

V308

Spulen und Magnetfelder

Kalina Toben

kalina.toben@tu-dortmund.de

Daniel Wall

daniel.wall@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.01.2019

Abgabe: 22.01.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	5
3.1 Magnetfeld einer langen und kurzen Spule	5
3.2 Magnetfeld eines Helmholtzspulenpaares	5
3.3 Bestimmung einer Hysteresekurve	6
4 Auswertung	6
4.1 Bestimmung der Magnetischen Flussdichte von zwei Spulen unterschiedli- cher Länge	6
4.2 Bestimmung der Magnetischen Flussdichte eines Helmholtzspulenpaares .	9
4.3 Bestimmung einer Hysteresekurve eines Eisenkerns mit Luftspalt in einer Toroidspule.	12
5 Diskussion	14
Literatur	14

1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden die Magnetfelder einer langen und kurzen Spule und eines Helmholtzspulenpaares gemessen. Außerdem wird anhand einer Ringspule eine Hysteresekurve erstellt.

2 Theorie

Magnetfelder werden induziert, wenn sich elektrische Ladungen bewegen. Die magnetische Feldstärke \vec{H} beschreibt ihre Richtung und ihren Betrag. Eine weitere Größe, welche Magnetfelder beschreibt, ist die magnetische Flußdichte \vec{B} . Ein Zusammenhang dieser beiden vektoriellen Größen besteht über die Permeabilität μ :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \cdot \vec{H},$$

wobei $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ die Vakuum-Permeabilität ist und μ_r die relative Permeabilität. Wird ein stromdurchflossener Leiter, wie zum Beispiel ein Draht, von einem Magnetfeld umgeben, kann man das Magnetfeld berechnen mit dem Biot-Savartschen Gesetz

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}.$$

Zur Berechnung des Magnetfeldes innerhalb einer langen stromdurchflossenen Spule, dient die Formel

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{n}{l} I, \quad (1)$$

mit Spulenlänge l , Windungszahl n und Spulenstrom I . Das Feld einer solchen Spule ist in der Mitte homogen und außerhalb inhomogen. Das Magnetfeld außerhalb einer Ringspule mit Radius r_T ist außerhalb Null. Innerhalb lässt sich das homogene Magnetfeld durch

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

bestimmen.

Um ein homogenes Magnetfeld zu erzeugen, wird ein Helmholtzspulenpaar genutzt, wie in Abbildung (1) zu sehen ist. Das Magnetfeld in der Mitte dieser Spulen mit Radius R und einer Windung ergibt sich zu

$$B(0) = \frac{\mu_0 I R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Dabei ist x der Abstand zum Mittelpunkt.

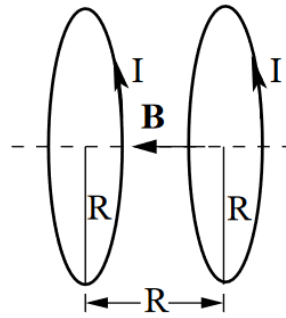


Abbildung 1: Anordnung der Helmholtz-Spulen. [1, S. 2]

Eine Form von Magnetismus in Materialien ist der Ferromagnetismus. Diese Materialien besitzen ohne äußeres Magnetfeld ein permanentes magnetisches Moment. Diese richten sich in Weiß'schen Bezirken parallel zueinander aus. Für ferromagnetische Materialien beschreibt die Hysteresekurve (Abbildung (2)) den Verlauf des Magnetfeldes. Wird ein Magnetfeld angelegt, steigt die Magnetisierung bis zu einem Sättigungswert B_s an. Die Kurve bis zu dem Wert nennt sich Neukurve. Schaltet man das Magnetfeld ab, bleibt eine Remanenz B_r erhalten. Nur durch ein Gegenfeld, die Koerzitivkraft H_c , kann die Restmagnetisierung wieder aufgehoben werden. Die Magnetisierung wird bis zu einem erneuten Sättigungswert negativ. Erhöht man das äußere Magnetfeld wieder, entsteht eine neue Kurve, welche verschoben zur Neukurve ist.

