



VERSUCH 15

FERROMAGNETISMUS

Praktikumsprotokoll von
Tobias Wegener

Gruppennummer: 1
Assistent: Ralph Schäfer
Mitarbeiter: Alexander Osterkorn
Durchgeführt am: 11.9.2013
Abgegeben am: 8.10.2013

Testiert:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theorie	4
2.1	Ferromagnetische Materialien	4
2.2	Magnetisierung und Hysterese	4
2.3	Ausgelenkte Elektronen	5
2.4	Magnetfeld von Spulen	6
3	Durchführung	7
3.1	Übersicht über die verwendeten Objekte	7
3.2	Messgerät: Elektrischer Stromintegrator	8
3.3	Ablauf der Messung	9
4	Auswertung	10
4.1	Bestimmung der Eichkonstanten α	10
4.2	Berechnung der Werte für das externe Feld H	11
4.3	Berechnung der Magnetfeldänderung ΔB	11
4.4	Hysteresekurve und charakteristische Größen	11
4.5	Anzahl ausgelenkter Elektronen pro Atom	13
5	Diskussion	14
5.1	Bestimmung der Eichkonstanten	14
5.2	Messung der Hysteresekurve	14
	Literatur	14

benachbarten Weiß'schen Bezirken sich ebenfalls parallel zum Feld ausrichten. Der zweite Effekt ist, dass die Weiß'schen Bezirke, die nicht parallel zum externen Feld ausgerichtet sind, als Ganzes „umklappen“, sobald das äußere Feld einen bestimmten Grenzwert übersteigt. Dies hat zur Konsequenz, dass die Magnetisierung eigentlich sprunghaft verläuft. Diese Sprünge in der Magnetisierungskurve werden als **Barkhausen-Sprünge** bezeichnet. Wird das äußere Magnetfeld nun kontinuierlich erhöht, so steigt auch die Magnetisierung des Materials zunächst linear an. Irgendwann stoppt jedoch das Anwachsen der Magnetisierung, da dann alle Dipolmomente parallel ausgerichtet sind. Man sagt, dass die **Sättigungsmagnetisierung** erreicht ist (Markierung 2). Wenn nun das äußere Magnetfeld wieder auf 0 gesenkt wird, sinkt auch die Magnetisierung des Materials. Dies geschieht aus verschiedenen Gründen mit einer gewissen Trägheit, sodass die Kurve (von 2 nach 3) oberhalb der Magnetisierungskurve (von 1 nach 2) verläuft. Das hat zur Konsequenz, dass das Material bei Verschwinden des äußeren Feldes noch eine Restmagnetisierung besitzt, die als **Remanenz** bezeichnet wird. Um das Material wieder magnetisch zu neutralisieren, wird ein andersherum gepoltes Magnetfeld benötigt. Diejenige Feldstärke, bei der schließlich die Magnetisierung verschwindet, wird **Koerzitifkraft** genannt. Nun kann durch ein weiteres Anwachsen des äußeren Feldes die Magnetisierung des Materials so lange erhöht werden, bis auch hier Sättigung erreicht ist (3). Wenn dann das äußere Feld wieder umgepolt und auf eine große Feldstärke gebracht wird, schließt sich die Hystereseschleife und es wird Markierung 4 erreicht. Die von der Schleife eingeschlossene Fläche ist proportional zur verrichteten Arbeit, die in thermische Energie des Materials umgewandelt wurde [S. 401-408][Meschede, 2010].

2.3 Ausgelenkte Elektronen

Kennt man den Betrag des B -Feldes eines ferromagnetischen Materials, den Wert des Bohr'schen Magnetons $\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ J T}^{-1}$ (Beitrag eines ausgerichteten Elektrons zur Magnetisierung, [Meschede, 2010, S. 727]) und verschiedene Materialeigenschaften, so lässt sich berechnen, wie groß die Anzahl a ausgerichteter Elektronen pro Atom ist. Dazu wird zunächst die Anzahl insgesamt ausgerichteter Elektronen n_e benötigt. Diese lässt sich nach folgender Formel berechnen [Demtröder, 2013, S. 108]:

$$B = \mu_0 M = \mu_0 \frac{n_e \mu_B}{V}$$

Dabei bezeichnet $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ die Vakuumpermeabilität und V das Volumen des Ringkerns. Die Anzahl der Eisenatome n_a im Ringkern lässt wie folgt berechnen [Brown et al., 2011, S. 91-97]

$$n_a = \frac{m}{m_a} = \frac{m N_A}{M_{\text{fe}}} = \frac{V \rho_{\text{fe}} N_A}{M_{\text{fe}}}$$

