

V308

Magnetfelder und Spulen

Antonia Joëlle Bock
antoniajoelle.bock@tu-dortmund.de

Rene-Marcel Lehner
rene.lehner@tu-dortmund.de

Durchführung: 3.12.2019 Abgabe: 10.12.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	5
3.1 Übersicht	5
3.2 Helmholtz-Spulenpaar	6
3.3 Kurze Spule	6
3.4 Lange Spule	6
3.5 Toroidspule mit Eisenkern	7
4 Auswertung	7
4.1 Helmholtzspule	7
4.2 Hysteresekurve	10
4.3 Spulen	12
4.3.1 Kurze Spule	12
4.3.2 Lange Spule	14
5 Diskussion	15
5.1 Allgemeines	15
5.2 Kurze und lange Spule	15
5.2.1 Lange Spule	15
5.2.2 Kurze Spule	16
5.3 Helmholtz-Spulenpaar	16
5.4 Toroidspule mit Eisenkern	16
Anhang: originale Messdaten	16
Literatur	19

1 Einleitung

Ziel des Versuchs ist es, die Magnetfelder von verschiedenen Spulen in unterschiedlichen Anordnungen zu messen. Dabei werden nicht nur die homogenen Bereiche, sondern auch Randeffekte untersucht. Außerdem wird die Hysteresekurve von Eisen mithilfe einer Toroidspule mit Eisenkern gemessen. Letztlich werden die Erwartungswerte aus der Theorie mit den tatsächlichen Messwerten abgeglichen.

2 Theorie¹

Theoretische Grundlagen für dieses Experiment sind das Biot–Savartsche Gesetz, der Hall-Effekt, elektromagnetische Induktion und Ferromagnetismus.

Magnetfelder bilden sich durch bewegte Ladungen, wie beispielsweise durch elektrischen Strom. Eine Quantifizierung der Feldstärke \mathbf{H} wird durch das Biot–Savart-Gesetz

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{ds \times r}{r^3} \quad (1)$$

gegeben, bei dem über die Leiterschleife Γ integriert wird. Für das Vakuum und Materialien, deren magnetische Momente aufgrund der Wärmebewegung statistisch verteilt sind, gilt der Zusammenhang

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (2)$$

für die magnetische Flussdichte \mathbf{B} . Dabei sind $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{(-7)} \text{ Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ die Permeabilitätskonstante und μ_r die materialabhängige, relative Permeabilität.

Die Untersuchung des Stoffmagnetismus, wie sie in diesem Versuch unter anderem vorgenommen wird, erfordert die Unterteilung in Para-, Dia- und Ferromagneten. Die relative Permeabilität μ_r von sowohl Para-, als auch Diamagneten ist eine konstante Zahl. Das bedeutet, dass sich das im Material durch die Stoffeigenschaften zusätzlich ausbildende Magnetfeld, die sogenannte Magnetisierung

$$\mathbf{M} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}_{\text{Materie}} - \mathbf{H}_{\text{Vakuum}} = \mathbf{H}_{\text{Vakuum}} (\mu_r - 1), \quad (3)$$

parallel zum äußeren Feld \mathbf{H} ist. Beim Diamagneten ist die Parallelität vielmehr eine Antiparallelität; das heißt, \mathbf{M} hat eine das Feld abschwächende Wirkung und der Magnet wird aus Bereichen hoher Feldstärke herausgestoßen. Daraus ergibt sich, dass $\mu_r - 1 < 0$, also $\mu_r < 1$ gelten muss.

Genau entgegengesetzt ist es beim Paramagneten: Hier gilt echte Parallelität, also $\mu_r - 1 > 0$ beziehungsweise $\mu_r > 1$, der Magnet hat eine das Feld verstärkende Wirkung und wird in Gebiete hoher Feldstärke hineingezogen.

Ferromagneten hingegen verhalten sich deutlich anders: Die relative Permeabilität ist keine Konstante, sondern vielmehr eine komplizierte Funktion des angelegten Feldes $\mathbf{H}_{\text{Vakuum}}$, die davon abhängt, in welchen Zuständen das Material welcher Magnetfeldstärke

¹Unter Verwendung der Quellen [1], [2], [3].

ausgesetzt war, und ist damit *zustandsabhängig*. Anhand einer Hysteresekurve, bei der die Magnetisierung \mathbf{M} auf das äußere Magnetfeld $\mathbf{H}_{\text{Vakuum}}$ aufgetragen wird, wird das Verhalten solcher Magneten im Folgenden erklärt.

