

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Physikalische Grundlagen	2
2.1	Das magnetische Feld	2
2.1.1	Erzeugung von magnetischen Feldern	2
2.1.2	Charakteristische Größen	2
2.1.3	Magnetische Felder und Materie	3
2.1.4	Magnetische Durchflutung	4
2.1.5	Magnetische Spannung und Widerstand	4
2.2	Bewegte Ladungen im magnetischen Feld - Lorentzkraft	5
3	Versuch und Auswertung	5
3.1	Versuchaufbau und Durchführung	5
3.2	Messergebnisse und Auswertung	7
3.2.1	Lorentzkraft	8
3.2.2	Magnetfeld und Strom	8
3.2.3	Magnetfeld und Abstand	9
3.2.4	Bestimmung von μ_0	10
3.3	Fehlerdiskussion	10
4	Fragen und Antworten	11
5	Verzeichnisse	12
5.1	Abbildungsverzeichnis	12
5.2	Tabellenverzeichnis	12
5.3	Literaturverzeichnis	13

Anhang A: Messprotokoll aus dem Praktikum

1 Einleitung

Die klassische Elektrodynamik beschreibt neben dem Verhalten von elektromagnetischen Wellen, das Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern und die Dynamik von geladenen Teilchen. Daher können viele Gesetze der Elektrodynamik in der modernen Technik angewendet werden.

In diesem Versuch soll das Verhalten von bewegten geladenen Teilchen im Magnetfeld und die „Ausbreitung“ von Magnetfeldern in Materie untersucht werden. Bewegte Ladungen können einerseits zum Erzeugen eines Magnetfeldes, andererseits für die Verrichtung von mechanischer Arbeit durch elektrische Energie genutzt werden. Hierbei spielen magnetische Felder eine vorrangige Rolle.

2 Physikalische Grundlagen

Im Folgenden sollen die für den Versuch wichtigen physikalischen Grundlagen vorgestellt und erläutert werden.

2.1 Das magnetische Feld

Jeder Magnet hat zwei Pole, einen Nord- und einen Südpol. Zwischen zwei magnetischen Körpern wirkt eine von der Lage der Pole abhängige Kraft. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, wobei sich gegensätzliche Pole anziehen. In einem Raum in dem ein Magnet eine Kraft ausübt, gibt es ein magnetisches Feld. Die Feldlinien geben dabei die Richtung der Kraft auf einen „Nordpol“ an. Ein ortsfester Probemagnet würde sich in einem magnetischen Feld parallel zu den Feldlinien ausrichten. Die Feldlinien eines Magneten bilden geschlossene Linien, die außerhalb des Magneten vom Nord- zum Südpol verlaufen. Sind die Feldlinien parallel angeordnet, so spricht man von einem homogenen Magnetfeld.

2.1.1 Erzeugung von magnetischen Feldern

Neben Magneten, die aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Struktur ein magnetisches Feld ausbilden, gibt es noch den Elektromagnetismus. In der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters ist immer ein magnetisches Feld zu finden. Bei einem geraden Leiter bilden die Feldlinien des magnetischen Feldes konzentrische Kreise um den Leiter. Wird ein Leiter allerdings zu einer Spule aufgewickelt, so ergibt sich im Inneren der Spule ein nahezu homogenes Feld, während das äußere Feld dem Feld eines Stabmagneten ähnelt.

2.1.2 Charakteristische Größen

Die Stärke eines magnetischen Feldes kann durch die Kraft, beziehungsweise das Drehmoment auf einen Probemagneten im magnetischen Feld bestimmt werden. Die Richtung der magnetischen Feldstärke (H) ist immer durch die Richtung der Feldlinien gegeben. Im Inneren einer Spule (oder eines Magneten) verläuft das magnetische Feld vom Süd- zum Nordpol. Die magnetische Feldstärke des homogenen Feldes im Inneren einer Spule lässt sich durch die Windungszahl der Spule (N), durch den fließenden Strom (I) und die

Länge der Spule (l) bestimmen. Es ist:

$$H = \frac{IN}{l} \quad [H] = 1 \frac{A}{m} \quad (1)$$

Neben der Beschreibung des magnetischen Feldes durch die magnetische Feldstärke kann die Stärke eines magnetischen Feldes auch durch die Induktionwirkung eines sich aufbauenden Feldes auf eine Probenspule beschrieben werden. Für eine Probenspule im Magnetfeld mit der Leiterquerschnittsfläche (A) und der Windungszahl (N) gilt so für die magnetische Flussdichte B :

$$B = \int \frac{U(t)}{NA} dt \quad [B] = 1 \frac{V \cdot s}{m^2} = 1T \quad (2)$$

