Feld, welches sich dem primär angelegten überlagert ist, das sogenannte *Entmagnetisierungsfeld*.

Wichtige Gesetzmäßigkeiten:

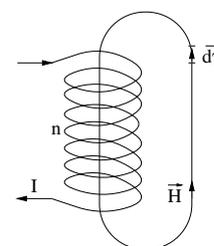
1. Beim Durchgang durch die Grenzfläche zwischen zwei Medien unterschiedlicher Permeabilität bleibt die Normalkomponente des Vektors der magnetischen Induktion unverändert.

$$B_{1,n} = B_{2,n} \tag{11}$$



2. Für eine Spule mit n Windungen gilt:

$$\oint_{\vec{\gamma}} \vec{H} \cdot \vec{\gamma} = n \cdot I \quad (\text{Durchflutungsgesetz}) \tag{12}$$



Beispiel: Ferromagnetischer Ringkern mit Luftspalt

In einen ferromagnetischen Ring wird ein so schmaler Luftspalt vorausgesetzt, dass die Magnetisierung \vec{M}_K des Ringkerns homogen bleibt. (Im folgenden stehen die Indizes „K“ und „L“ für den Kern bzw. den Luftspalt.) Im Kern gilt:

$$B_K = \mu_0 \cdot (H_K + M_K) \tag{13}$$

Im Luftspalt ist $M_L = 0$, so dass folgt:

$$B_K = B_L = \mu_0 \cdot H_L \tag{14}$$

$$H_L \cdot l_L + H_K \cdot l_K = n \cdot I = H_0 \cdot l \tag{15}$$

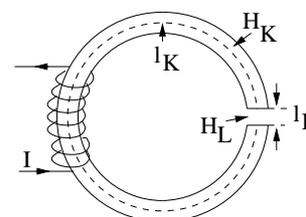
mit $l = l_L + l_K$.

Insgesamt ergibt sich damit :

$$\mu_0(H_L - H_0) \cdot l = \mu_0(H_L - H_K) \cdot l_K \tag{16}$$

$$= (B_L - B_K + \mu_0 \cdot M_K) \cdot l_K \tag{17}$$

$$= \mu_0 \cdot M_K \cdot l_K \tag{18}$$

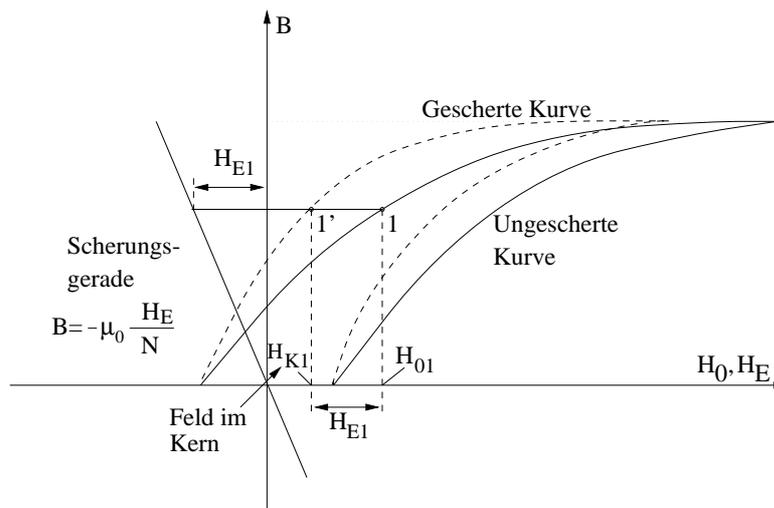


oder

$$H_L = H_0 + M_K \cdot (l_K/l) \quad \text{bzw.} \quad H_K = H_0 - M_K \cdot (l_L/l) \tag{19}$$