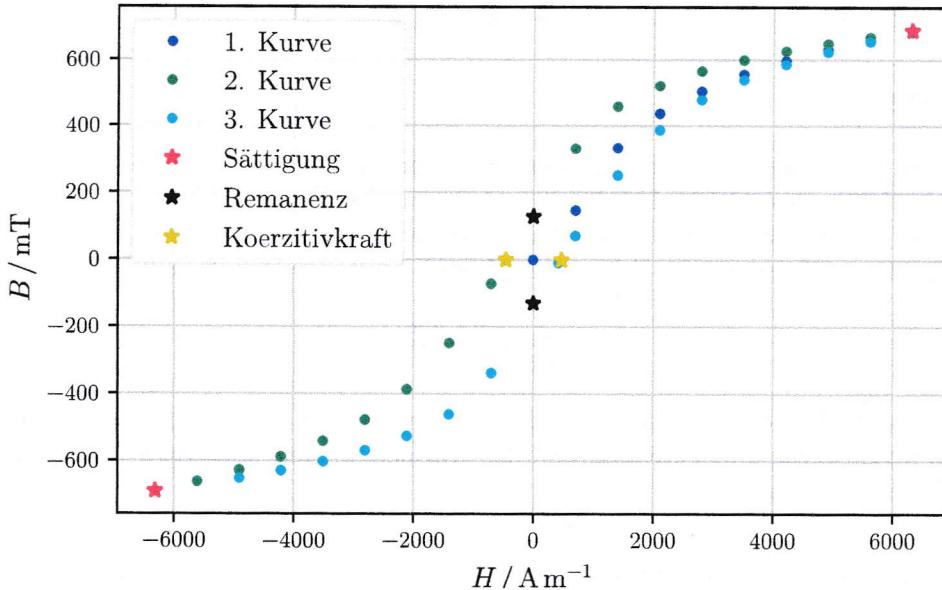


Abbildung 1: Hysteresekurve eines Ferromagneten.

Ferromagneten besitzen sogenannte *Weiß'sche Bezirke*, in denen die Teilchen das gleiche magnetische Dipolmoment besitzen. Ist der Magnet unmagnetisiert, ist deren Ausrichtung statistisch verteilt, also isotrop, und sie kompensieren sich, sodass $\mathbf{M} = 0$ gilt. Wird nun ein äußeres Magnetfeld $\mathbf{H}_{\text{Vakuum}}$ angelegt, richten sich bei steigender Magnetfeldstärke immer mehr Weiß'sche Bezirke entlang des Feldes aus, wodurch sich diese vergrößern. Dies geschieht bis zu einer Obergrenze; die *Sättigung* des Materials wird erreicht. Wird nun das äußere Magnetfeld wieder entfernt, bleibt eine Restmagnetisierung übrig, die sogenannte *Remanenz*. Erst bei Anlegen eines entgegengesetzten Magnetfeldes verschwindet die Magnetisierung. Die dafür notwendige Feldstärke ist die *Koerzitivfeldstärke*. Dasselbe kann nun in die andere Richtung durchlaufen werden: $\mathbf{H}_{\text{Vakuum}}$ wird im Negativen maximiert, bis der Ferromagnet in entgegengesetzter Richtung seine magnetische Sättigung erreicht, danach wieder bis ins Positive gesteigert, sodass der Magnet die Punkte der Remanenz und Koerzitivfeldstärke mit anderem Vorzeichen durchläuft.

Die Magnetfelder werden mit einer Hall-Sonde gemessen, die auf folgender Funktionsweise beruht: Die stromdurchflossene Messspitze wird in das entsprechende Magnetfeld gehalten. Da Magnetfelder auf bewegte Ladungen die Lorentzkraft F_L ausüben, werden alle Ladungsträger in die gleiche Richtung abgelenkt. Dies passiert solange, bis sich die Lorentzkraft mit der Coulombkraft für gleiche Ladungen kompensiert. Es hat sich eine

stabile Ladungskonfiguration ausgebildet, zwischen der sich die *Hall-Spannung* messen lässt. Daraus lässt sich dann das zu messende Magnetfeld berechnen. Die Hall-Sonde zeigt den Wert als die magnetische Flussdichte \mathbf{B} an. Es gibt verschiedene Modelle von Sonden; transversale und longitudinale. Diese unterscheiden sich alleinig durch die Orientierung der Messspitze. Die Wahl des Modells hängt also nur von der Geometrie der Messung ab. Ergänzend zu dem Biot–Savart'schen Gesetz seien hier noch einige Magnetfeldinstallativen vorgestellt, die für das Experiment von Bedeutung sind.

Mithilfe (1) ergibt sich für einen stromdurchflossenen Drahtring mit Radius R auf seiner durch den Kreismittelpunkt gehenden Symmetriechse (der Parameter x sei im Kreismittelpunkt Null)

$$|\mathbf{B}_{\text{Ring}}(x)| = B_{\text{Ring}}(x) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (4)$$

Werden zwei Drahtringe bei $x = d/2$ und $x = -d/2$ positioniert und in gleicher Richtung mit Strom durchflossen, gilt gemäß des Superpositionsprinzips:

$$B_d(x) = B_{\text{Ring}}(x - \frac{d}{2}) + B_{\text{Ring}}(x + \frac{d}{2}) \quad (5)$$