Hier bezeichnen m die Masse des Ringkerns, $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ die Avogadrozahl sowie m_a die atomare Masse, M_{fe} die Molare Masse und ρ_{fe} die Dichte des Eisens. Damit ergibt sich folgende Formel:

$$a = \frac{n_e}{n_a} = \frac{B M_{\text{fe}}}{\mu_0 \mu_B N_A \rho_{\text{fe}}} \quad (1)$$

2.4 Magnetfeld von Spulen

Eine Formel für das Magnetfeld einer Ringkernspule lässt sich mit Hilfe des *Ampere'schen Gesetzes* [Meschede, 2010, S. 373] herleiten. Dazu wird angenommen, dass in einem ferromagnetischen Ringkern die Magnetfeldlinien geschlossen verlaufen [Meschede, 2010, S.432]. Betrachtet man also einen kreisförmigen, geschlossenen Integrationsweg mit dem Umfang l im Eisenkern, so sollte \vec{H} stets parallel zum Wegstück $d\vec{s}$ und von konstantem Betrag sein. Insbesondere sollte es unerheblich sein, ob die Wicklungen gleichmäßig über den Ring verteilt sind oder nicht, es kommt lediglich auf den eingeschlossenen Strom I an:

$$H = \frac{I n}{l} \quad \text{bzw.} \quad B = \mu_0 I \frac{n}{l} \quad (2)$$

Für eine lange Spule ohne Eisenkern gilt diese Formel ebenfalls in guter Näherung, wobei in diesem Fall für l die Länge der Spule eingesetzt werden muss. Ist die Spule viel länger als dick, so ist das Magnetfeld außerhalb der Spule wesentlich kleiner [Meschede, 2010, S.278].

3 Durchführung

3.1 Übersicht über die verwendeten Objekte

Im Folgenden sind einige wichtige Elemente des Versuchsaufbaus skizziert und die benötigten zugehörigen Daten aufgeführt. Diese Werte konnten der Praktikumsanleitung und den Hinweisen am Versuchsaufbau entnommen werden. Falls ein Fehler angegeben war, wurde dieser übernommen. Für die anderen Werte wird angenommen, dass der Fehler vernachlässigt werden kann.

Lufttransformator

Der Lufttransformator besteht aus zwei unterschiedlich geformten Spulen, wobei eine lange Spule von einer deutlich kürzeren und dickeren Spule umgeben wird. Auf Grund der Länge der langen Spule kann angenommen werden, dass das von der Spule erzeugte Magnetfeld außerhalb von dieser vernachlässigt und innerhalb nach Gleichung 2 berechnet werden kann. Somit ist es über diese Anordnung möglich, einen ziemlich genau eingestellten magnetischen Fluss durch den Querschnitt der dicken Spule zu erzeugen. In der Tabelle 1 ist für jede der beiden Spulen die Länge l , der Durchmesser d sowie die Windungszahl n angegeben.

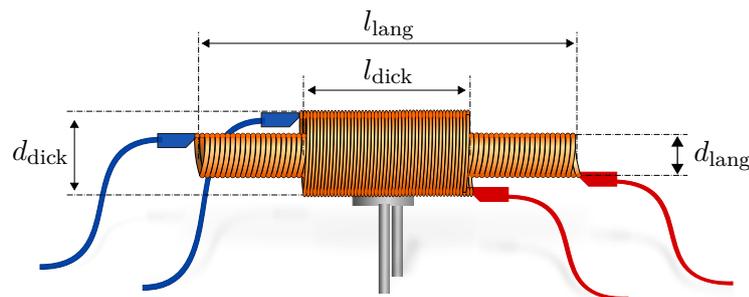


Abbildung 2: Skizze des Lufttransformators

Lange Spule		Dicke Spule	
l_{lang}	1 m	l_{dick}	(15.5 ± 0.5) cm
d_{lang}	50.8 mm	d_{dick}	(80 ± 5) mm
n_{lang}	2800	n_{dick}	3213