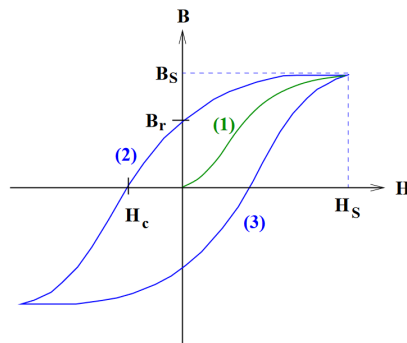


Abbildung 2: Eine Hysteresekurve. [1, S. 3]

In diesem Versuch wurde zur Berechnung der Theoriekurven oft die Gleichung

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I}{2l} \left(\frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{R^2 + (l-x)^2}} \right) \quad (4)$$

verwendet (Quelle: [2, S. 5]), wobei l die Länge, N die Windungszahl und R der Radius der Spule ist.

3 Durchführung

3.1 Magnetfeld einer langen und kurzen Spule

Zur Bestimmung des Magnetfeldes einer langen und kurzen Spule, werden jene an ein Netzgerät angeschlossen, wie in Abbildung (3) dargestellt ist. Der maximal zulässige Strom für die Spulen beträgt $I_{\max} = 1,4\text{A}$. Eine longitudinale Hall-Sonde wird zum Messen verwendet, und es werden innerhalb und außerhalb der Spulen Messwerte genommen. Die Windungszahl der Spulen beträgt $n = 300$.



Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Messung des Magnetfelds einer Spule. [1, S. 4]

3.2 Magnetfeld eines Helmholtzspulenpaares

Das Netzgerät wird an das Spulenpaar in Reihe angeschlossen und der Strom wird so eingestellt, dass er 5A nicht überschreitet. Es werden für 2 verschiedene Spulenabstände innerhalb und außerhalb Messwerte genommen. Für einen Abstand wird die Stromstärke einmal verändert und die gleiche Messreihe wiederholt. Ein Aufbau ist in Abbildung (4) dargestellt. Beide Spulen haben eine Windungszahl von $n = 100$, einen Durchmesser von $d = 125\text{mm}$ und eine Breite von $b = 33\text{mm}$.

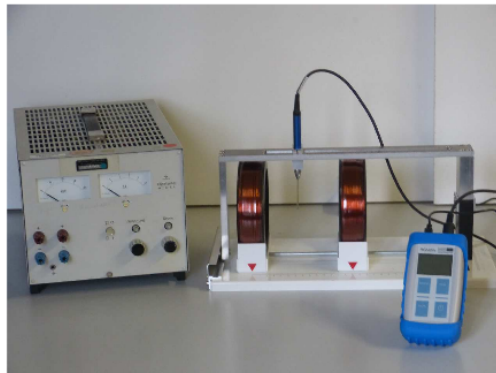


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Messung des Magnetfelds eines Helmholtzspulenpaares. [1, S. 5]

3.3 Bestimmung einer Hysteresekurve

Das Netzgerät wird an die Ringspule angeschlossen und es werden mit einer transversalen Hall-Sonde Werte für das Magnetfeld bestimmt. Dabei wird der Strom von 0 auf 10 Ampere hochgeregelt, dann runter auf -10 Ampere und wieder hoch auf 10 Ampere gestellt. Es wird in Ein-Ampere-Schritten gemessen, also insgesamt 51 Messwerte fürs Magnetfeld aufgenommen. Abbildung (5) zeigt den Aufbau dieses Versuchsteils. Die Windungszahl der Ringspule ist $n = 595$.