Das B-Feld innerhalb einer langen Spule ist nahezu homogen, sofern die Länge l sehr viel größer als der Radius R ist. Die Magnetfeldlinien innerhalb verlaufen parallel zur Symmetriechse und bilden außerhalb einen großen Bogen vom Ende zum Anfang der Spule, sodass geschlossene Feldlinien durch die Spule laufen. Innerhalb der Spule gilt abgesehen von Randeffekten

$$B_{\text{Sp}} = \mu_r \mu_0 \frac{n}{l} I \quad (6)$$

für die Flussdichte mit der Windungszahl n und dem Strom I . Wird die lange Spule zu einem Kreis gebogen, entsteht eine Toroidspule, außerhalb der das Magnetfeld Null ist und bei der die Randeffekte verschwinden. Für die Flussdichte gilt mit (6) und durch Ersetzung der Länge l durch den Umfang des Toroiden des Radius r_T :

$$B_T = \mu_r \mu_0 \frac{n}{2\pi r_T} I \quad (7)$$

3 Durchführung

3.1 Übersicht

Es werden insgesamt 4 Spulen untersucht. Ein Helmholtz-Spulenpaar, eine lange und eine kurze Spule, und eine Toroidspule mit Eisenkern. Für die ersten drei Spulen(anordnungen) wird ein konstanter Strom eingestellt, um die erzeugten, magnetischen Felder auf Homogenität und Randeffekte zu untersuchen. Für die Toroidspule wird der Strom variiert, um eine Hysteresekurve zu messen.

3.2 Helmholtz-Spulenpaar

Bei dem Helmholtz-Spulenpaar wird vor allem die physikalische Besonderheit untersucht, dass das Magnetfeld mittig zwischen den beiden Spulen und auf ihrer gemeinsamen, rotationssymmetrischen Achse, näherungsweise homogen ist. Dafür muss der Spulenabstand dem Radius der Spulen entsprechen.

Zunächst werden die Spulen auf der vorgegebenen Halterung ausgerichtet, wobei eine Spule fest, und die andere frei beweglich ist. Die Apparatur besitzt zusätzlich zu der unteren Schiene, auf der eine Spule frei verschoben werden kann, eine weitere Schiene oberhalb der Spulen, an der ein kleiner Kopf befestigt ist, an dem wiederum die Hall-Sonde befestigt werden kann. Beide Schienen besitzen ein eigenes, fest verbautes Lineal, sodass der Spulen- sowie der Sondenabstand genau eingestellt werden können. Es werden 3 Spulenabstände eingestellt, und zu jeder Einstellung ungefähr 15 Messwerte aufgenommen, indem die Hall-Sonde verschoben wird. Dabei wird die Hall-Sonde für die eine Hälfte der Messwerte innerhalb, für die andere Hälfte außerhalb des Spulenpaars gesetzt. Für diese Anordnung wird die transversale Hall-Sonde verwendet. Das quadratische Plättchen an der Spitze der Sonde wird möglichst mittig und orthogonal auf die gemeinsame Symmetriechse der Spulen platziert. Wenn alles eingestellt und ausgerichtet ist, werden die Spulen in Reihe verkabelt. Erst dann wird die Stromquelle eingeschaltet, wobei zu beachten ist, dass alle Regler auf Null gesetzt sind. Unter Berücksichtigung des maximal zulässigen Stroms wird die Spannung bzw. der Strom nun so weit erhöht, bis ein Wert unter dieser Grenze erreicht ist. Anschließend wird das Messgerät für das Magnetische Feld eingeschaltet. Über den Knopf **Range** kann eingestellt werden, welche Stellen des Messwertes angezeigt werden sollen. Nun werden die Messungen wie oben beschrieben vorgenommen.

3.3 Kurze Spule

Für die kurze Spule wird die longitudinale Hall-Sonde verwendet. Die Sonde wird an einem Stativ befestigt, an dem sich auch ein fest verbautes Lineal befindet. Die Spule wird auf das Lineal gelegt und die Sonde mithilfe der Stellschrauben des Stativs so ausgerichtet, dass sie möglichst mittig in die Spule zeigt, also wieder auf der Symmetriechse liegt. Es werden ungefähr 12 Messungen aufgenommen, die sich darin unterscheiden, wie weit die Sonde in die Spule zeigt. Es werden auch Bereiche außerhalb der Spule gemessen, um Randeffekte zu untersuchen. Das Anschließen an den Strom verhält sich ähnlich wie das des Helmholtz-Spulenpaars. Die kurze Spule wird an die ausgeschaltete Stromquelle angeschlossen. Daraufhin wird der Strom bei Null-geschalteten Reglern eingeschaltet und dann so weit erhöht, bis der Strom unter der Maximalstromgrenze der Spule liegt. Daraufhin werden die Messungen aufgenommen.

3.4 Lange Spule

Die Messungen an der langen Spule unterscheiden sich zum Aufbau der kurzen Spule nicht. Lediglich der einzustellende Maximalstrom ist unterschiedlich und genau zu beachten. Ansonsten bleiben Durchführung, die verwendete Hall-Sonde und die Anzahl der Messwerte gleich.

