

**VERSUCH NUMMER**

**TITEL**

Nico Schaffrath  
nico.schaffrath@tu-dortmund.de

Mira Arndt  
mira.arndt@tu-dortmund.de

Durchführung: DATUM

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Helmholtzspulen . . . . .	3
1.2	Hysteresekurve . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
2.1	Vermessung von Spulen/Magnetfeld von Spulen . . . . .	5
2.2	Vermessung von Helmholtzspulen/Magnetfeld eines Spulenpaares . . . . .	5
2.3	Hysteresekurve . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
3.1	Magnetische Flußdichte zweier Spulen . . . . .	6
3.2	Magnetische Flußdichte eines Helmholtzspulenpaares . . . . .	8
3.3	Hysteresekurve einer Spule mit Eisenkern . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Anhang</b>	<b>13</b>
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>

# 1 Theorie

Verweis auf Konstanten

Magnetfelder werden durch bewegte elektrische Ladungen hervorgerufen. Der magnetische Fluss  $B$  wird in der Einheit Tesla angegeben und

Da bewegte Ladungen magnetische Felder hervorgerufen, lässt sich auch um stromdurchflossene Leiter ein magnetisches Feld messen, welches sich mithilfe von konzentrischen Kreisen, die senkrecht zum Leiter stehen, darstellen lässt. Die magnetische Flussdichte  $B$  um eine beliebig geschlossene Leiterschleife lässt sich mithilfe des Biot-Savart-Gesetzes

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

im Abstand  $r$  berechnen. Mithilfe dieser Formel lässt sich die magnetische Flussdichte auf einer Geraden, die durch den Mittelpunkt einer Leiterschleife/Ring verläuft ermitteln. Aus der Gleichung ?? ergibt sich

$$\vec{B}(x) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} x, \quad (2)$$

wobei  $R$  den Radius des Ringes und  $x$  liegt an Stelle eines Ringes eine Spule vor, so kann das Ergebnis mit der Windungszahl  $n$  multipliziert werden.

Für den Fall, dass eine langgestreckte Spule mit  $l$  vorliegt, so verlaufen die Feldlinien innerhalb dieser parallel zueinander, was bedeutet, dass die magnetische Flussdichte homogen ist und sich dessen Betrag mit der Formel

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{n}{l} I \quad (3)$$

berechnen lässt, wobei deutlich wird, dass die magnetische Flussdichte sowohl zu der Stromstärke  $I$ , als auch zu der Windungszahl  $n$  proportional und zu der Spulenlänge  $l$  umgekehrt proportional ist.

Für den Fall, dass eine Ringspule vorliegt, dessen Spulenradius  $r$  deutlich kleiner ist, als dessen Länge, lässt sich der Betrag  $B$  mit der Formel berechnen. Auch hier ist  $B$  inhomogen, nur außen dieses mal null.

## 1.1 Helmholtzspulen

Um ein möglichst homogenes Magnetfeld zu erhalten, werden zwei identische Spulen mit dem Radius  $R$  und der Windungszahl  $N$  so aufgestellt, dass die Verbindungslinie der Spulenmittelpunkte senkrecht zu den Spulen selbst steht. Wird der Abstand der Spulen so eingestellt, dass dieser dem Radius  $R$  entspricht, so ergibt sich auf der Verbindungslinie der Spulenmittelpunkte ein homogenes Magnetfeld, für das sich die magnetische Flussdichte im Mittelpunkt der Spulen durch die Überlagerung der einzelnen Felder ergibt. Weicht der Abstand der Spulen zueinander von dem Wert  $R$  ab, so ergibt sich der Wert für den

magnetischen Fluss  $B$  im Mittelpunkt von zwei Spulen mit je einer Windung durch die Gleichung

$$B(0) = B_1(x) + B_1(-x) = \frac{\mu_0 I R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4)$$

wobei der Nullpunkt so gewählt ist, dass der Mittelpunkt der Helmholtzspulen in ihm liegt und der Wert  $x$  der Hälfte des Abstandes der Spulen zueinander entspricht.