Tabelle 1: Werte für die Abmessungen der beiden Spulen

Ringkerntransformator

Der Ringkerntransformator besteht aus einem geschlossenen Eisenkern, der von drei unterschiedlichen Spulen umwickelt ist. Mit den hier als L_1 und L_2 bezeichneten Spulen soll im Versuch ein Magnetfeld erzeugt werden. Die dritte Spule wird während der Messung – von diesem Magnetfeld durchsetzt – als Induktionsspule verwendet und somit mit L_{ind} bezeichnet. Auch hier steht n für die jeweilige Windungszahl.

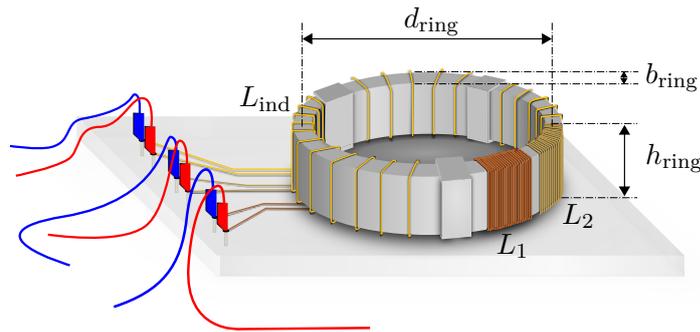


Abbildung 3: Skizze des Ringkerntransformators

Spulen		Ringkern	
n_{ind}	300	Querschnitt $A_{\text{ring}} = h_{\text{ring}} \cdot b_{\text{ring}}$	$3.01 \cdot 1.0 \text{ cm}^2$
n_1	107	Mittlerer Ringdurchmesser d_{ring}	13.8 cm
n_2	1000	Dichte des Eisens ρ_{fe}	7.85 g/cm^3
		Molmasse des Eisens M_{fe}	55.58 g

Tabelle 2: Daten der Spulen sowie Abmessungen/Eigenschaften des Ringkerns

3.2 Messgerät: Elektrischer Stromintegrator

Möchte man einen Spannungsstoß oder die dabei geflossene Ladung messen, kann man einen *Stromintegrator* verwenden. Dieser basiert auf einem invertierenden Operationsverstärker, der über eine Rückkopplungsschaltung (mittels eines Kondensators) als Integrator wirkt. Er zeigt einen Wert an, der proportional zur Ausgangsspannung ist. Mittels der Knotenregel kann gezeigt werden, dass die gemessene Ausgangsspannung ebenfalls proportional zum Betrag des registrierten Spannungsstoßes am Eingang ist. Seien φ der angezeigte Skalenwert und U die Eingangsspannung am Stromintegrator, so gilt also:

$$\varphi = \alpha \int U \, dt$$

Die Proportionalitätskonstante α wird bestimmt, indem Spannungsstöße bekannter Größe gemessen werden. In diesem Versuch geschieht das dadurch, dass der magnetische Fluss durch eine Induktionsspule mit n Windungen verändert wird. Dies erzeugt nach [Demtröder, 2013, S. 125] eine Induktionsspannung $U = -n \dot{\Phi}$. Mit $A \parallel B$ und dem Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung gilt dann:

$$\begin{aligned} \varphi &= -\alpha n \int \dot{\Phi} \, dt \\ &= -\alpha n \Delta\Phi \end{aligned} \quad (3)$$

wobei $\Phi = \vec{B} \vec{A}$ der magnetische Fluss durch eine einzelne Windung ist. Wenn der Querschnitt A sich nicht ändert und auch B über diesen Querschnitt homogen ist, lässt sich damit ΔB berechnen:

$$\Delta B = -\frac{\varphi}{\alpha n A} \quad (4)$$

3.3 Ablauf der Messung

Versuchsaufbau

Zunächst muss die in Abb. 4 dargestellte Schaltung aufgebaut werden. Die Daten zu den Transformatoren sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen.