3.5 Toroidspule mit Eisenkern

Der Aufbau der Toroidspule ist vollständig vorbereitet. Es müssen lediglich Stromquelle und Messgerät eingeschaltet werden, wenn dies nicht schon ebenfalls vorbereitet wurde. Außerdem muss die Spule mit zwei Kabeln an die Stromquelle verbunden werden. Bei dem Aufbau ist eine transversale Hall-Sonde über der Spule befestigt, welche durch einen Spalt in Spule und Eisenkern führt und damit genau mittig ausgerichtet ist. Für die Messung einer Hysteresekurve muss der Strom zunächst bis unter die Maximalstromgrenze erhöht werden, um die Sättigung des Eisenkerns zu erreichen. Hier beginnt die Messung. Im Anschluss wird der Strom in Inkrementen gesenkt und gemessen. Welche Größe die Inkremente haben, ist frei zu wählen, sollten jedoch in einem plausiblen Bereich liegen. 1-Ampere-Schritte sind bei 10 Ampere Maximalstrom ausreichend. Der Strom wird also um jeweils 1 Ampere gesenkt, wobei zu beachten ist, dass die Stromänderung immer nur in eine Richtung erfolgt! Dies ist von außerordentlicher Wichtigkeit, da ansonsten die Hysteresekurve verfälscht ist. Der Strom sollte also langsam gesenkt werden, sodass der Strom nicht versehentlich um einen größeren Schritt gesenkt wird. Falls dies doch der Fall ist, notiert man diesen Messwert und macht den nächsten Schritt kleiner. Aber in keinem Fall wird der Strom erhöht. Wenn der Strom 0 erreicht, so notiert man diesen Messwert. Anschließend vertauscht man die Verkabelung der Spule. Nun wird der Strom von 0 in 1-Ampere-Schritten auf den zuvor gewählten Maximalstrom erhöht. Es sollte auch der Strom notiert werden, an dem das Magnetfeld 0 wird. Ist der Wert des Anfangstroms erreicht, wird der gesamte Prozess wiederholt. Die Messwerte bei umgekehrter Verkabelung erhalten ein negatives Vorzeichen. Mit diesen Messwerten zeichnet sich eine Hysteresekurve ab.

4 Auswertung

4.1 Helmholtzspule

Die x -Skala entspricht der an der Apparatur angebrachten Skala bei der Experimentdurchführung. Hierbei war durch $x = 0$ die innenliegende Spulenkante der linken Spule gegeben. Zur Vereinfachung der Auswertung wurde folgende Verschiebung der Achse vorgenommen, sodass sich idealerweise die Mitte der beiden Spulen bei $y = 0$ befindet:

$$y = x + \frac{b}{2} - \frac{d}{2}$$

Dabei entsprechen b der Spulenbreite und d dem jeweiligen Abstand der Messreihe.

Tabelle 1: Daten der verwendeten Doppelspule und Grundeinstellungen.

Windungszahl je Spule n	Spulendurchmesser $2R$	Spulenbreite b	Strom I
100	125 mm	33 mm	3,03 A

Mithilfe von Ausdruck (5) können die Daten in Abb. 2, 3a und 3b mit dem zu erwartenden Verlauf der Flussdichte verglichen werden.

Tabelle 2: Messreihe mit einem Abstand von $d = R = 62,5$ mm.

x / mm	y / mm	B / mT
7	-7,75	4,239
9	-5,75	4,231
10,5	-4,25	4,234
12	-2,75	4,260
13,5	-1,25	4,239
68,5	53,75	3,003
69	54,25	2,960
70	55,25	2,891
75	60,25	2,666
80	65,25	2,445
85	70,25	2,219
90	75,25	2,018
95	80,25	1,839
100	85,25	1,662

Tabelle 3: Messreihe mit einem Abstand von $d = 104$ mm.

x / mm	y / mm	B / mT
7	-28,5	3,091
16	-19,5	2,976
27	-8,5	2,887
33,5	-2	2,882
44	8,5	2,945
54,5	19	3,081
108,5	73	2,639
115	79,5	2,410
120	84,5	2,194
125	89,5	2,031
130	94,5	1,849
160	124,5	1,036
190	154,5	0,615
230	194,5	0,366

Tabelle 4: Messreihe mit einem Abstand von $d = 130$ mm.

x / mm	y / mm	B / mT
7	-41,5	2,754
22	-26,5	2,420
30	-18,5	2,288
45	-3,5	2,199
51	2,5	2,211
63	14,5	2,354
79	30,5	2,688
134	85,5	2,529
149	100,5	2,007
155	106,5	1,789
163	114,5	1,540
171	122,5	1,315
179	130,5	1,128
190	141,5	0,909
208	159,5	0,663