Hierbei stellt $U(t)$ die zur Zeit t induzierte Spannung dar. Beim Ein- oder Ausschalten des magnetischen Feldes wird so ein Spannungsstoß der Größe $\int U(t)dt$ in die Spule induziert. Die magnetische Flussdichte und die magnetische Feldstärke haben in einem Feld die gleiche Richtung und sind im Vakuum über die magnetische Feldkonstante (μ_0) miteinander betragsmäßig verknüpft. Es ist:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \quad (3)$$

Die auf eine Flächeneinheit senkrechte und normierte magnetischer Flussdichte wird als magnetischer Fluss (Φ) bezeichnet. Es lässt sich der magnetische Fluss berechnen als:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{f} \quad [B] = 1v \cdot s = 1Wb \quad (4)$$

2.1.3 Magnetische Felder und Materie

Bringt man Materie in das magnetische Feld ein, so verändert sich das magnetische Feld in der Materie. Dieses Phänomen ist durch die Ausrichtung von permanenten oder induzierten magnetischen Momenten der einzelnen Atome und Moleküle der in das magnetische Feld eingebrachten Materie zu erklären. Dabei ist die Änderung der magnetischen Feldstärke bzw. Flussdichte abhängig vom eingebrachten Stoff. Für einen bestimmten Stoff kann eine dimensionslose Materialkonstante μ_r , die relative Permeabilität (auch Permeabilitätszahl) bestimmt werden, die durch die Änderung der magnetischen Feldstärke charakterisiert ist. Für das Magnetfeld gilt nun die Beziehung:

$$B_{Materie} = \mu_r B_{Vakuum} = \mu_r \mu_0 H_{Vakuum} \quad (5)$$

Makroskopisch kann die Änderung der magnetischen Flussdichte durch die Magnetisierung \vec{M} des Stoffes beschrieben werden. Sie ist für einen Stoff proportional zur Magnetfeldstärke und zeigt in die selbe Richtung. Es ist:

$$\vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H} \quad \Rightarrow \quad \vec{B} = \mu_0(\vec{H}_{Vak} + \vec{M}) \quad (6)$$

Für unterschiedliche Stoffe nimmt μ_r unterschiedlich große Werte an. So lassen sich verschiedene Stoffgruppen einteilen:

- Paramagnetische Materialien besitzen eine nur geringe relative Permeabilität, die allerdings größer als 1 ist. Sie verstärken das magnetische Feld nur schwach und lassen sich nur in Feldern mit relativ großer Feldstärke magnetisieren. Paramagnetische Stoffe sind beispielsweise Platin, Aluminium und Luft.

- Ferromagnetische Materialien sind Stoffe, die eine sehr hohe Permeabilität besitzen, als $\mu_r \gg 1$ ist. Sie verstärken das magnetische Feld erheblich. Ab einer bestimmten stoffabhängigen Temperatur werden sie allerdings zunehmend paramagnetisch. Bei ferromagnetischen Stoffen ist zur Magnetisierung eine bestimmte Arbeit nötig, so dass die Magnetisierung von ferromagnetischen Stoffen zur magnetischen Flussdichte „verschoben“ ist. Stellt man die Magnetisierung von Ferromagneten in Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte dar, so ergibt sich die Hystereschleife. Die Polarisation von Ferromagneten ist für große Feldstärken nicht linear, sondern durch einen Maximalwert begrenzt, so dass für die Permeabilitätszahl für kleine Feldstärken $\mu_r \sim H$ und für große Feldstärken $\mu_r \sim 1/H$ gilt. In der Literatur sind meistens die Maximalwerte der Permeabilität angegeben, die nur für kleine Feldstärken gelten. Beispiele für ferromagnetische Stoffe sind Eisen oder Nickel. Ferromagneten behalten einen Teil der Polarisation nach dem Entfernen aus dem Magnetfeld.
- Ferrimagnetische Stoffe sind Stoffe deren Permeabilität zwar größer als die der Paramagneten ist, allerdings kleiner als die der Ferromagneten. Makroskopisch betrachtet ähneln die Eigenschaften der Ferrimagneten denen der Ferromagneten.

2.1.4 Magnetische Durchflutung

Für ein Wegintegral über einen geschlossenen Weg ergibt sich wegen $\text{rot } E = 0$ im elektrischen Feld $\oint E ds = 0$. Im magnetischen Feld gilt diese Beziehung nicht unbedingt. Es gilt das Ampèresche Gesetz:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = I \quad \Rightarrow \quad \oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I \quad (7)$$

Nach dem Ampèreschen Gesetz ist das geschlossene Randintegral über die magnetische Feldstärke gleich dem Strom, der durch eine vom Integrationsweg umschlossene Fläche fließt.