Das magnetische Feld im Kernmaterial wird durch das *entmagnetisierende Feld*

$$H_E = -M_K \cdot (l_L/l) = -N \cdot M_K \tag{20}$$



geschwächt. Es ist um diesen Betrag kleiner als das angelegte Feld H_0 . N heißt *Entmagnetisierungsfaktor*. Also:

$$H_K = H_0 - N \cdot M_K = H_0 + H_E \quad \text{und} \quad (21)$$

$$H_L = H_0 + (1 - N) \cdot M_K \quad (22)$$

Die Magnetisierung \vec{M} bzw. die magnetische Flussdichte \vec{B} werden üblicherweise als Funktionen von H_0 gemessen. Die Korrekturrechnung, d. h. das Auftragen von M bzw. B über H_K heißt *Scherung*. Sie kann grafisch erfolgen, wenn der Entmagnetisierungsfaktor N bekannt ist. Für sehr viele Ferromagnetika gilt im Bereich gebräuchlicher Feldstärken $M_K \gg H_K$. Es ist dann (mit $B_K = B$):

$$H_K = H_0 - N \cdot M_K \approx H_0 - N \cdot \frac{B}{\mu_0} = H_0 + H_E \quad (23)$$

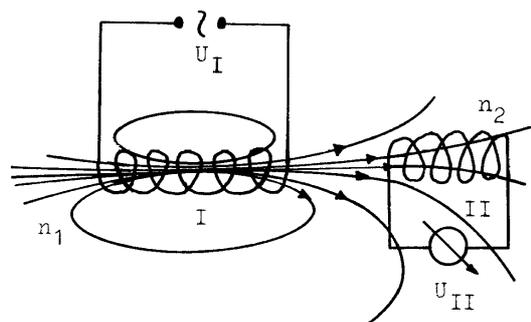
Bei bekannten N erfolgt die Scherung mit der Scherungsgeraden

$$B = -\mu_0 \cdot \frac{1}{N} \cdot H_E \quad (24)$$

wobei H_E das entmagnetisierende Feld und $N = l_L/l$ für den obigen Kern bedeuten.

Der ideale Transformator

Eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule erzeugt ein sich im Takt des Stromes änderndes Magnetfeld. Durchsetzen die Feldlinien eine zweite Spule, so wird in dieser eine Spannung induziert.



Die Spule I erzeugt am Ort von Spule II einen mittleren magnetischen Fluss Φ_2 , der wegen der Streuung des Feldes nur einen Bruchteil γ des Flusses Φ_1 im Innern von Spule I beträgt:

$$\Phi_2 = \gamma \Phi_1 \quad \text{mit} \quad \gamma \ll 1 \quad (25)$$

Damit ist die in Spule II induzierte Spannung

$$U_2 = -n_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = -\gamma \cdot n_2 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (26)$$

Der Strom in Spule I stellt sich aber so ein, dass gilt:

$$U_1 = -U_{\text{ind}} = -n_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (27)$$

Für das Verhältnis beider Spannungen gilt also:

$$\frac{U_2}{U_1} = \gamma \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (28)$$

Um die Spannungen zu transformieren, sollte das γ möglichst gleich 1 sein. Hierzu benötigt man einen „Leiter“ für die Feldlinien, wie z.B. Kerne aus ferromagnetischen Materialien. Einen besonders einfachen Fall stellt der *ideale* Transformator dar, der die folgenden Eigenschaften aufweist:

- Seine Spulen sind aus widerstandslosem Draht gewickelt.
- Alle von einer Spule erzeugten Feldlinien werden von den Windungen der anderen umschlossen (das Kernmaterial besitzt eine unendlich hohe Permeabilität).
- Im Kernmaterial entstehen beim Vorgang der Transformation keine Verluste. Die auf der Primärseite vom Transformator aufgenommene Leistung wird restlos auf der Sekundärseite an den Verbraucher abgegeben.

Die transformierte Spannung ergibt sich aus dem Induktionsgesetz:

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (29)$$

Fließt durch die Primärspule des Transformators ein sinusförmiger Strom, so erzeugt er einen magnetischen Fluss

$$\Phi = \Phi_s \sin \omega t \quad , \quad \omega = 2\pi f \quad , \quad f : \text{Frequenz} \quad (30)$$

Dann folgt:

$$U_{\text{ind},1} = -n_1 \cdot \omega \cdot \Phi_s \cos \omega t \quad \text{I. Trafo-Gleichung} \quad (31)$$

Da der Fluss durch die Sekundärspule genauso groß ist wie durch die Primärspule ($\gamma = 1$), folgt:

$$\frac{U_1}{U_2} = + \frac{n_1}{n_2} \quad \text{II. Trafo-Gleichung} \quad (32)$$

$$\text{und hieraus} \quad U_{\text{ind},2} = -n_2 \cdot \omega \cdot \Phi_s \cos \omega t \quad (33)$$

Beim belasteten idealen Transformator fließt ein Strom I_1 in der Primärwicklung und ein Strom I_2 in der Sekundärwicklung. Den Zusammenhang zwischen diesen beiden Strömen kann man sich durch Feldbetrachtungen oder durch Energiebetrachtungen klar machen.