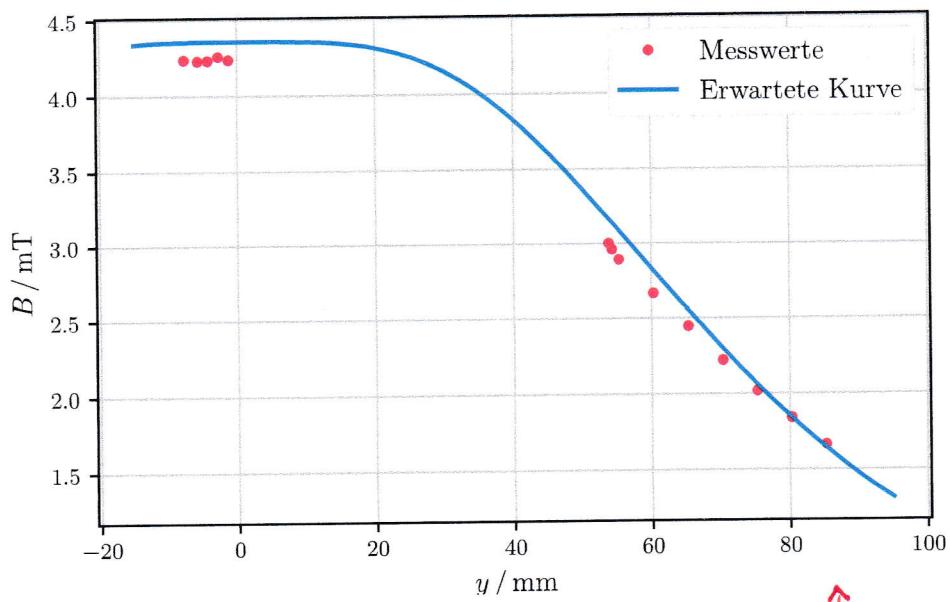
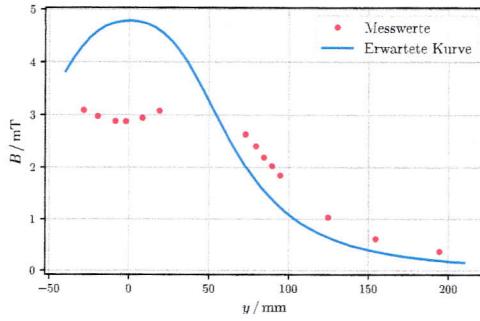
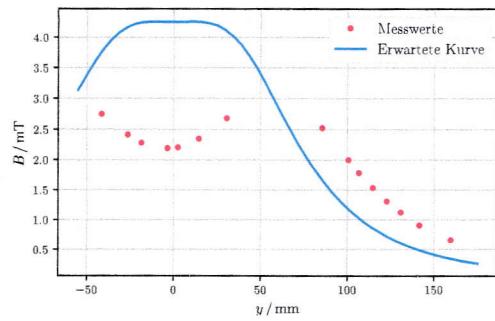


Abbildung 2: 1. Messung.

was genau ist eure erwartete Kurve? (Was habt ihr hier geplottet?)



(a) 2. Messung.



(b) 3. Messung.

Abbildung 3: 2. und 3. Messung.

4.2 Hysteresekurve

Gemessen wurden wie erläutert der Strom I durch die Spule und das Magnetfeld im Luftspalt der Spule. Um die Hysteresekurve zu zeichnen, muss die Magnetisierung M_{Fe} vom Eisenkern auf das durch die Spule verursachte Magnetfeld H aufgetragen werden. Dafür gelten die Zusammenhänge (3) und (7):

$$H = \frac{n}{2\pi r_T} I \quad (8)$$

$$\frac{B_{\text{gemessen}}}{\mu_0} = H + M_{\text{Fe}} \quad (9)$$

Die Daten der verwendeten Toroidspule sind:

$$n = 595$$

$$r = 13,5 \text{ cm}$$

Tabelle 5: Messwerte der Hysteresekurve.

I / A	$H / 10^3 \text{ A/m}$	$B_{\text{mess}} / \text{mT}$	$M_{\text{Fc}} / 10^3 \text{ A/m}$	$B_{\text{Fc}} / \text{mT}$
0,0	0	0	0,0	0,0
1,0	0,701	148	117,0	147,1
2,0	1,402	335	265,1	333,2
3,0	2,104	440	348,0	437,3
4,0	2,805	508	401,4	504,4
5,0	3,507	561	442,9	556,5
6,0	4,208	603	475,6	597,7
7,0	4,910	638	502,7	631,8
8,0	5,611	668	525,9	660,9
9,0	6,313	698	549,1	690,0
8,0	5,611	677	533,1	669,9
7,0	4,910	656	517,1	649,8
6,0	4,208	632	498,7	626,7
5,0	3,507	604	477,1	599,5
4,0	2,805	569	449,9	565,4
3,0	2,104	524	414,8	521,3
2,0	1,402	460	364,6	458,2
1,0	0,701	332	263,4	331,1
0,0	0	128	101,8	128,0
-0,65	-0,456	0	0,5	0,6
-1,0	-0,701	-71	-55,8	-70,1
-2,0	-1,402	-252	-199,1	-250,2
-3,0	-2,104	-390	-308,2	-387,3
-4,0	-2,805	-482	-380,7	-478,4
-5,0	-3,507	-546	-430,9	-541,5
-6,0	-4,208	-594	-468,4	-588,7
-7,0	-4,910	-634	-499,6	-627,8
-8,0	-5,611	-669	-526,7	-661,9
-9,0	-6,313	-698	-549,1	-690,0
-8,0	-5,611	-679	-534,7	-671,9
-7,0	-4,910	-658	-518,7	-651,8
-6,0	-4,208	-635	-501,1	-629,7
-5,0	-3,507	-607	-479,5	-602,5
-4,0	-2,805	-573	-453,1	-569,4
-3,0	-2,104	-529	-418,8	-526,3
-2,0	-1,402	-464	-367,8	-462,2
-1,0	-0,701	-339	-269,0	-338,1
0,0	0	-129	-102,6	-129,0
0,6	0,421	-8	-6,8	-8,5
0,67	0,473	0	-0,5	-0,6
1,0	0,701	72	56,6	71,1
2,0	1,402	253	199,9	251,2
3,0	2,104	390	308,2	387,3
4,0	2,805	482	380,7	478,4
5,0	3,507	544	429,3	539,5
6,0	4,208	592	466,8	586,7
7,0	4,910	630	496,4	623,8
8,0	5,611	663	521,9	655,9
9,0	6,313	693	545,1	685,0