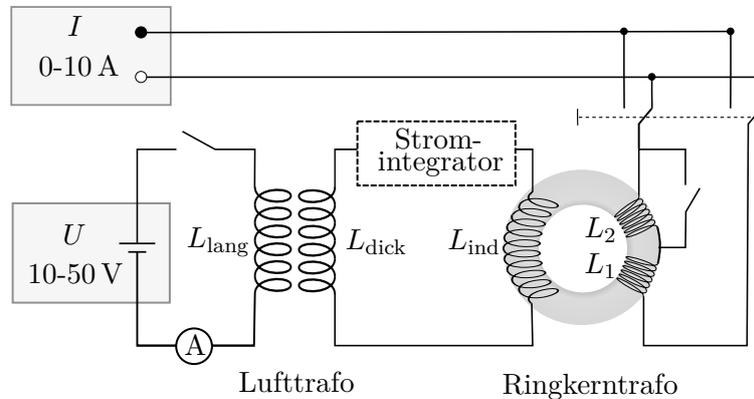


Abbildung 4: Schaltplan

Eichung des Stromintegrators

Dann wird der Stromintegrator mit Hilfe des Lufttrafos geeicht. Dazu werden über das Netzgerät in der langen Spule Ströme (gemessen mit einem Multimeter) und damit Magnetfelder erzeugt, welche beim Öffnen des Stromkreises eine definierte Flussänderung durch die dicke Spule bewirken. Der dadurch induzierte Spannungsstoß wird mit einem Stromintegrator gemessen. Die Werte des Stroms und der Stromintegratoranzeige werden notiert. Diese Messung wird für mindestens acht verschiedene Stromwerte durchgeführt.

Aufnahme der Hysteresekurve

In diesem Teil des Versuchs soll die Hysteresekurve des Eisenringkerns gemessen werden. Dazu muss das externe Magnetfeld H am Ort des Eisens variiert werden. Dies geschieht über die Spulen L_1 und L_2 , welche den Ringkern umschließen und von verschiedenen großen Strömen durchflossen werden können. Für die meisten Messwerte wird nur die Spule L_1 verwendet, die andere Spule wird lediglich bei maximalem Strom dazugeschaltet, um kurzzeitig ein sehr starkes äußeres Magnetfeld zu erzeugen. Der Strom kann an einem Netzgerät zwischen 0 und 10 A in verschiedenen Stufen variiert werden. Mit Hilfe des Wechselschalters kann die Polung umgekehrt werden. Da eine Hysteresekurve entscheidend von der Vorgeschichte des Materials abhängig ist, wird sie zunächst mehrfach durchlaufen, ohne dass die Messwerte notiert werden. Dazu wird der Strom durch die das Magnetfeld erzeugenden Spulen abwechselnd kontinuierlich bis zum Maximalwert erhöht/gesenkt. Dabei ist darauf zu achten, dass gerade bei großen Strömen zügig gearbeitet wird, da andernfalls das Netzgerät in Überlast geht. Wurde dies getan, wird die Hysteresekurve noch einmal durchlaufen. Dabei werden dann in jedem Schritt die Werte des Stroms und der Integratoranzeige notiert.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Eichkonstanten α

Zur Eichung des Stromintegrators wurde der Lufttransformator verwendet. Die Eichkonstante α des Stromintegrators lässt sich dann nach Gl. 3 berechnen. Dazu wird also die Änderung $\Delta\Phi$ des magnetischen Flusses durch den Querschnitt der dicken Spule benötigt. Aufgrund der Überlegungen in Kapitel 3.1 kann angenommen werden, dass die lange Spule ein Magnetfeld erzeugt, welches außerhalb von dieser praktisch null ist innerhalb von dieser nach Gleichung 2 berechnet werden kann. Somit gilt für die Differenz des magnetischen Flusses:

$$\Delta\Phi = A_{\text{lang}} B_{\text{lang}} = \mu_0 A_{\text{lang}} I \frac{n_{\text{lang}}}{l_{\text{lang}}}$$