## 1.2 Hysteresekurve

Im Gegensatz zu Dia- und Paramagneten besitzen Paramagneten bereits ohne ein von außen angelegtes Magnetfeld ein permanentes magnetisches Moment. Innerhalb von sogenannten weißchen Bezirken verlaufen die magnetischen Momente parallel, allerdings sind diese Bereiche statistisch über den gesamten Körper verteilt und heben sich gegenseitig auf, sodass der Körper als ganzes kein magnetisches Feld besitzt. Wird nun ein äußeres Magnetfeld eingeschaltet, so ändert sich die Ausrichtung der einzelnen magnetischen Momente und die weißchen Bezirke vergrößern sich. Das äußere Magnetfeld lässt sich so weit erhöhen, bis alle magnetischen Momente die gleiche Ausrichtung aufweisen. Als Beispiel für ein ferromagnetisches Material lässt sich Eisen nennen. Bedingt dadurch, dass bei Ferromagneten die relative Permeabilität  $\mu_r \gg 1$  ist, verliert Gleichung (VERWEIS AUF GLEICHUNG) ihre Gültigkeit. Um den Zusammenhang zwischen magnetischer Erregung und magnetischem Fluss dennoch darstellen zu können, wird eine sogenannte Hysteresekurve erstellt. Diese gibt auf der x-Achse den Wert der magnetischen Erregung und auf der y-Achse den Wert der magnetischen Flussdichte an. Wird ein ferromagnetisches Material zum ersten Mal durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst, vergrößern sich, wie zuvor bereits erwähnt, die weißchen Bezirke, bis alle magnetischen Momente gleich ausgerichtet sind. An diesem Punkt erreicht der magnetische Fluss seinen maximalen Wert. Man spricht von der sogenannten Sättigungsmagnetisierung  $U_s$ . Wird das äußere Magnetfeld nun wieder verkleinert, so ändert ein Teil der magnetischen Momente innerhalb der Ferromagneten seine Ausrichtung. In Folge dessen nimmt der Wert für die magnetische Flussdichte ebenfalls ab. Ist das äußere Magnetfeld vollständig abgeschaltet, kann jedoch beobachtet werden, dass das ferromagnetische Material selbst trotzdem noch ein magnetisches Feld aufweist. Dies liegt daran, dass immernoch der überwiegende Teil der magnetischen Momente in ein und dieselbe Richtung ausgerichtet ist. Dieser Wert wird auch als Remanenz bezeichnet. Es ist also zu beachten, dass die magnetische Flussdichte des Ferromagneten nicht nur von dem äußeren magnetischen Feld abhängt, sondern auch von dem Verlauf seiner vorhergegangenen Magnetisierung. Wenn nun ein äußeres Magnetfeld angelegt wird, welches dem ursprünglichen entgegengerichtet ist, wird der Zustand der statistischen Verteilung der weißchen Bezirke wiederhergestellt und das Magnetfeld des Körpers selbst verschwindet wiederum. Dieser Punkt auf der x-Achse wird als Koerzitivkraft bezeichnet. Wird das äußere Magnetfeld nun so weit vergrößert, bis sich alle magnetischen Momente in dem Körper wieder gleich ausgerichtet haben, weist der magnetische Fluss des Ferromagneten bis auf das Vorzeichen denselben Wert

Symmetrisch zum Ursprung Vorgeschichte

[1]

## 2 Durchführung

### 2.1 Vermessung von Spulen/Magnetfeld von Spulen

Zuerst sollen die magnetischen Flussdichten von zwei Spulen - einer kurzen mit einer Länge  $l = 5.5 \text{ cm}$  und  $n = 100$  Windungen, sowie einer langen Spule mit einer Länge  $l = 15.8 \text{ cm}$  und  $n = 300$  Windungen - gemessen werden. Dies soll mithilfe einer (longitudinalen) Hall-Sonde verwirklicht werden, die entlang der Spulenmitte sowohl außerhalb, als auch innerhalb bei konstanter Spannung  $U$  und konstantem Strom  $I$ , die magnetische Flussdichte misst. Die dabei erhaltenen Ergebnisse sollen graphisch aufgetragen und mit dem Theoriewert des magnetischen Flusses innerhalb der Spulen verglichen werden.