Aus der Betrachtung der Felder folgt: Der Strom I_2 erzeugt ein magnetisches Feld $H_2 = (I_2 \cdot n_2)/l$ und damit eine Änderung des Flusses in der Primärspule, was wiederum einen Strom I_1 in der Primärspule induziert, der der Flussänderung entgegenwirkt. Der Strom I_1 stellt sich nach dem Induktionsgesetz gerade so ein, dass er die Flussänderung durch den Sekundärstrom gerade kompensiert. Das heißt, das von I_1 erzeugte magnetische Feld $H_1 = (I_1 \cdot n_1)/l$ besitzt den gleichen Betrag wie H_2 und ist diesem entgegengesetzt:

$$H_1 = \frac{I_1 \cdot n_1}{l} = -H_2 = -\frac{I_2 \cdot n_2}{l} \quad (34)$$

Daraus ergibt sich

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{n_2}{n_1} \quad \text{III. Trafogleichung} \quad (35)$$

Das negative Vorzeichen berücksichtigt dabei eine Phasenverschiebung von 180° .

Der reale Transformator

Im Gegensatz zum idealen Transformator gilt es die Einflüsse folgender physikalischer Größen und Effekte zu berücksichtigen:

- Den ohmschen Widerstand der Transformatorwicklungen.
- Die endliche Permeabilität des Kernmaterials und die damit verbundene endliche Induktivität der Primärwicklung sowie die Streuung des magnetischen Flusses.
- Die Hystereseverluste im Kernmaterial, hervorgerufen durch die Notwendigkeit der dauernden Ummagnetisierung.
- Die Wirbelstromverluste im Kernmaterial als Folge des Induktionsgesetzes.

Alle Punkte sind gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Daher stellt der reale Transformator ein kompliziertes Gebilde dar.

Experiment

Hinweis: Die beiden Versuchsplätze sind nicht identisch ausgestattet da einige Geräte nur einfach zur Verfügung stehen. Damit jede Praktikumsgruppe die Daten gesammelt auf einem Rechner anlegen kann müssen, je nach Versuchsteil, ein Sensor- bzw. das Power-Cassy, der Funktionsgenerator und der Widerstand ausgetauscht werden. Die Traforeihe und der Hochspannungstrenntrafo werden nacheinander von beiden Gruppen genutzt.

Achtung: Bei falscher oder unvorsichtiger Versuchsdurchführung können sehr starke Ströme auftreten die zur Zerstörung der Spulen führen! Vor dem Verändern der Schaltungen sind daher immer alle Trafos auf Nullanschlag zu stellen. Für die Messungen der Stromstärke mit dem Multimeter ist immer der 20A Eingang im AC Modus zu benutzen. Beim Erhöhen der Spannung an den Transformatoren ist langsam vorzugehen und die Strömstärke zu beobachten, um die angegebenen Maximalwerte nicht zu überschreiten. Für die Hysteresemessungen an den Spulen mit FeCuNbSiB- und Ferritkern darf nur der LD Kleinspannungs-Stelltrafo verwendet werden!

Zu Beginn der Messung mache man sich eingehend mit der CASSY Lab Software vertraut. Die CASSY-Seite des Einstellungsfensters zeigt die aktuelle Konfiguration an. Um eine Messung

durchzuführen, braucht nur der entsprechende Eingang oder Ausgang angeklickt zu werden, daraufhin wird ein Dialog geöffnet in dem die Parameter des Ein- oder Ausganges wie z. B. Frequenz, Signalform, Offsets oder Messbereiche eingestellt werden können. Ein aktiver Ein- oder Ausgang wird danach farbig markiert und als Button zu den Speed-Buttons des Hauptfensters einsortiert. Diese Buttons stellen die einfachste Möglichkeit dar, ein Anzeigeelement des Kanals anzuzeigen, zu schließen (linke Maustaste) oder seine Einstellungen zu verändern (rechte Maustaste). Außerdem erscheint der Kanal automatisch in der Messwerttabelle am linken Bildrand und im Diagramm.