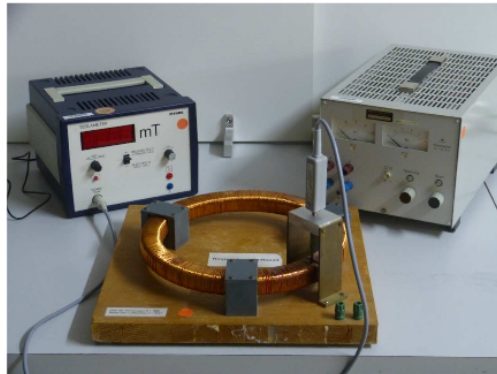


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Messung des Magnetfelds einer Toroidspule. [1, S. 5]

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Magnetischen Flussdichte von zwei Spulen unterschiedlicher Länge

In Tabelle (1) befinden sich die Messwerte der magnetischen Flussdichte B für einer kurzen Spule und in Tabelle (2) die der großen Spule. Diese sind in Abhängigkeit vom Abstand x in Abbildung (6) und (7) graphisch dargestellt. Beide Spulen befinden sich rechts des Ursprungs und beginnen bei diesem.

Tabelle 1: Magnetische Flussdichte B und Abstand x einer kurzen Spule.

x/cm	B/mT
-5	0,039
-4	0,079
-3	0,147
-2	0,287
-1	0,567
0	1,130
1	1,551
2	1,801
3	1,838
4	1,684
5	1,351
6	0,728
7	0,377
8	0,173
9	0,100
10	0,060
11	0,035
12	0,018

Tabelle 2: Magnetische Flussdichte B und Abstand x einer langen Spule.

x/cm	B/mT
-	-
-4	0,131
-3	0,193
-2	0,316
-1	0,569
0	1,033
1	1,648
2	2,007
3	2,185
4	2,280
5	2,330
6	2,353
7	2,369
8	2,374
9	2,372
10	2,364
11	2,346
12	2,307

Als experimentell bestimmte Flussdichte $B_{\text{XX, exp}}$ wird jeweils das Maximum der Messreihe gewählt. Die theoretische Flussdichte $B_{\text{XX, th}}$ wird mit Gleichung (1) bestimmt. So ergibt sich für die kurze Spule eine Flussdichte von

$$B_{\text{KS, exp}} = 1,838 \text{ mT}$$

und

$$B_{\text{KS, th}} = 2,055 \text{ mT}.$$

Für die lange Spule ergibt sich eine Flussdichte von

$$B_{\text{LS, exp}} = 2,374 \text{ mT}$$

und

$$B_{\text{LS, th}} = 2,424 \text{ mT}.$$

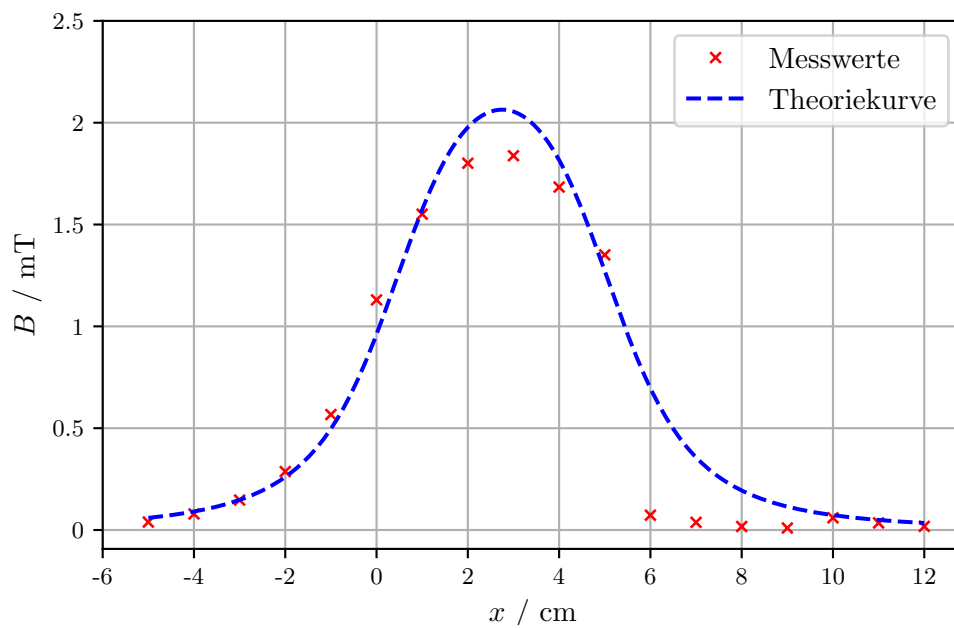


Abbildung 6: Magnetische Flussdichte B einer kurzen Spule.