2.1.5 Magnetische Spannung und Widerstand

Im elektrischen Feld wurde die Spannung zwischen zwei Punkten durch ein Linienintegral über das elektrische Feld definiert. In Anlehnung an die elektrische Spannung wird die magnetische Spannung V durch

$$V = \int_{p_1}^{p_2} \quad [V] = 1A \quad (8)$$

definiert, obgleich die Einheit der magnetischen Spannung Ampere und nicht Volt ist. Für eine Spule der Windungszahl N , durch die ein Strom der Stärke I fließt, und der Länge l wird die magnetische Spannung definiert als das Produkt der magnetischen Feldstärke H und der Länge der Spule. Es ist die magnetische Spannung gegeben durch:

$$V = Hl = IN \quad (9)$$

Ist die Feldstärke entlang eines Integrationswegs nicht konstant durch beispielsweise ein anderes Medium, so ergibt sich die magnetische Spannung als die Summe der Einzelspannungen.

Als Analogon zur Definition eines elektrischen Widerstands in einem Stromkreis, kann in einem magnetischen „Kreis“ ein Widerstand definiert werden. Der magnetische Widerstand R_m ist hierbei der Proportionalitätsfaktor zwischen der magnetischen Spannung V und der magnetischen Flussdichte Φ . Es gilt:

$$V = R_m \Phi \quad [R_m] = 1 \frac{A}{V \cdot s} \quad (10)$$

Für den magnetischen Widerstand gelten analog zur Elektrodynamik die Gesetze für Parallel- und Reihenschaltung. Für einen „magnetischen Leiter“ der Länge l und der Querschnittsfläche A ergibt sich der magnetische Widerstand zu:

$$R_m = \frac{V}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{B \cdot A} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (11)$$

2.2 Bewegte Ladungen im magnetischen Feld - Lorentzkraft

Während ruhende Ladungen vom Magnetfeld nicht beeinflusst werden, wirkt auf bewegte Ladungen im Magnetfeld eine Kraft, die Lorentzkraft. Diese ist proportional zu der Ladung q , der relativen Geschwindigkeit v und der magnetischen Flussdichte am Ort der Ladung. Die Richtung der Lorentzkraft steht sowohl auf der Bewegungsrichtung der Ladung, als auch auf der Richtung der magnetischen Flussdichte senkrecht. Mathematisch ist die Lorentzkraft gegeben durch:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (12)$$

Für einen Leiter der Länge l senkrecht zu einem magnetischen Feld, durch den ein Strom I fließt, gilt für den Betrag der Lorentzkraft, da $q \cdot v = I \cdot l$:

$$F = q \cdot v \cdot B = I \cdot l \cdot B \quad (13)$$

3 Versuch und Auswertung

Ziel dieses Versuches ist die qualitative Bestimmung der Lorentzkraft auf einen Leiter im homogenen Magnetfeld, sowie die Überprüfung des Gesetzes für den magnetischen Widerstand. Hierzu werden Messungen mit einer Stromwaage vorgenommen.

3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Fall besteht die Stromwaage aus einem felderzeugenden Elektromagneten, mit einem ferromagnetischen offenen Ringkern (Länge l). Die felderzeugenden Spulen (Windungszahl N) sind links und rechts von einem Spalt mit variabel einstellbarer Breite angeordnet. In den Spalt wird eine Messspule (Windungszahl n) teilweise eingebracht. Diese ist zur Bestimmung der Lorentzkraft an einer Waage befestigt. Beide Spulen sind an regelbare Stromquellen angeschlossen. Abbildung 1 stellt die verwendete Stromwaage schematisch dar. Die Regulierung des Spulenstroms der felderzeugenden Spulen (I_{Mg}) war in diesem Fall direkt möglich, die Einstellung des Stroms an der Messspule I_{Sp} wurde hier durch einen regelbaren Widerstand in Verbindung mit einem Amperemeter bewerkstelligt.

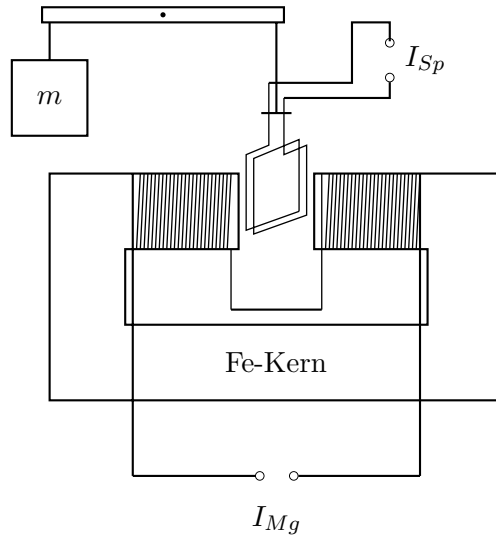


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der verwendeten Stromwaage.