Wichtige Befehle:



F9 Startet und stoppt eine neue Messung. Falls bei den Messparametern eine Messzeit vorgegeben wurde endet die Messung automatisch.



F5 Ändert die aktuellen Einstellungen (z.B. CASSY Module, Ein-, Ausgänge, Parameter, Formeln, Darstellung). Für die Messparameter (Messpunkt Abstand, Anzahl Messpunkte, Trigger, etc.) muss die Funktion doppelt betätigt werden.

Für die Messungen am idealen Transformator in Versuchsteil 1. sind geeignete Messvorschriften in CASSY Lab zu programmieren, für die späteren Messungen der Hysterese in den Versuchsteilen 2. und 3. stehen fertige Messvorschriften zur Verfügung. Bei einer Änderung der Anordnung der Cassy-Module ist ggf. der USB Stecker an den Modulen kurz abzuziehen und wieder einzustecken und eine Aktualisierung in CASSY Lab durchzuführen. Das Power-Cassy benötigt immer eine eigene Stromversorgung, bei der Verwendung von einem oder mehreren Sensor-Cassys ist eine Stromversorgung für alle Module ausreichend.

Vorbereitung der Messung von Hysteresekurven

Um die Hystereskurven, also die Magnetisierung M bzw. den magnetischen Fluss B als Funktion des Magnetfeldes H messen und am Oszilloskop darstellen zu können müssen die entsprechenden physikalischen Größen zunächst durch geeignete experimentelle Maßnahmen in Spannungen umgewandelt werden. Dies erfolgt durch die in Abbildung 1 dargestellte Schaltung deren Funktionsweise hier kurz erläutert werden soll. Die einzelnen Schaltungsteile sind bereits fertig verlötet in einer Box neben der Transformatorenleiste vorhanden und müssen nur noch korrekt mit der Spannungsquelle, der Induktivität und dem Oszilloskop verbunden werden.

Die verschiedenen Materialien, welche auf einen ferromagnetischen Kern als Spule mit n Windungen gesteckt sind, bilden eine Drossel. Diese wird an eine Wechselspannungsquelle U angeschlossen. Somit gilt:

$$U(t) - n \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} = 0 \quad , \quad \Phi = A \cdot B \quad (\text{Magnetischer Fluss}) \quad (36)$$

mit dem Querschnitt A des Kerns. Also:

$$B(t) = \frac{1}{n \cdot A} \int_0^t U(t) dt \quad (37)$$

Um ein B - H -Diagramm zu erhalten, braucht man $H(t)$. Ist l der mittlere Umfang des Kerns, so folgt aus dem Durchflutungsgesetz:

$$H(t) = n \cdot I(t) / l \quad (38)$$

Die an die x -Ablenkplatten des Oszilloskops anzulegende Spannung wird mit Hilfe des Widerstands R_1 gewonnen.

$$U_x(t) = I(t) \cdot R_1 = H(t) \cdot R_1 \cdot l/n \quad (39)$$

Hierbei muss $I \cdot R_1 \ll U(t)$ sein, d. h. R_1 muss klein sein gegenüber dem Widerstand, den die Drossel darstellt, dann ist $U_x(t)$ proportional zu $H(t)$.

Um eine zu $B(t)$ proportionale Spannung zu erhalten, muss eine Integration durchgeführt werden. Hierzu dient der *Integrator*, bestehend aus einem Kondensator und Widerstand, hier C und R_2 .