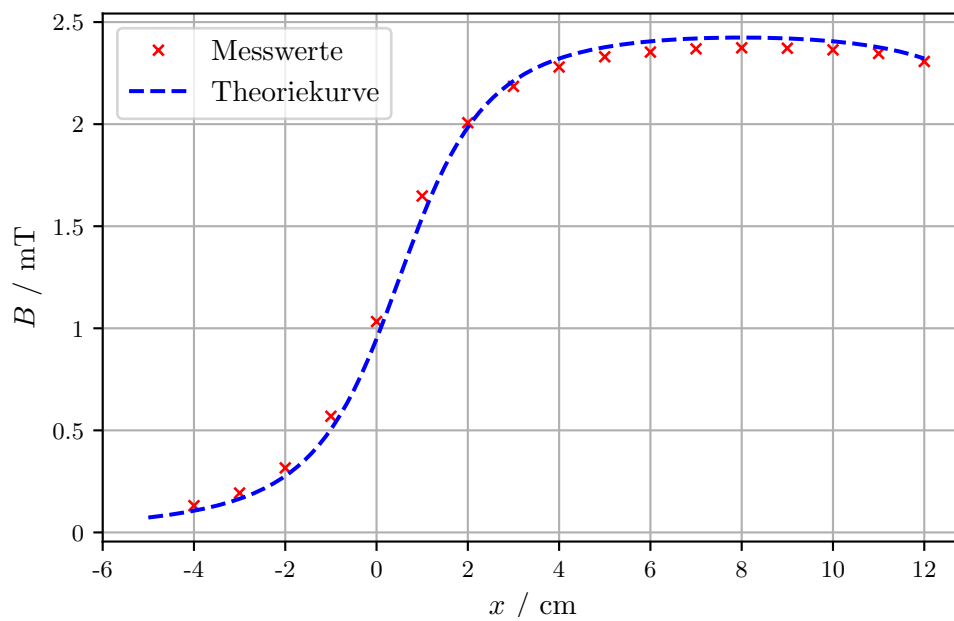


Abbildung 7: Magnetische Flussdichte B einer langen Spule.

4.2 Bestimmung der Magnetischen Flussdichte eines Helmholtzspulenpaares

Die magnetische Flussdichte in der Mitte eines Helmholtzspulenpaares wird für den Abstand des Eigendurchmessers $d = 12,5\text{cm}$ mit der Stromstärke $I = 2\text{ A}$ und 4 A und des Eigenradius $r = 6,25\text{cm}$ mit der Stromstärke $I = 2\text{ A}$ gemessen. Die Messwerte befinden sich in Tabelle (3), (4) und (5). Die ersten zwei Messungen sind in Abbildung (8) dargestellt, die letzte in Abbildung (9).

Tabelle 3: Magnetische Flussdichte B und Abstand x des Helmholtzspulenpaares im Abstand $d = 12,5\text{ cm}$, bei $I = 2\text{ A}$.

x/cm	B/mT
3	1,700
4	1,565
5	1,470
6	1,435
7	1,466
8	1,557
9	1,694
15	1,541
16	1,281
17	1,031
18	0,808
19	0,633

Tabelle 4: Magnetische Flussdichte B und Abstand x des Helmholtzspulenpaares im Abstand $d = 12,5\text{ cm}$, bei $I = 4\text{ A}$.

x/cm	B/mT
3	3,515
4	3,258
5	3,074
6	3,004
7	3,073
8	3,255
9	3,235
15	3,256
16	2,761
17	2,786
18	1,865
19	1,506

Tabelle 5: Magnetische Flussdichte B und Abstand x des Helmholtzspulenpaares im Abstand $r = 6,25$ cm, bei $I = 2$ A.