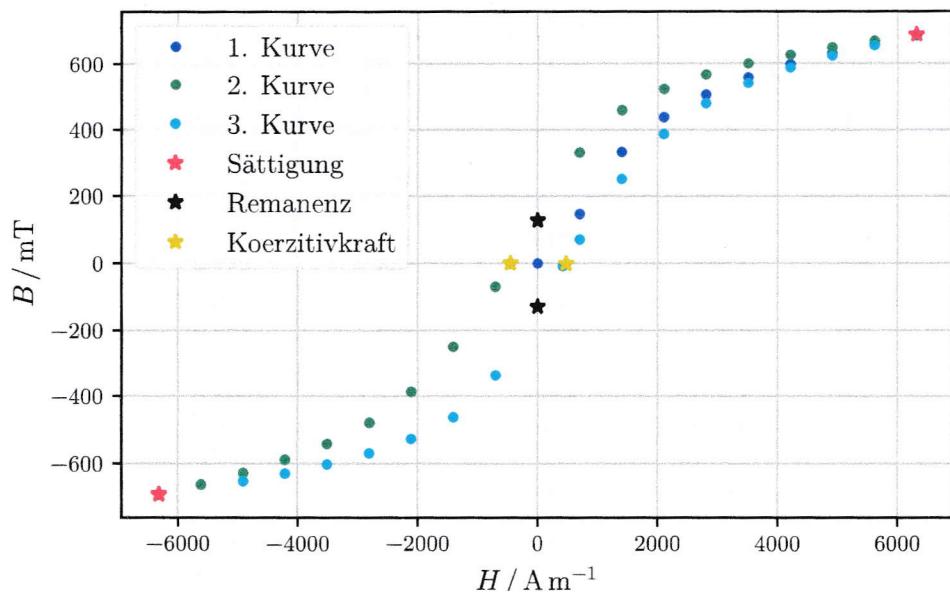


Abbildung 4: Messwerte der Hysteresekurve.

4.3 Spulen

Die in den Tabellen 6 und 7 ebenfalls aufgeführten y -Werte entsprechen einer der x -Achse gegenüber verschobenen Achse, sodass bei $y = 0$ am Anfang der Spule liegt. Das Spuleninnere liegt bei $y < 0$.

4.3.1 Kurze Spule

Verwendet wurde eine Spule mit der Windungszahl $n = 3400$, der Länge $l = 8,9 \text{ cm}$ und dem Durchmesser $d = 11,0 \text{ cm}$. Ein Strom von $I = 0,61 \text{ A}$ wurde angelegt.

Tabelle 6: Messwerte der kurzen Spule.

x / mm	y / mm	B / mT
0	-96	13,71
15	-81	16,68
30	-66	18,48
40	-56	18,81
50	-46	18,44
60	-36	17,40
73	-23	15,02
87	-9	11,82
100	4	8,82
110	14	6,90
121	25	5,23
135	39	3,68
151	55	2,52

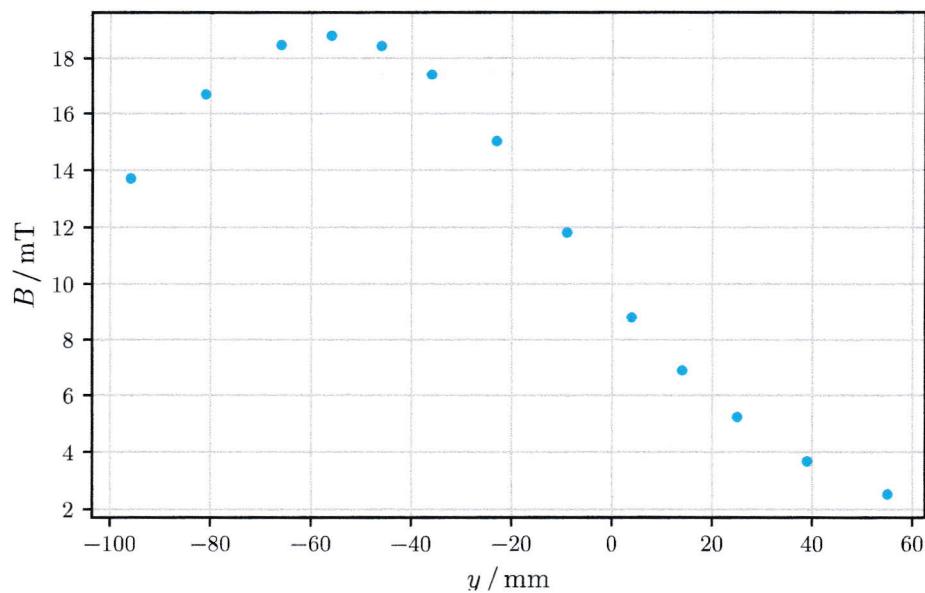


Abbildung 5: Kurze Spule.