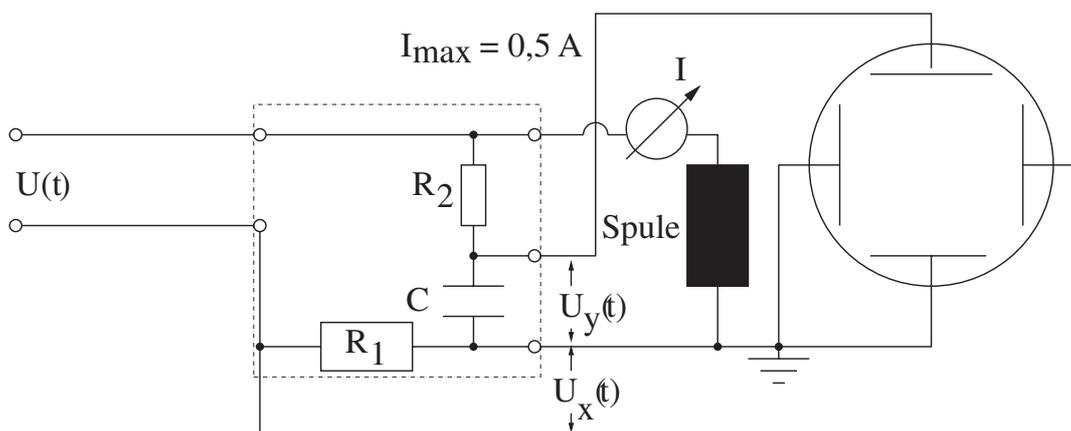


Abb. 1: Schaltbild zur Darstellung der Hysteresekurven auf dem Oszilloskop. Die Elemente innerhalb des gestrichelten Rahmens befinden sich in einer separaten Box auf der Transformatorleiste und müssen nur noch entsprechend verbunden werden.

Die Spannung am Kondensator ist in jedem Augenblick bestimmt durch:

$$U_C = U_y = (1/C) \cdot \int I_C dt \quad (40)$$

I_C ist der Ladestrom des Kondensators. Weiterhin gilt da $U_{R_1} \ll U(t)$:

$$U(t) \approx I_C \cdot R_2 + U_C \quad (41)$$

R_2 und C sind so gewählt dass $U_C \ll I_C \cdot R_2$, so gilt näherungsweise

$$U(t) \approx I_C \cdot R_2 \quad I_C \approx U(t)/R_2 \quad (42)$$

Damit folgt:

$$U_y(t) = \frac{1}{R_2 C} \int_0^T U(t) \cdot dt \Rightarrow U_y(t) = \frac{n \cdot A \cdot B(t)}{R_2 C} \quad (43)$$

$U_C \ll I_C \cdot R_2$ gilt sicher, wenn $R_2 C \gg T$ ist, wobei T die Integrationszeit (Periodendauer von $U(t)$) ist.

Das Oszilloskop registriert $U_y(t)$ als Funktion von $U_x(t)$, d. h. im x - y -Betrieb bis auf konstante Faktoren, die bestimmt werden können, B als Funktion von H .

1. Der ideale Transformator

Mit Hilfe geeigneter Kerne (Kernmaterial, Form des Kerns) und niederohmiger Spulen lassen sich die Eigenschaften des idealen Transformators näherungsweise nachbilden. Ein solcher Transformator soll für die folgenden Untersuchungen verwendet werden. Zur Überprüfung der Transformationen werden die CASSY-Module verwendet (siehe Abb. 2). Spannung und Strom können

hiermit direkt gemessen werden. Die vorgeschlagenen Werte für den Messbereich und die Achsenskalierung sowie die Anzahl der signifikanten Nachkommastellen sind anzupassen. Für die Messparameter (Messpunktabstand, Messpunktanzahl, Messzeit) sind geeignete Werte zu wählen.

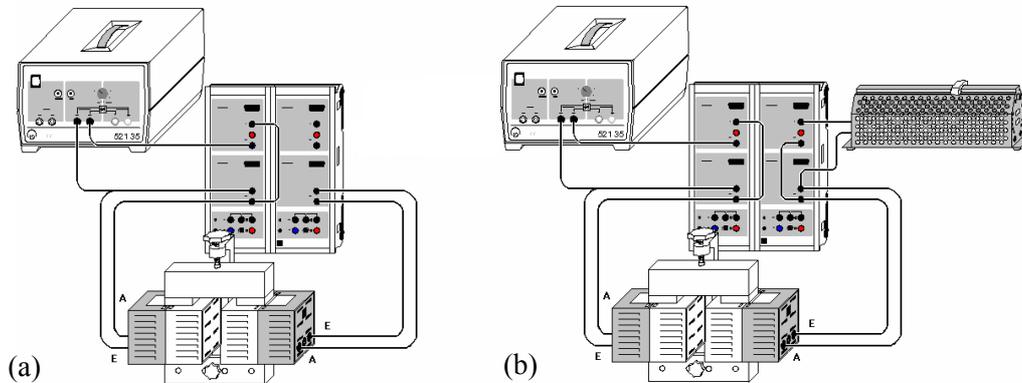


Abb. 2: Experimenteller Aufbau zur Überprüfung von (a) Spannungstransformation und (b) Stromtransformation.