x/cm	B/mT
2,8	2,724
2,9	2,728
3,0	2,729
3,1	2,729
3,2	2,729
3,3	2,729
3,4	2,728
9	1,380
10	1,460
11	1,170
12	0,901
13	0,701
14	0,544

Für den experimentell bestimmten Wert der magnetischen Flussdichte in der Mitte des Spulenpaares wird im Fall, dass der Abstand zwischen dem Spulenpaar dem Eigendurchmesser entspricht, der Wert im Tiefpunkt des Graphen, also bei $x = 6$ cm gewählt und ergibt sich so zu

$$B_{\text{Hd2A, exp}} = 1,435 \text{ mT}$$

und

$$B_{\text{Hd4A, exp}} = 3,004 \text{ mT}.$$

Entspricht der Abstand zwischen dem Spulenpaar dem Eigenradius, so wird der Messwert bei $x = 3,1$ cm als magnetische Flussdichte in der Mitte des Spulenpaares gewählt und ergibt sich zu

$$B_{\text{Hr, exp}} = 2,729 \text{ mT}.$$

Die entsprechenden theoretischen Werte werden mittels Gleichung (4) zu

$$B_{\text{Hd2A, th}} = 1,637 \text{ mT}$$

$$B_{\text{Hd4A, th}} = 3,274 \text{ mT}$$

$$B_{\text{Hr, th}} = 2,877 \text{ mT}$$

bestimmt.

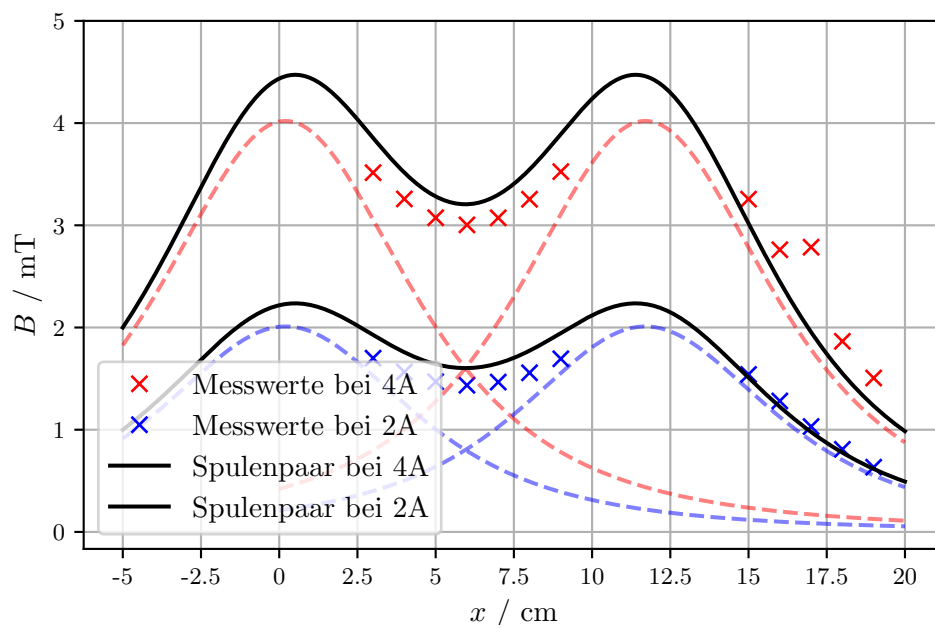


Abbildung 8: Magnetische Flussdichte B eines Helmholtzspulenpaares im Abstand des Durchmessers $d = 12,5$ cm.