### 2.2 Vermessung von Helmholtzspulen/Magnetfeld eines Spulenpaares

In diesem Teil soll die magnetische Flussdichte  $B$  von einem Helmholtzspulenpaar untersucht werden. Dazu werden zwei identische Spulen, mit Radius  $r = 12.5 \text{ cm}$ , Breite  $b = 3.3 \text{ cm}$ , die jeweils  $n = 100$  Windungen besitzen, in drei unterschiedlichen Abständen voneinander platziert. Dabei ist zu beachten, dass die Spulen ohne einen seitlichen Versatz und ohne Drehwinkel zueinander angeordnet sein müssen. Die notierten Werte geben den Abstand von dem Mittelpunkt der einen Spule zum Mittelpunkt der anderen Spule an. Auch hier gilt es das magnetische Feld auf einer Achse, die durch die Spulenmitten verläuft, bei konstanter Stromstärke  $I$ , sowie konstanter Spannung  $U$  zu messen. Es sollen sowohl Messwerte zwischen den Spulen, als auch außerhalb der Spulen, mithilfe einer (transversalen) Hallsonde aufgenommen werden. Die aufgeschriebenen Werte beziehen sich auf den Abstand von dem nach innen gerichteten Rand einer Spule zur Hallsonde. Die so ermittelten Werte sollen graphisch dargestellt und mit den Theoriewerten verglichen werden.

### 2.3 Hysteresekurve

Zuletzt soll die Hysteresekurve einer Ringspule mit  $n = 595$  Windungen, einem Luftspalt der Breite  $b = 3 \text{ mm}$  und einem Durchmesser von  $d = 26 \text{ cm}$  aufgezeichnet werden. Dazu soll der Spulenstrom zunächst von  $I = 0 \text{ A}$  in zehn Schritten auf  $I = 10 \text{ A}$  hochgestellt werden und anschließend ebenfalls in zehn Schritten wiederum auf  $I = 0 \text{ A}$  herabgesetzt werden. Nach einer Umpolung wird der eben beschriebene Vorgang wiederholt. Wenn dies abgeschlossen ist, soll nach einer weiteren Umpolung die Stromstärke ein letztes Mal von  $I = 0 \text{ A}$  in zehn Schritten auf  $I = 10 \text{ A}$  hochgeregt werden. Die Messwerte für die magnetische Flussdichte werden mit einer transversalen Hallsonde aufgenommen. Die Ergebnisse sollen graphisch dargestellt werden und zusätzlich sollen Sättigungsmagnetisierung  $U_S$ , Remanenz  $U_r$  und Koerzitivkraft  $H_c$  ermittelt werden.

## 3 Auswertung

### 3.1 Magnetische Flußdichte zweier Spulen

Die Messwerte für die magnetische Flußdichte der langen Spule sind in Tabelle (REFERENZ) aufgelistet. Außerdem sind sie zusammen mit dem Theoriewert, welcher sich nach Gleichung(REFERENZ) als

$$B_{L,t} = 1,909 \text{ mT}$$

berechnen lässt, in Abbildung(REFERENZ) in einem xB-Diagramm aufgetragen, wobei der Nullpunkt von x am Anfang der Spule liegt.