Dabei bezeichnet A_{lang} die Querschnittsfläche der langen Spule und I den Strom, von dem diese durchflossen ist. Eingesetzt in Gl. 3 folgt:

$$\alpha = - \frac{l_{\text{lang}} \varphi}{\mu_0 n_{\text{dick}} n_{\text{lang}} \pi (d_{\text{lang}}/2)^2 I}$$

Dabei werden nur I und φ als fehlerbetrachtet angesehen. Da der Strom mit einem Multimeter gemessen wurde, gilt hier der übliche Multimeterfehler für Gleichstrommessungen: $\sigma_I = 0.01$ v. Max.-Wert + 1 digit.

Dabei steht „Max.-Wert“ für den höchsten Wert des Messbereichs und digit für die in diesem Messbereich kleinste anzeigbare Differenz. Auf Grund der Anzeigengenauigkeit des Stromintegrators wird auch hier ein Fehler von $\sigma_\varphi = 1$ digit angenommen.

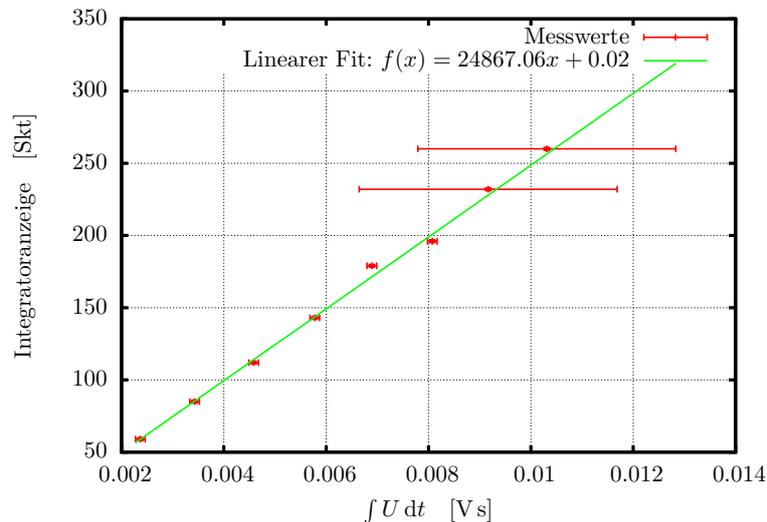


Abbildung 5: Lineare Regression zur Bestimmung der Eichkonstanten

Mit diesen Werten wurde dann mit gnuplot eine (Fehler berücksichtigende) lineare Regression durchgeführt, welche zu folgendem Wert von α führt:

$$\alpha = \underline{\underline{(24\,900 \pm 800) \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}}}$$

4.2 Berechnung der Werte für das externe Feld H

Das externe H -Feld im Eisenkern des Ringkerntrafos wird von den Spulen L_1 und L_2 erzeugt. Nach Gl. 2 ist dieses von der Entfernung vom Mittelpunkt abhängig. Für die weiteren Rechnung wird der Wert von H beim mittleren Ringradius verwendet und angenommen, dass H über den gesamten Ringquerschnitt konstant diesen Wert annimmt.

Auch in diesem Fall wird der gemessene Wert für den Strom als fehlerbehaftet betrachtet. Hier wurde der Strom jedoch nicht mit einem Multimeter gemessen, sondern direkt am Netzgerät eingestellt, wobei nur bestimmte Werte (nicht stufenlos) eingestellt werden konnten. Insofern gibt es hier keinen Ablesefehler, aber sehr wohl einen Fehler, der mit der Einstellgenauigkeit und der Lastregulierung des Netzgerätes zusammenhängt. Ein Vergleich verschiedener typischer Labornetzgeräte (10 A) im Internet¹ hat gezeigt, dass die Einstellgenauigkeit für gewöhnlich kleiner als $5 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Wert} + 5 \text{ mA}$ ist. Die Lastregulierung bewegt sich im Allgemeinen in einem Bereich, der nicht größer als $5 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Wert} + 10 \text{ mA}$ ist. Somit wird der Fehler des Labornetzgeräts zu der Summe dieser beiden Teilfehler abgeschätzt:

$$\sigma_I = 0.01 \cdot \text{Wert} + 15 \text{ mA}$$

Damit berechnet sich H wie folgt:

$$H = I \frac{n_{1,2}}{\pi d_{\text{ring}}} \quad \text{mit} \quad \sigma_H = \frac{n_{1,2}}{\pi d_{\text{ring}}} \sigma_I$$

Dabei bezeichnet $n_{1,2}$ die Anzahl der stromdurchflossenen Windungen. Diese variiert im Laufe der Messung, weil L_2 nur an einigen Stellen zusätzlich zu L_1 verwendet wird.