Das Feld der Stromwaage Im Inneren des Eisenkerns bildet sich durch die felderzeugenden Spulen ein homogenes Magnetfeld. Für das Linienintegral entlang einer Feldlinie des erzeugten Feldes gilt nun Gleichung (9). Die magnetische Spannung lässt sich auch als Summe der Spannungen der Einzelkomponenten schreiben, so dass gilt:

$$N \cdot I = \int H \cdot ds = l \cdot H_{Fe} + d \cdot H_{Luft} \quad (14)$$

Die magnetische Flussdichte B im Spalt lässt sich nun mit Hilfe von Gleichung (5) bestimmen als:

$$B = \frac{N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \mu_{Fe}}{d \cdot \mu_{Fe} + l} \quad (15)$$

Aufgrund der „Quellenfreiheit“ der magnetischen Flussdichte ($\text{div } B = 0$) müssen alle auf der einen Seite austretenden Feldlinien wieder auf der anderen Seite des Spaltes in den Eisenkern eintreten. Im Inneren des Eisenkerns findet man auf beiden Seiten des Spaltes ein homogenes Feld vor, so dass auch im Spalt von einem homogenen Feld ausgegangen werden kann (ein senkrecht B -Feld wird nicht „gebrochen“).

Für kleine Spaltabstände wird also die magnetische Flussdichte im Spalt durch den Eisenkern verstärkt. Vergrößert man den Abstand, so erwartet man ein relativ schnelles Abfallen der magnetischen Flussdichte.

Lorentzkraft in der Stromwaage Betrachtet man eine Leiterschleife im begrenzten homogenen Magnetfeld (siehe Abb. 2) durch die ein Strom I_{Sp} fließt, so ergibt sich die Gesamtkraft auf die Leiterschleife als Summe der Einzelkräfte (F_1, F_2, F_3). Hierbei sind die Kräfte F_1 und F_2 betraglich gleich, so dass nur noch die Kraft F_2 bestimmend für die Gesamtkraft ist. Für den Betrag von F_2 gilt nun Gleichung (13). Die Richtung der Kraft ist je nach angelegter Stromrichtung nach oben oder wie im Fall des Experiments nach

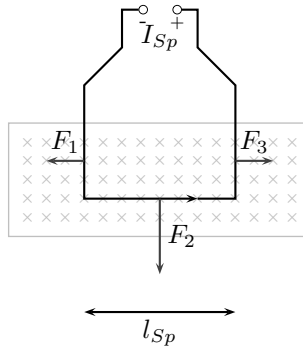


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Leiterschleife im homogenen begrenzten Magnetfeld. Das Magnetfeld (grau) steht hierbei senkrecht zur Zeichnungsebene und ist in „in die Zeichnung“ gerichtet.

unten.

Betrachtet man nun statt des Leiters eine Spule (Windungszahl n_{Sp}), von der nur der untere Teil in das Magnetfeld eingebracht wird, ergibt sich die Gesamtkraft als das n_{Sp} -fache der Kraft auf einen einzelnen Leiter. Es ist:

$$F_L = I \cdot l_{Sp} \cdot B \cdot n_{Sp} \quad (16)$$

Versuchsdurchführung Der Versuch gliedert sich Inhaltlich in zwei Teile. Im ersten Teil soll die Linearität der Lorentzkraft zu der Stromstärke I_{Sp} in einem festen, aber unbekanntem Magnetfeld nachgewiesen werden. Hierzu wird an die felderzeugenden Spulen ein Strom I_{Mg} angelegt, der konstant gehalten wird. Nun kann durch die Lorentzkraft für verschiedene Stromstärken I_{Sp} mit Hilfe der Waage gemessen werden (vgl Abb 1).

Im zweiten Teil des Versuchs soll der Zusammenhang der magnetischen Flussdichte B und dem felderzeugenden Strom I_{Mg} und Spaltabstand d untersucht werden. Hierbei wird durch die Lorentzkraft auf die eingebrachte Spule, die magnetische Flussdichte berechnet. Aus der so gemessenen Flussdichte (für verschiedene I_{Mg} und d) können die Zusammenhänge für Felderzeugung und magnetischen Widerstand dargestellt, sowie die Permeabilitätskonstante bestimmt werden.

3.2 Messergebnisse und Auswertung

Die Messungen an der Stromwaage wurden für die Bestimmung des felderzeugenden Stroms I_{Mg} direkt an der erzeugenden Spannungsquelle abgelesen. Wegen des relativ großen Messbereich des eingebauten Ampèremeters (und entsprechender Skala) ist die Unsicherheit der Messwerte mit $\delta I_{Mg} = 0.2A$ anzugeben. Für die Messung des Probenspulenstroms wurde ein digitales Ampèremeter verwendet, so dass die Unsicherheit der Messwerte als $\delta I_{Sp} = 0.01A$ angenommen werden kann. Die Bestimmung der Kraft auf die Probenspule wurde durch „auswiegen“ bestimmt. Für diese Messung kann die Unsicherheit durch die verwendeten Gewichte und Ungenauigkeiten in der Waage auf $\delta m = 5g$ geschätzt werden. Die gemessenen Werte können dem Messprotokoll entnommen werden.