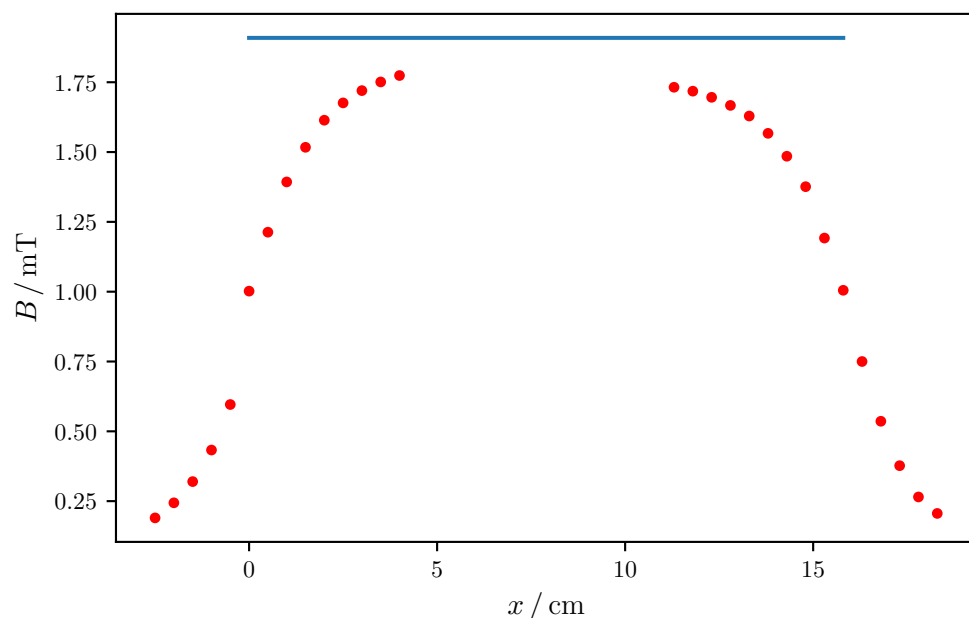


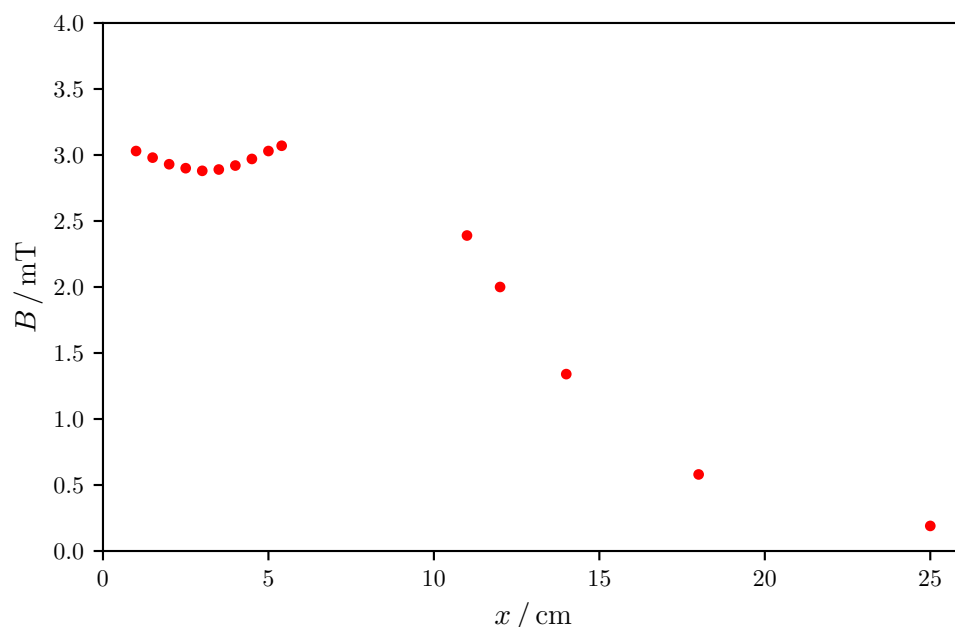
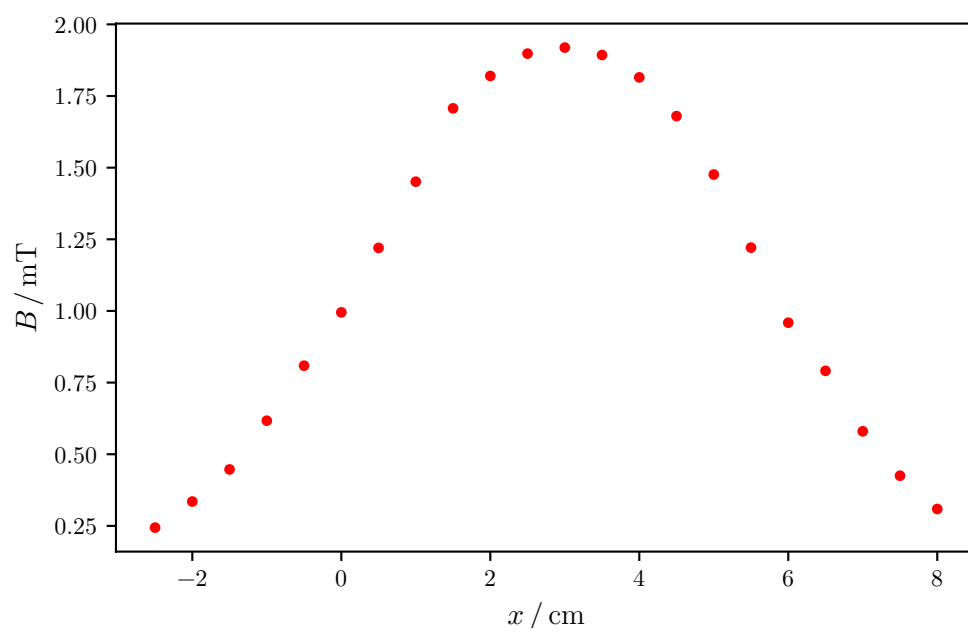
### 3.2 Magnetische Flußdichte eines Helmholtzspulenpaares