1. Spannungstransformation

Man prüfe, ob $U_1/U_2 = n_1/n_2$ ist. Um mehrere Kombinationsmöglichkeiten zu erhalten, können die Spulen auf Primär- und Sekundärseite mittig abgegriffen werden (2:1, 1:1, 1:2).

2. Stromtransformation

Man prüfe, ob $I_1/I_2 = n_2/n_1$ gilt. Hierzu wird der Transformator mit einem Widerstand R belastet (2:1, 1:1, 1:2).

Warum treten Abweichungen auf? Die möglichen Abweichungen zum idealen Transformator sind zu diskutieren!

2. Entmagnetisierungsfaktor des Transformators

Zur Bestimmung der Ferromagnetischen Hysterese werden das Magnetfeld und die Magnetisierung nicht direkt gemessen, sondern die dazu proportionalen Größen (Primärstrom und magnetischer Fluss Φ). Diese Messung kann auf zwei verschiedene Weisen durchgeführt werden.

- Den Strom der Primärspule des Transformators liefert das Power-CASSY. Der magnetische Fluss wird aus der Induktionsspannung der Sekundärspule, die vom Input-B des Sensor-CASSYs gemessen wird, berechnet. Hierzu werden das Power- und Sensor-CASSY zusammengesteckt und die CASSYs wie in Abbildung 3 (a) dargestellt mit dem Transformator verbunden.
- Alternativ kann das Experiment ohne Power-CASSY unter Verwendung eines Funktionsgenerators durchgeführt werden. Dieser ist auf Dreiecksfrequenz mit 0,1 Hz und einer Amplitude von 2 V einzustellen. Zur Aufnahme der Neukurve wird auf einen Strom I von 0 A getriggert. Um diesen Zeitpunkt exakt abzuspannen, wird der Strom vor der Aufnahme der Hystereseurve vom Relais am Transformator vorbei durch einen Widerstand geleitet. Die entsprechende Schaltung für diese Variante der Messung ist in Abbildung 3 (b) dargestellt.

Zur automatischen Messung in der CASSY-Software stehen die Messvorschriften „Hysterese (mit Power-CASSY).lab“ und „Hysterese (ohne Power-CASSY).lab“ zur Verfügung. Bei Beiden wird der magnetische Fluss über dem Primärstrom aufgetragen.

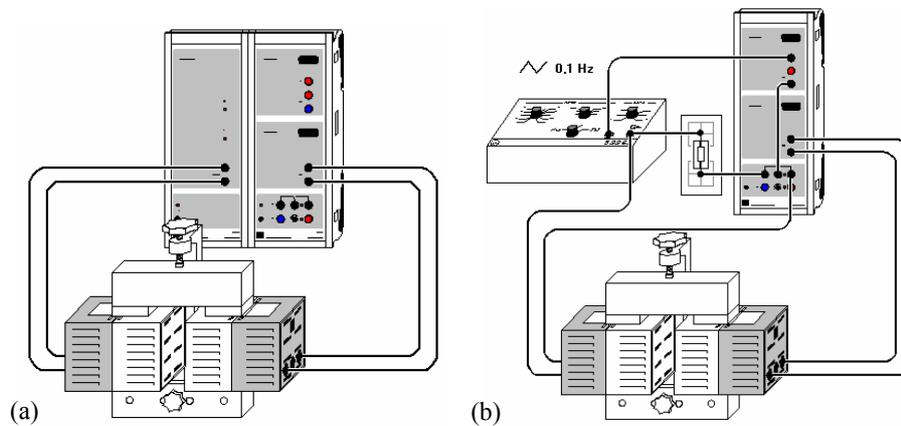


Abb. 3: Schaltungen zur Hystereseaufnahme (a) mit Power-CASSY und (b) ohne Power-CASSY.

Vor der eigentlichen Messung ist der Eisenkern zu entmagnetisieren, z. B. durch mehrere kräftige Schläge mit der Stirnfläche des Jochs auf die beiden Stirnflächen des U-Kerns. Alternativ kann zur Entmagnetisierung eine Messung nach einer Periode der Hysteresekurve oder bei einem magnetischen Fluss von $\Phi = 0$ Vs erfolgen. Wenn die Hysteresekurve im zweiten und vierten Quadranten verläuft, hilft ein Verpolen der Anschlüsse an einer der beiden Spulen.