3.2.1 Lorentzkraft

Zur Bestimmung der Lorentzkraft wurde der Spaltabstand $d = 15.0(5)mm$ und der felderzeugende Strom $I_{Mg} = 5.0(2)A$ konstant gewählt. Tabelle 1 stellt die Werte der ersten Messung dar.

I_{Sp}/A	0.38(1)	0.78(1)	1.16(1)	1.58(1)	1.93(1)	2.31(1)	2.69(1)	3.20(1)	3.75(1)	4.045(1)
m/g	50(5)	100(5)	150(5)	200(5)	250(5)	300(5)	350(5)	414(5)	485(5)	526(5)
F_L/N	0.49(5)	0.98(5)	1.47(5)	1.96(5)	2.45(5)	2.94(5)	3.43(5)	4.061(5)	4.75(5)	5.16(5)

Tabelle 1: Messwerte und errechnete Lorentzkraft

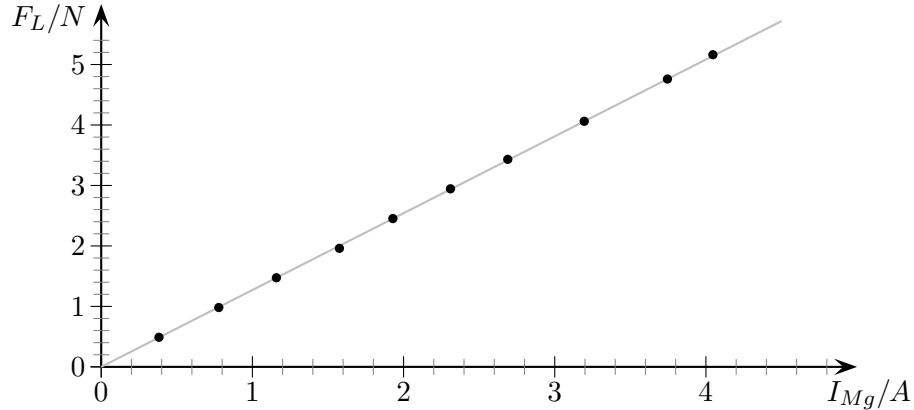


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Messergebnisse aus Tabelle 1

Die in Tabelle 1 errechneten Werte sind in Abbildung 3 grafisch dargestellt. Die eingezeichnete Gerade ergibt sich durch lineare Regression unter der Annahme, dass die Lorentzkraft für keinen Strom verschwindet. Für die Messwerte ergibt sich so der lineare Zusammenhang:

$$F_L(I_{Sp}) = a \cdot I_{Sp} \quad a = 1.27(7) \frac{N}{A}$$

Die Abweichung von a ergibt sich durch die Fehlerfortpflanzung der Messwertfehler.

3.2.2 Magnetfeld und Strom

Nun soll die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte vom felderzeugenden Strom untersucht werden. Die Feldstärke wird mit Hilfe der Lorentzkraft gemessen. In diesem Fall ergibt sich die Feldstärke durch die Masse m und der angelegten Spannung. Es ist:

$$F_G = F_L \quad \Rightarrow \quad B = \frac{m \cdot g}{I \cdot l \cdot n} \quad (17)$$

Tabelle 2 stellt die gemessenen und errechneten Werte dar. Eine grafische Darstellung der Werte ist in Abbildung 4 zu sehen. Es sind für verschiedene Spaltabstände jeweils die Regressionsgeraden eingezeichnet.