4.3 Berechnung der Magnetfeldänderung ΔB

Nach Gl. 4 lässt sich die B-Feldänderung ΔB in der Induktionsspule folgendermaßen berechnen:

$$\Delta B = \frac{\varphi}{\alpha n_{\text{ind}} A_{\text{ring}}} \quad \text{mit} \quad \sigma_{\Delta B}^2 = \left(\frac{1}{\alpha n_{\text{ind}} A_{\text{ring}}} \Delta \varphi \right)^2 + \left(\frac{\varphi}{\alpha^2 n_{\text{ind}} A_{\text{ring}}} \Delta \alpha \right)^2$$

4.4 Hysteresekurve und charakteristische Größen

In der Messung zur Aufnahme einer Hysteresekurve wurden Wertepaare aus dem Strom I durch die Spulen L_1 und L_2 sowie dem vom Stromintegrator angezeigten Wert notiert. Aus dem Wert für den Strom wird – wie in Abschnitt 4.2 beschrieben – das H -Feld und aus der Anzeige des Stromintegrators der Zuwachs ΔB des Magnetfeldes (Abschnitt 4.3) berechnet.

¹z.B. http://www.elv-downloads.de/Assets/Produkte/6/687/68796/Downloads/68796_PS3010_um.pdf (S. 5), abgerufen am 23.09.2013

Um eine Hysteresekurve wie in Abb. 1 dargestellt zu erhalten, wird das gemessene Magnetfeld B gegen den Wert des von außen angelegten Feldes H aufgetragen. Es müssen also zunächst die Werte für ΔB aufsummiert werden. Bei dieser Aufsummierung verändert sich auch noch einmal der Fehler:

$$B_i = B_{i-1} + \Delta B$$

$$\sigma_{B_i} = \sqrt{\sigma_{B_{i-1}}^2 + \sigma_{\Delta B_i}^2}$$

Da es sich hierbei um ein *differentielles Verfahren* zur Bestimmung von B handelt und der Startwert für B zunächst willkürlich gewählt werden musste, können die so berechneten B -Werte noch um eine Konstante c verschoben sein. Da sich die Sättigungswerte in positiver und negativer Richtung nur durch das Vorzeichen unterscheiden sollten, werden die Werte für B noch um deren Mittelwert verschoben (Denn dann gilt $U_{\max} = -U_{\min}$).