Untersuchen Sie die Auswirkung eines Luftspaltes am Trafokern durch Vergleich der Hysteresekurven mit und ohne Luftspalt. Hierzu lege man zwischen Joch und Polschuhen auf beiden Seiten ein Stück Papier ($d \approx 100 \mu\text{m}$). Die Hystereseschleifen sind zum Vergleich in einem Diagramm darzustellen. Der Entmagnetisierungsfaktor N ist zu bestimmen und rechnerisch zu überprüfen.

3. Ferromagnetische Hysterese verschiedener Materialien

Für nanokristallines und amorphes FeCuNbSiB, Ferrit, μ -Metall, Trafopern und den Leybold Trafokern sind die Hysteresekurven zu überprüfen. Die Hysteresekurven sind vor der Aufnahme in CASSY Lab zunächst mit der in Abbildung 1 dargestellten Schaltung auf dem *Elektronenstrahl-Oszilloskop* darzustellen.

Zur Erzeugung der ferromagnetischen Hysterese der verschiedenen Materialien stehen zur Spannungsversorgung ein LD Kleinspannungs-Stelltrafo und ein Hochspannungstrenntrafo zur Verfügung. Der Hochspannungstrenntrafo (*Vorsicht!*) ist ausschließlich für das μ -Metall, Trafopern und den Leybold Trafokern zu verwenden! Achtung, beim Ändern der Schaltung (auch beim Wechsel der Trafospule) sind die Trafos zur Spannungsversorgung immer auf Nullanschlag zu regeln und die Spannung ist danach vorsichtig wieder zu erhöhen!

Man achte bei der Versuchsdurchführung auf die Protokollierung aller Messparameter und Randbedingungen. Die an den Kernen angegebenen Maximalstromstärken sind nicht zu überschreiten! Nach der erfolgreichen Voreinstellung der ferromagnetischen Hysterese am Oszilloskop sind die Hysteresekurven mit Hilfe eines Sensor-CASSYs aufzunehmen. Es muss sichergestellt werden, dass keine Spannungen $U > 100$ V anliegen (Überprüfung am Oszilloskop). Für die Aufnahme wird die Schaltung aus Abbildung 1 modifiziert und der Primärstrom durch eine Reihenschaltung von Multimeter und Stromeingang an Sensor A gemessen (Messbereich 3A). Die Ablenkspannung U_y kann am Oszilloskop abgegriffen werden und wird an Sensor B gemessen. Zur Aufnahme einer Hysteresekurve steht die Messvorschrift „Hysterese verschiedener Materialien.lab“ zur Verfügung.

(a) Aufnahme der Hysteresekurven

Es sind die Hysteresekurven der vorhandenen Materialien (amorphes und nanokristallines FeCuNbSiB, Ferrit, μ -Metall, Trafoperm und Leybold Trafokern) bis zur Sättigung im Oszilloskop zu beobachten und mit der CASSY-Software aufzunehmen. Falls die Hysteresekurven stark verrauscht sind ist die elektrische Verbindung zum CASSY zu trennen und zusätzlich eine Skizze des dann ungestörten Oszilloskopbildes anzufertigen.

Warum weichen die Hysteresekurven des amorphen und nanokristallinen FeCuNbSiB voneinander ab?

Vergleichen sie die Hysteresekurven der verschiedenen Materialien und diskutieren Sie jeweils die Sättigungsinduktion B_S , die Remanenzinduktion B_R und die Koerzitivfeldstärke H_C . Wie groß ist die Energie im Trafokern? *Was bedeutet das?*

(b) Ermittlung der Kommutierungskurven

Bestimmen Sie die Kommutierungskurven von Ferrit, Trafoperm und Leybold Trafokern. Diese sind durch Aufnahmen von 3 bis 5 Hysteresekurven bei verschiedenen Magnetisierungszuständen zu ermitteln. Bestimmen Sie die Anfangspermeabilität μ_A sowie die Maximalpermeabilität μ_{max} . Berechnen oder schätzen Sie die Fehler ab (mit Begründung).