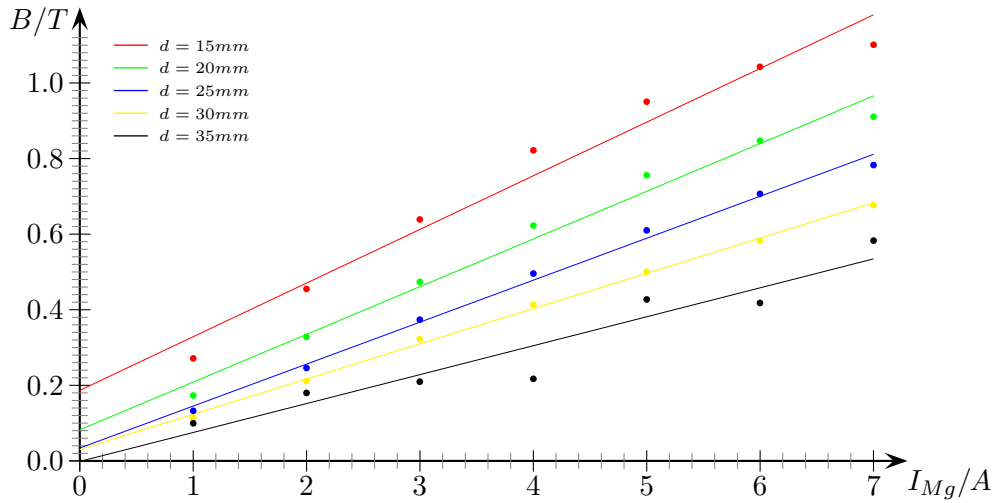


Abbildung 4: Grafische Darstellung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit des felderzeugenden Stroms für verschiedene Spaltabstände

3.2.3 Magnetfeld und Abstand

Nach den Herleitungen des magnetischen Widerstandes muss die magnetische Flussdichte im Spalt bei konstantem felderzeugenden Strom abnehmen. Die Abhängigkeit der Flussdichte zum Reziprokwert der Spaltbreite ist in Abbildung 5 dargestellt. Hier stellt sich der erwartete lineare Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte und reziproker Spaltbreite heraus.

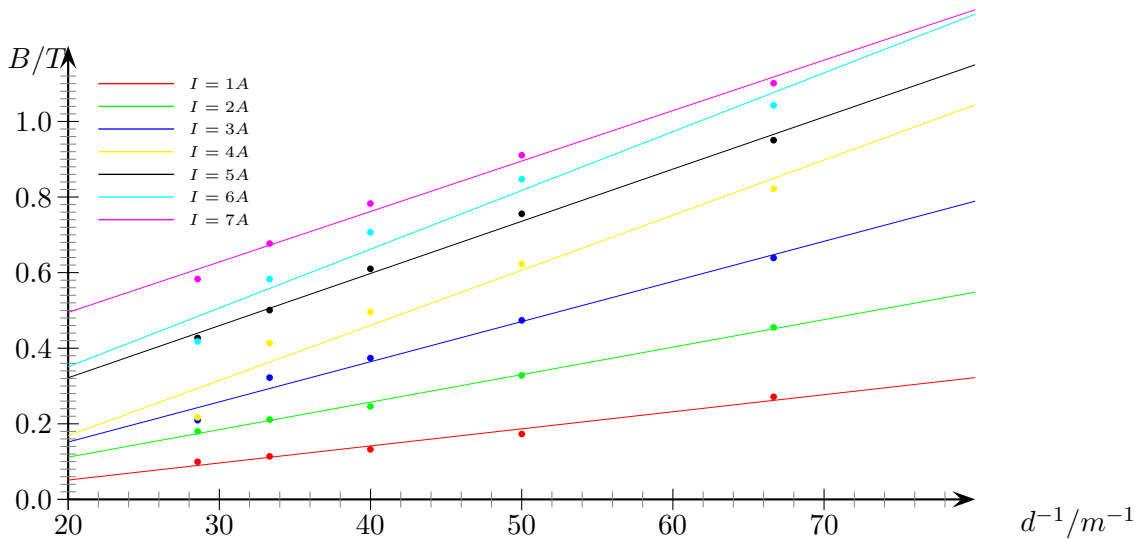


Abbildung 5: Grafische Darstellung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit des Spaltabstands für verschiedene felderzeugende Ströme

3.2.4 Bestimmung von μ_0

Die Bestimmung der Feldkonstante μ_0 kann in diesem Fall mit Gleichung (15) bewerkstelligt werden. Hierzu kann die magnetische Flussdichte mit der Annahme $d \gg \frac{l}{\mu_{Fe}}$ genähert werden als:

$$B \approx \frac{\mu_0 N_{Mg} I_{Mg}}{d} \Rightarrow \mu_0 = \frac{B \cdot d}{N_{Mg} \cdot I_{Mg}} \quad (18)$$

In diesem Fall gilt diese Näherung, da die relative Permeabilität von Eisen relativ groß ist ($\mu_{Fe} > 700$).

Mit den Werten aus Tabelle (2) ergibt sich für die magnetische Feldkonstante:

$$\bar{\mu}_0 = 1.00 \pm 0.12 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

Der eigentliche Literaturwert von $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \approx 1.256 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ liegt knapp nicht mehr im doppelten Vertrauensintervall des experimentell bestimmten Wertes.