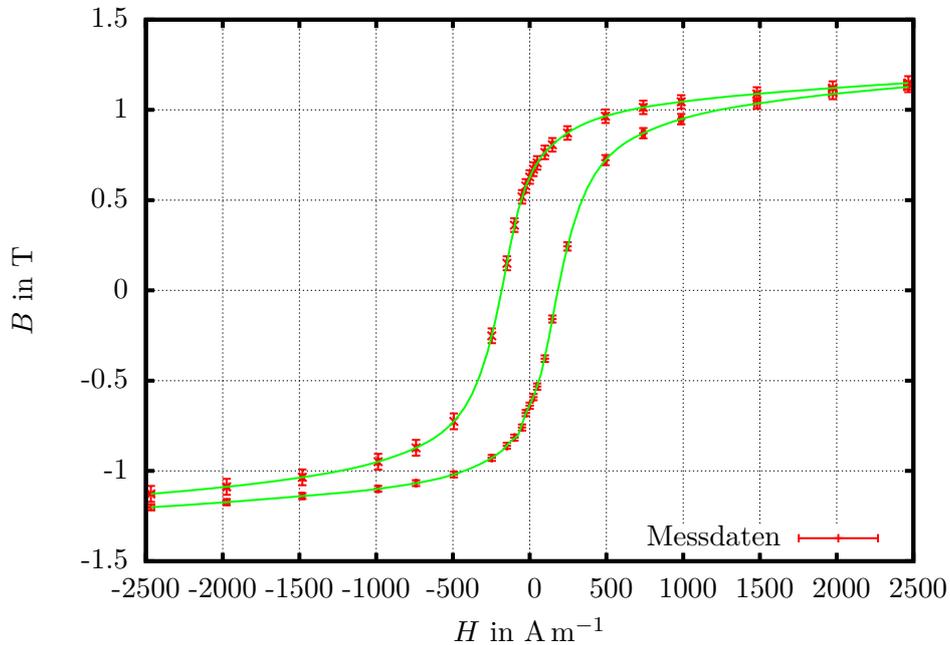


Abbildung 6: Grafische Darstellung der gemessenen Hysteresekurve

Die grafische Auftragung dieser Werte ist in Abb. 6 zu sehen. Für den Plot wurden die beiden äußeren Wertepaare nicht mitberücksichtigt, damit der „interessante“ Bereich der Hysteresekurve besser zu erkennen ist. An diesem Plot lassen sich nun verschiedene charakteristische Größen ablesen, die in der Theorie eingeführt wurden. Sie sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Bezeichnung der abgelesenen Größe	Wert
Sättigungsmagnetisierung B_S	$(1.63 \pm 0.03) \text{ T}$
Koerzitivfeldstärke H_K	$(180 \pm 20) \text{ A m}^{-1}$
Remanenz B_R	$(0.634 \pm 0.004) \text{ T}$

Tabelle 3: Übersicht über die charakteristischen Größen der Hysteresekurve

Da keine Messwerte vorhanden waren, für die genau $B = 0$ gilt, wurde der

Wert und der Fehler für die Koerzitivfeldstärke über die benachbarten Wertepaare abgeschätzt. Der Betrag der Remanenz konnte direkt aus den Messwerten berechnet werden (arithmetisches Mittel und Standardabweichung), da es zwei Wertepaare gab, welche die Bedingung $H = 0$ erfüllen. Etwas schwieriger gestaltet sich eine Abschätzung für die Sättigungsmagnetisierung B_S . Da für das Magnetfeld gilt $B = \mu_0 (H + M)$ [Meschede, 2010, S.402], steigt das gemessene Magnetfeld B selbst bei maximaler Magnetisierung M weiterhin mit der Steigung μ_0 an. Somit kann man nicht einfach davon ausgehen, dass der größte gemessene Wert für B auch die beste Näherung für die Sättigungsmagnetisierung ist. Geht man davon aus, dass dieser Wert aber bereits im Sättigungsbereich liegt, so kann man ein gutes Ergebnis erhalten, in dem man den Betrag des äußeren Magnetfeldes $B_{\text{ext}} = \mu_0 H$ vom gemessenen B -Feld abzieht. Der Fehler der Sättigungsmagnetisierung entspricht dem Messfehler.

4.5 Anzahl ausgelenkter Elektronen pro Atom

Aus den Daten des Ringkerns und dem Wert für die Sättigungsmagnetisierung B_S lässt sich nach Gleichung 1 berechnen, wie viele Elektronen pro Atom ausgelenkt sind. Der Fehler für die Sättigungsmagnetisierung wird hier auch berücksichtigt. Somit gilt für den Fehler von a :

$$\sigma_a = \frac{M_{\text{fe}}}{\mu_0 \mu_B N_A \varrho_{\text{fe}}} \sigma_{B_S}$$

Für a ergibt das einen Wert von:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1.63 \text{ T} \cdot 55.58 \text{ g mol}^{-1}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2} \cdot 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ J T}^{-1} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 7.85 \text{ g cm}^{-2}} + \sigma_a \\ &= \underline{\underline{1.65 \pm 0.03}} \end{aligned}$$