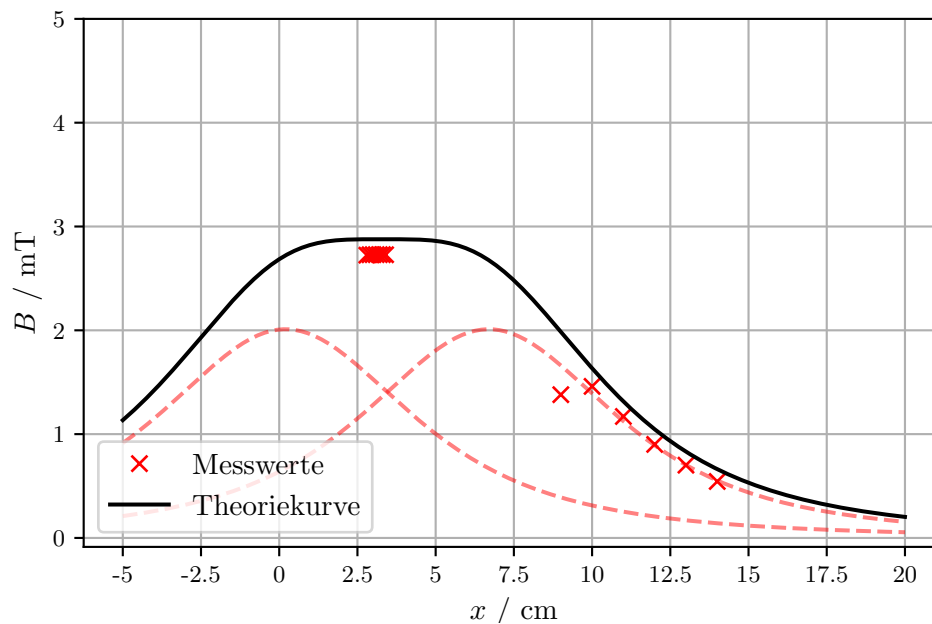


Abbildung 9: Magnetische Flussdichte B eines Helmholtzspulenpaares im Abstand des Radius $r = 6,25$ cm.

4.3 Bestimmung einer Hysteresekurve eines Eisenkerns mit Luftspalt in einer Toroidspule.

Die Messwerte der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Stromstärke I für die Hysteresekurve sind in der Tabelle (6) zu finden. Mittels Gleichung (2) lässt sich aus der Stromstärke die magnetische Feldstärke H bestimmen, in dessen Abhängigkeit die magnetische Flussdichte B in Abbildung (10) aufgetragen wird.

Aus dieser wird nun die Sättigungsmagnetisierung B_s , die Remanenz B_r und die Koerzitivkraft H_c abgelesen:

$$B_s = 688,8 \text{ mT},$$

$$B_r = 122,2 \text{ mT},$$

$$H_c = 457,4 \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

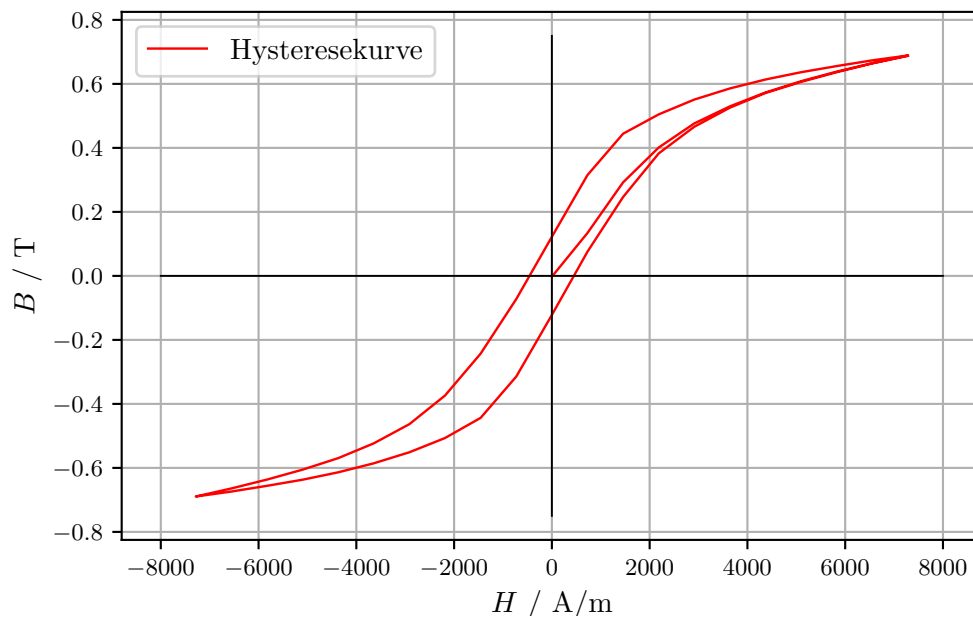


Abbildung 10: Hysteresekurve eines Eisenkerns mit Luftspalt in einer Toroidspule.