	1.Durchgang		2.Durchgang		3.Durchgang		4.Durchgang		5.Durchgang	
	$d = 15mm$		$d = 20mm$		$d = 25mm$		$d = 30mm$		$d = 35mm$	
	$I_{Sp} = 3.96(1)A$		$I_{Sp} = 3.99(1)A$		$I_{Sp} = 3.99(1)A$		$I_{Sp} = 3.95(1)A$		$I_{Sp} = 3.95(1)A$	
I_{Mg}/A	m/g	B/T	m/g	B/T	m/g	B/T	m/g	B/T	m/g	B/T
1	148	0.2716(1)	95	0.1730(1)	73	0.1329(1)	62	0.1141(1)	54	0.0993(1)
2	248	0.4551(1)	180	0.3278(1)	135	0.2459(1)	115	0.2116(1)	98	0.1803(1)
3	348	0.6386(1)	260	0.4735(1)	205	0.3734(1)	175	0.3219(1)	114	0.2097(1)
4	448	0.8221(2)	342	0.6229(1)	272	0.4954(1)	225	0.4139(1)	118	0.2171(1)
5	518	0.9505(2)	415	0.7558(1)	335	0.6101(1)	272	0.5004(1)	232	0.4268(1)
6	568	1.0423(2)	465	0.8469(2)	388	0.7066(1)	317	0.5832(1)	227	0.4176(1)
7	600	1.1010(2)	500	0.9106(2)	430	0.7831(1)	368	0.6770(1)	317	0.5832(1)

Tabelle 2: Messwerte der Lorentzkraft in Abhängigkeit des felderzeugenden Stroms und des Spaltabstands und der daraus resultierende Wert für die magnetische Flussdichte.

3.3 Fehlerdiskussion

An den Diagrammen, sowie der Berechnung der Feldkonstante μ_0 ist klar ersichtlich, dass viele der Messwerte einen Fehler aufweisen. Bei den Messungen zur Lorentzkraft ist eine Aussage über einen Fehler nicht möglich. Allerdings zeigt das Diagramm, dass die Messwerte keinen großen Fehler aufweisen, so dass der lineare Zusammenhang gut zur Geltung kam.

Größere Fehler sind an den Diagrammen und Messwerten der übrigen Messungen zu erkennen. Beim Diagramm der Abbildung (4) solle der Schnittpunkt aller Approximationsgeraden im Ursprung des Koordinatensystems liegen. Bei den Messungen des B-Feldes in Abhängigkeit der Spaltbreite sind die Abweichungen von den Regressionsgeraden für hohe Ströme relativ groß, der lineare Zusammenhang ist allerdings erkennbar. Auch hier müssten sich die Regressionsgeraden für unendlich große Spaltbreiten (im Schaubild beim Nullpunkt) treffen.

Gründe für die entstanden Fehler sind unter anderem:

- Der felderzeugende Strom wurde mit einem in der Stromquelle eingebauten Messgerät bestimmt. Das Ampèremeter hatte eine Skaleneinteilung von $0.2A$, was die Messung eines exakten Stroms sehr fehleranfällig macht.

- Die Stromquelle zeigte beim Erzeugen von hohen Strömen große Schwankungen im erzeugten Strom. Grund dafür könnte ein Fehler in der Spannungsquelle oder Schwankungen des Stromnetzes sein, was sich während des Versuchs kaum vermeiden lässt.
- Der Fehler der Kraftmessung durch die verwendete Waage und Gewichte ist vermutlich größer als angegeben. Die Waage wurde vor dem Experiment zwar mit Zusatzgewichten austariert, dennoch ergeben sich durch das Auswiegen relativ große Abweichungen.
- Der Spulenstrom schwankte während einer Messreihe nur im angegebenen Intervall, was in den Rechnungen berücksichtigt wurde. Trotzdem muss von einem kleinen Messfehler für die Lorentzkraft bzw das B-Feld ausgegangen werden.
- Die Abweichung der Spaltbreiten ist nicht bekannt. Die Spaltbreite führt aber schon bei kleiner Abweichung zu einem relativ großen Fehler. Dies ist allerdings nur bei der Messung der Feldkonstanten ausschlaggebend.
- Fehler und Abweichungen der „Literaturwerte „ von n_{Spule} , l_{Spule} sowie N_{Mg} sind nicht bekannt.
- Der Einfluss der Hysteresekurve des Eisenkerns lässt sich nur schwer abschätzen. Diese wurde nicht bestimmt und ist somit wahrscheinlich für einen kleinen Fehler verantwortlich.
- Die Feldkonstante wurde mit einer Näherung errechnet. Es ist wahrscheinlich, dass die Näherung zwar zutreffend ist, allerdings einer Korrekter bedarf. Diese hängt von Permeabilität und der Länge des Eisenkern ab, welche für den Versuch nicht bekannt waren.