5 Diskussion

5.1 Bestimmung der Eichkonstanten

Die in Abb. 5 dargestellten Messwerte zur Eichung des Stromintegrators zeigen deutlich lineares Verhalten. Es ist jedoch etwas ärgerlich, dass der x-Fehler für zwei Messwerte deutlich größer ist, da hier der Multimeter-Messbereich gewechselt wurde. Dadurch werden sie in der Rechnung nur minimal berücksichtigt. Hier wäre es vorteilhaft, die Messwerte so zu wählen, dass der Messbereich nicht gewechselt werden muss. Die Abschätzung des Stromintegratorfehlers wurde auf eine Anzeigeungenauigkeit begrenzt. Möglicherweise gibt es hier auch einen systematische Fehler, aber dafür hätten umfangreichere Vergleichsmessungen durchgeführt werden müssen. Insbesondere wurde hier auch nicht in Erfahrung gebracht, ob An- und Ausschalten des Stroms zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dies sollte vom theoretischen Gesichtspunkt zwar keine Rolle spielen, könnte aber dennoch einen Einfluss auf die Messtechnik haben.

5.2 Messung der Hysteresekurve

Der in Abb. 6 dargestellte Verlauf der gemessenen Hysteresekurve entspricht gut den mit den theoretischen Überlegungen verknüpften Erwartungen. Als fehlerbehaftet sind hier die Werte für die Eichkonstante, den Strom durch die felderzeugenden Spulen sowie die Integratoranzeige betrachtet worden. Diese sind im Endeffekt jedoch relativ klein, sodass sie in der grafischen Darstellung kaum zu erkennen sind. Wegen des inkrementellen Verfahrens steigt der Fehler jedoch für die Messwerte an, welche später aufgenommen wurden. Der Stromfehler wurde abgeschätzt, indem die Einstellgenauigkeit und Lastregulierung typischer Labornetzgeräte im Internet verglichen wurde. Diese Fehlerabschätzung wäre einfacher, wenn man ein Multimeter zur Strommessung verwenden würde, da es dafür eine eindeutige Formel gibt.

Der gemessene Wert für die Sättigungsfeldstärke liegt mit 1.63 T deutlich unterhalb des Literaturwertes für Eisen von 2.2 T [Rudolf Gross, 2012, S. 714]. Dafür sind verschiedene Ursachen denkbar. Es könnte Veränderungen im Material gegeben haben (Verunreinigungen, Oxidation, ...), wobei solche Effekte eigentlich gerade bei der verwendeten Eisensorte sehr gering sein sollten. Außerdem ist nicht bekannt, wie der Ringkern aufgebaut ist. Es könnte aber möglich sein, dass auf Grund der hohen Leitfähigkeit des Eisens Wirbelströme im Ring erzeugt wurden, welche zu einer Erwärmung des Eisens führten. Möglicherweise sind für den richtigen Sättigungsbereich einfach auch nochmal deutlich größere Feldstärken notwendig. Dieser Verdacht wird dadurch bestärkt, dass die Differenz zwischen der Magnetisierung (ohne äußeres H -Feld) des Materials bei dem größten und dem zweitgrößten externen H -Feld noch sehr groß ist. Hier wäre es aufschlussreich, weitere Messwerte in dem hohen H -Bereich zu haben. Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist, dass angenommen wurde, dass das H -Feld über den Ringquerschnitt homogen ist. Das ist natürlich nur eine Vereinfachung, da es eigentlich innen am Stärksten ist und nach außen hin abnimmt. Insgesamt sollte sich dies jedoch einigermassen neutralisieren.

Eine Konsequenz dieses relativ niedrigen Wertes für die Sättigungsmagnetisierung ist, dass auch die Zahl ausgelenkter Elektronen pro Atom mit 1.63 ebenfalls unterhalb des Literaturwertes (2.2, [Rudolf Gross, 2012, S. 714]) liegt.

Literatur

Theodore L. Brown, H. Eugene LeMay, and Bruce E. Bursten. *Chemie*. Pearson Studium, 10th edition, 2011.

Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2*. Springer Spektrum, 6 edition, 2013.

J. Sahn H. J. Eichler, H.-D. Kronfeldt. *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*. Springer Verlag.

Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 24 edition, 2010.

Achim Marx Rudolf Gross. *Festkörperphysik*. Oldenbourg Verlag, 2012.