Tabelle 6: Magnetische Flussdichte und Stromstärke einer Ringspule.

I/A	B/mT	I/A	B/mT	I/A	B/mT	I/A	B/mT	I/A	B/mT
0	-2,562	9	673,6	-1	-0,724	-9	-673,9	1	75,66
1	134,2	8	655,7	-2	-242,8	-8	-656,0	2	246,5
2	292,3	7	636,5	-3	-373,8	-7	-636,9	3	382,7
3	401,1	6	613,7	-4	-463,2	-6	-613,8	4	466,1
4	476,5	5	585,8	-5	-523,2	-5	-585,6	5	525,7
5	529,8	4	551,0	-6	-569,5	-4	-551,1	6	571,6
6	573,2	3	504,7	-7	-605,5	-3	-506,6	7	606,3
7	608,4	2	444,3	-8	-636,5	-2	-443,6	8	636,5
8	638,4	1	315,1	-9	-664,2	-1	-314,6	9	664,0
9	664,8	0	122,2	-10	-689,4	0	-122,0	10	687,5
10	688,8								

5 Diskussion

Im Allgemeinen fällt auf, dass die theoretisch errechneten Werte höher sind als die experimentell bestimmten. Es folgt die Bestimmung der relativen Abweichung:

$$B_{\text{KS, exp}} = 1,838 \text{ mT}, \quad B_{\text{KS, th}} = 2,055 \text{ mT},$$
$$\Rightarrow \text{Relative Abweichung} = 10,56\%,$$

$$B_{\text{LS, exp}} = 2,374 \text{ mT}, \quad B_{\text{LS, th}} = 2,424 \text{ mT},$$
$$\Rightarrow \text{Relative Abweichung} = 2,06\%,$$

$$B_{\text{Hd2A, exp}} = 1,435 \text{ mT}, \quad B_{\text{Hd2A, th}} = 1,637 \text{ mT},$$
$$\Rightarrow \text{Relative Abweichung} = 12,34\%,$$

$$B_{\text{Hd4A, exp}} = 3,004 \text{ mT}, \quad B_{\text{Hd4A, th}} = 3,274 \text{ mT},$$
$$\Rightarrow \text{Relative Abweichung} = 8,25\%,$$

$$B_{\text{Hr, exp}} = 2,729 \text{ mT}, \quad B_{\text{Hr, th}} = 2,877 \text{ mT},$$
$$\Rightarrow \text{Relative Abweichung} = 5,14\%.$$

Die Abweichungen lassen sich unter anderem dadurch erklären, dass die theoretischen Werte mittels Gleichungen für lange Spulen bestimmt wurden, in welchen die Flussdichte ab einer gewissen Tiefe homogen ist. Dies hat gerade bei der kurzen Spule große Auswirkungen auf die Abweichung, was dadurch bestätigt wird, dass die Abweichung bei der langen Spule deutlich geringer ist, wobei diese wohl auch noch nicht lang genug ist, um durch die Gleichung beschrieben zu werden. Weiterhin konnten die Innenwiderstände der Gerätschaften (Spulen, Drähte) nicht miteinbezogen werden, sodass diese Fehlerquelle in der gesamten Messung nicht auszuschließen ist. Im Angesicht dieser Tatsachen liegen die meisten bestimmten Werte dennoch in einem angemessenen Bereich, was sich in den Verläufen der Graphen widerspiegelt.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 308, Spulen und Magnetfelder*. 17. Jan. 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/Magnetfeld.pdf>.

- [2] Daniel Scholz. *Magnetfeld von Spulen*. 17. Jan. 2019. URL: <https://mehr-davon.de/content/protokolle/protokoll14.pdf>.