4 Fragen und Antworten

1. Weshalb gilt in guter Näherung $\tilde{R} \approx \tilde{R}_{Luft}$?

Für den magnetischen Widerstand gilt wie für die elektrischen Widerstände, dass sich der Gesamtwiderstand bei einer Reihenschaltung als Summe der Einzelwiderstände ausdrücken lässt. Mit Gleichung (11) ergibt sich:

$$\tilde{R} = \tilde{R}_{Fe} + \tilde{R}_{Luft} = \frac{l}{\mu_0 \mu_{Fe} A} + \frac{d}{\mu_0 A}$$

Wie schon in der Herleitung zur Feldkonstante begründet ist $\frac{l}{\mu_{Fe}} \ll d$, so dass sich der magnetische Widerstand hauptsächlich durch den Luftwiderstand bestimmt wird. Der Widerstand des Eisenkerns ist somit zu vernachlässigen. Im Grunde entspricht diese Näherung der Näherung von Gleichung (18).

2. Ist die Flussdichte B linear zu I_{Mg} ? Die magnetische Flussdichte ist im Vakuum eine lineare Funktion vom erzeugenden Strom. Bringt man nun Materie in das Magnetfeld, so wird der eingebrachte Stoff magnetisiert. Bei paramagnetischen Stoffen ist die Magnetisierung eine lineare Funktion der magnetischen Feldstärke. Die magnetische Flussdichte verhält sich also linear zum erzeugenden Strom. Die Magnetisierung von

Ferromagneten ist für kleine Feldstärken nahezu linear, erreicht aber ab einer Sättigungsgrenze einen Maximalwert. Allerdings hängt die Magnetisierung vom Anfangszustand der Ferromagnete ab. Somit ist die magnetische Flussdichte für kleine Felder linear zum erzeugenden Strom, aber abhängig vom Anfangszustand der Ferromagnete. Für große Feldstärken nähert sich die Magnetisierung einem Maximalwert. Damit ist die magnetische Flussdichte nicht mehr linear zum erzeugendem Strom.

Als Antwort zur Frage ergibt sich also: Für paramagnetische Stoffe ist B nahezu linear zum erzeugenden Strom, für ferromagnetische Stoffe ist B für kleine erzeugende Ströme linear, allerdings kann nicht von $B(I = 0A) = 0T$ ausgegangen werden. Für große Ströme (und somit Felder) ist B nicht linear zum erzeugenden Strom.

3. Magnetische Flussdichte an Grenzflächen

An einem Übergang von zwei dielektrischen Medien gilt für das elektrische Feld, dass die Tangentialkomponente des elektrischen Feldes stetig ist. Dies folgt aus $\text{rot } \vec{E} = 0$. Analog dazu kann beim Übergang des magnetischen Feldes zwischen zwei Medien aus $\text{rot } \vec{H} = \vec{j}$ unter der Annahme, dass an der Übergangsfläche kein Strom fließt, also $\vec{j} = 0$, die Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke als stetig angenommen werden.

Für die dielektrische Verschiebung \vec{D} folgt beim Übergang zwischen zwei Medien, mit keiner zusätzlichen Flächenladung, also $\rho = 0$ an der Übergangsfläche aus $\text{div } \vec{D} = \rho = 0$ die Stetigkeit der Normalkomponenten. Für die magnetische Flussdichte gilt immer $\text{div } \vec{B} = 0$, da es keine magnetischen Monopole gibt. Somit ist die Normalkomponente der magnetischen Flussdichte stetig. Insgesamt gilt:

$$H_{\parallel}^{(1)} = H_{\parallel}^{(2)} \Rightarrow \frac{B_{\parallel}^{(1)}}{\mu_1} = \frac{B_{\parallel}^{(2)}}{\mu_2} \quad B_{\perp}^{(1)} = B_{\perp}^{(2)} \quad (19)$$

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

1	Schema Stromwaage	6
2	Leiterschleife im magnetischen Feld	7
3	Diagramm Lorentzkraft - Spulenstrom	8
4	Diagramm B-Feld - Spulenstrom	9
5	Diagramm B-Feld - Spaltabstand	9

5.2 Tabellenverzeichnis

1	Messwerte - Lorentzkraft	8
2	Tabelle der Messwerte	10

5.3 Literaturverzeichnis

- [Hal03] D.HALLIDAY, R.RESNICK, J.WALKER *Physik* WILEY-VCH GmbH&Co. KGaA 1.Auflage 2003
- [TBPhy] H.KUHLIN *Taschenbuch der Physik* Fachbuchverlag Leipzig 16.Auflage 1999
- [Dem05] W.DEMTRÖDER *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik* Springer 3.Auflage 2004
- [APScript] B.RUNGE *Versuchsanleitung zur Stromwaage*
- [WPEnz] Verschiedene *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie* <http://de.wikipedia.org>