4.3.2 Lange Spule

Die benutzte Spule hat eine Windungszahl von $n = 300$ und einen Durchmesser von $d = 41\text{ mm}$. Der Strom lag bei $I = 1,35\text{ A}$. Da weder die Länge der Spule in der Versuchsanleitung aufgeführt ist, noch die Länge bei der Versuchsdurchführung von den Experimentierenden aufgenommen wurde, kann der theoretisch zu erwartende Wert der Magnetfeldstärke im Spuleninneren an dieser Stelle nicht berechnet werden. Aus den Messdaten ergibt sich anhand von (6) eine Länge von etwa 15 cm, was in Augen der Verfasser ein realistischer Wert für die Spule zu sein scheint.

Tabelle 7: Messwerte der langen Spule.

x / mm	y / mm	B / mT
0	-79	3,076
5	-74	3,051
10	-69	3,020
15	-64	2,977
20	-59	2,916
31	-48	2,671
39	-40	2,318
47	-32	1,775
55	-24	1,174
64	-15	0,680
70	-9	0,501
80	1	0,317
100	21	0,177

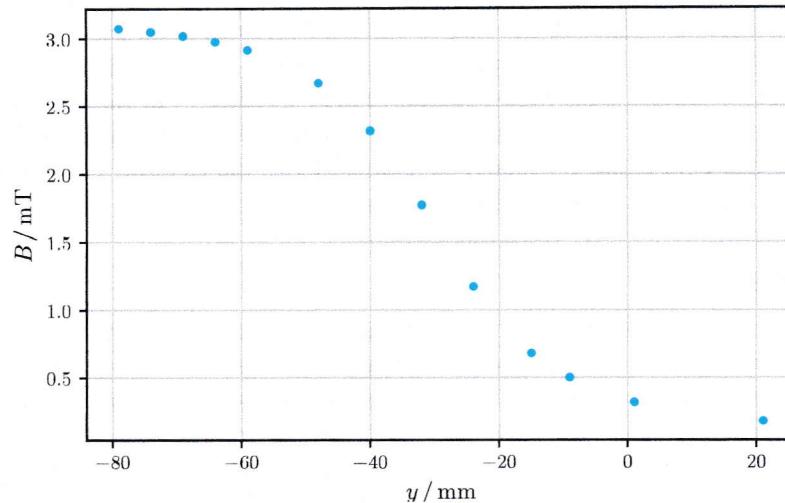


Abbildung 6: Lange Spule.

5 Diskussion

5.1 Allgemeines

Bei den Messungen mit der Hall-Sonde, die selbst ausgerichtet werden muss, hat das Messgerät bei abgeschalteter Stromquelle ab und an dennoch ein magnetisches Feld gemessen. Der Verdacht lag zunächst auf umliegende Geräte, die eingeschaltet waren. Dies war aber nicht die Ursache. Auch die Nachbarn haben einmal ihre Stromquelle abgestellt und das Gerät zeigte dennoch einen Messwert an - obwohl die Sonde z.b. von der Spule weg bewegt wurde. Es ist schwer zu sagen, inwieweit dieser systematische Fehler die Messwerte verfälscht. Das gemessene Feld war um die 70 mT groß. Für die Diskussion und die Auswertung wird dieser Fehler jedoch ignoriert.

5.2 Kurze und lange Spule

Für die folgenden Erwartungswerte wird mit der Magnetischen Feldkonstante $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ gerechnet.[4]

5.2.1 Lange Spule

Das Ausrichten der longitudinalen Sonde mit dem Stativ ist nicht sehr genau. Da die Spule per Hand auf dem Holzlineal herumgeschoben werden muss, wird alles nach Augenmaß ausgerichtet. Das ist bei dem verwendeten Messgerät und der Beschaffungen der Spulen aber vermutlich weitgehend ausreichend. Unklar ist, wo die longitudinale Sonde das magnetische Feld misst. Aus Abb. 6 ist zu erkennen, dass die Messwerte der langen Spule nicht aufhören zu steigen, je weiter die Sonde in die Spule geschoben wird. Allerdings

müssen hier auch die Randeffekte betrachtet werden. Am Spulenende fächern sich die Feldlinien trichterförmig auf. Das erklärt wiederum den weiteren Anstieg des Feldes. Nach 6 haben wir einen Erwartungswert von $B_{lS} = 3,393 \text{ mT}$, wenn wir für μ_r von Kupfer einen Wert von $0,9999936 = 1 - 6.4 \cdot 10^{-6}$ annehmen[4] und von einer Spulenlänge von 15 cm ausgehen. Die Abweichung zum Messwert 3,076 mT, welcher 8 cm innerhalb der Spule gemessen wurde, lässt sich mit den oben genannten Randeffekten erklären. Es ist auch erkennbar, dass das Feld zunächst relativ konstant bleibt, bis es dann zur Spulenöffnung hin stark abfällt. Auch dies macht die Randeffekte deutlich.

5.2.2 Kurze Spule

Die Kurze Spule weist in der Theorie keine Homogenität in ihrer Mitte auf. Aus Abb. 5 ist deutlich zu sehen, dass es nur einen Punkt gibt, an dem das magnetische Feld am stärksten ist, im Gegensatz zu einer langen Spule, bei der es ein längerer Abschnitt wäre. Die Homogenität im inneren einer Spule ist nur bei ausreichender Länge annähernd nachweisbar, sodass in diesem Fall die Randeffekte überwiegen. Der Erwartungswert ist nach 6, $B_{kS} \approx 29,28 \text{ mT}$, der gemessene Wert jedoch 18,81 mT. Dies ist bei einer Länge von nur 8,9 cm zu erwarten.

5.3 Helmholtz-Spulenpaar

Die Besonderheit des Helmholtz-Spulenpaars ist die näherungsweise Homogenität zwischen den beiden Spulen, wenn der Abstand dem Radius entspricht. In Abb. 2 ist diese Eigenschaft sehr gut zu erkennen. Nach 5 liegt der Erwartungswert bei

$$\frac{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0625^2 \cdot 3.03}{2 \cdot (2 \cdot 0,0625^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot 2 \cdot 200 \approx 0,004305 \quad \text{Einheiten?}$$

in Tesla, bzw. 4,305 mT. Dieser Wert liegt sehr nah an dem gemessenen Wert von 4,239 mT. Außerhalb des Spulenpaars treten wieder Randeffekte auf, sodass das Feld wie auch bei den anderen Spulen schnell stark abfällt. Bei den anderen Abständen der beiden Spulen ist das magnetische Feld immer noch näherungsweise homogen, nun aber in der Mitte ein wenig schwächer. Es zeichnen sich 2 Extremstellen ab, welche sich jeweils gleich verhalten wie die Extremalstelle der kurzen Spule.

5.4 Toroidspule mit Eisenkern

Die Messpunkte müssen in Abb. 4 nicht verbunden werden, um die Hysteresekurve deutlich zu machen. Es sind alle charakteristischen Punkte dieser Kurve ablesbar und entsprechen den Erwartungen. Die Werte errechnen sich aus 9 und sind gegenübergestellt in Tabelle 5.

Anhang: originale Messdaten

0308: Spulen und Magnetfelder

03.12.19

Spulenpaar: Abstand 62,5 mm $\Rightarrow I=3,05A, U=3,4V$

$x=0 \stackrel{\text{ab}}$ innere Spulenseite der linken Spule		$\textcircled{1}$ Absch. 104 mm	$\textcircled{2}$ 130 mm
x in mm	B in mT	x in mm	B in mT
12	4,260	108,5	45 2,199
7	4,239	115 2,140	7 2,754
13,5	4,239	120 2,194	22 2,620
10,5	4,234	125 2,031	30 2,288
-9,-	4,231	130 1,849	51 2,211
68,5	3,003	160 1,036	63 2,354
69	2,960	190 0,615	79 2,688
70	2,891	230 0,366	134 2,529
75	2,666	33,5 2,882	149 2,007
80	2,445	7 3,091	155 1,739
85	2,219	16 2,976	163 1,540
90	2,018	27 2,887	171 1,345
95	1,839	54,5 3,081	179 1,128
100	1,662	44 2,945	190 0,909

Hysteresekurve/Ringspule:

Strom I in A	B in mT	Strom I in A	B in mT
0	0	-8,0	-679
1,0	448	-7,0	-658
2,0	335	-6,0	-635
3,0	440	-5,0	-607
4,0	508	-4,0	-573
5,0	561	-3,0	-529
6,0	603	-2,0	-464
7,0	638	-1,0	-339
8,0	668	0	-129
9,0	698	0,6	-8
8,0	677	0,675	0
7,0	656	1,0	72
6,0	632	2,0	253
5,0	604	3,0	390
4,0	569	4,0	482
3,0	524	5,0	544
2,0	466	6,0	592
1,0	332	7,0	630
0	128	8,0	663
-0,65	0	9,0	693
-1,0	-71		
-2,0	-252		
-3,0	-390		
-4,0	-482		
-5,0	-546		
-6,0	-594		
-7,0	-634		
-8,0	-669		
-9,0	-698		

$$d = 27 \text{ cm} \quad (\text{Durchmesser})$$

FC.

Abbildung 7: Seite 1.

Lange Spule

x in mm	B in mT
64	0,680
55	-1,174
47	1,775
39	2,318
31	2,671
20	2,916
15	2,977
10	3,020
5	3,051
0	3,076
70	0,501
80	0,317
100	0,177

$x_0 = \text{Spulenende} + \text{Plastikrand} = 6,4 \text{ cm}$ auf dem Lineal

Rand: 1,5 cm | Strom $I_s = \text{const} \approx 1,35 \text{ A}$

Kurze Spule: $x_0 = 5,0 = 9,0 \text{ cm}$

x in mm	B in mT	Strom $I_s: 0,61 \text{ A}$ bei 37,2 V
80	13,71	
15	16,69	
30	18,48	Sondellänge: 6,5 cm
40	18,81	$n=3600$
50	18,44	Spulenkreis 8,9 cm
60	17,60	
73	15,02	
87	14,82	
88,100	8,82	
110	6,90	
121	5,23	
135	3,68	
151	2,52	

671

Abbildung 8: Seite 2.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme*. 4. Aufl. Springer, 2006.
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung V308: Spulen und Magnetfelder*. 2019.
- [3] David J. Griffiths. *Elektrodynamik. Eine Einführung*. 3. Aufl. Pearson Studium, 2011.
- [4] Ekbert Hering, Rolf Martin und Martin Stohrer. *Taschenbuch der Mathematik und Physik*. 6. Aufl. Springer Vieweg, 2017.