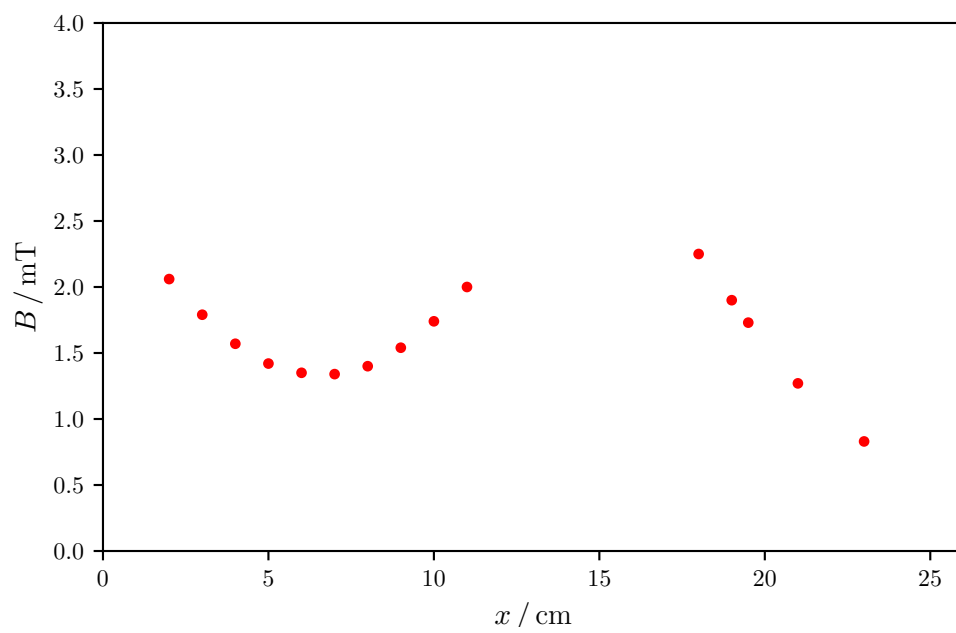
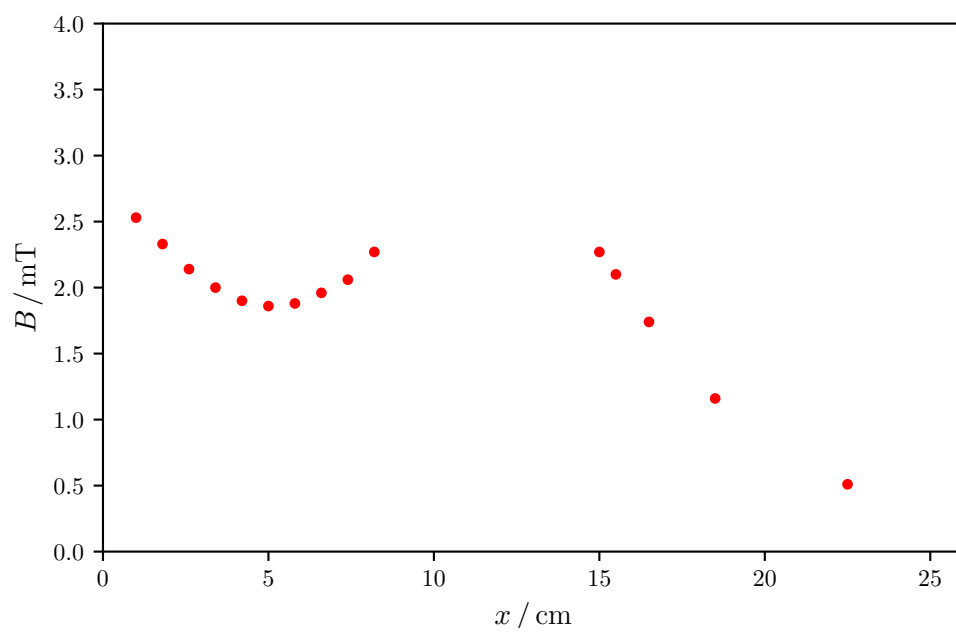
### 3.3 Hysteresekurve einer Spule mit Eisenkern

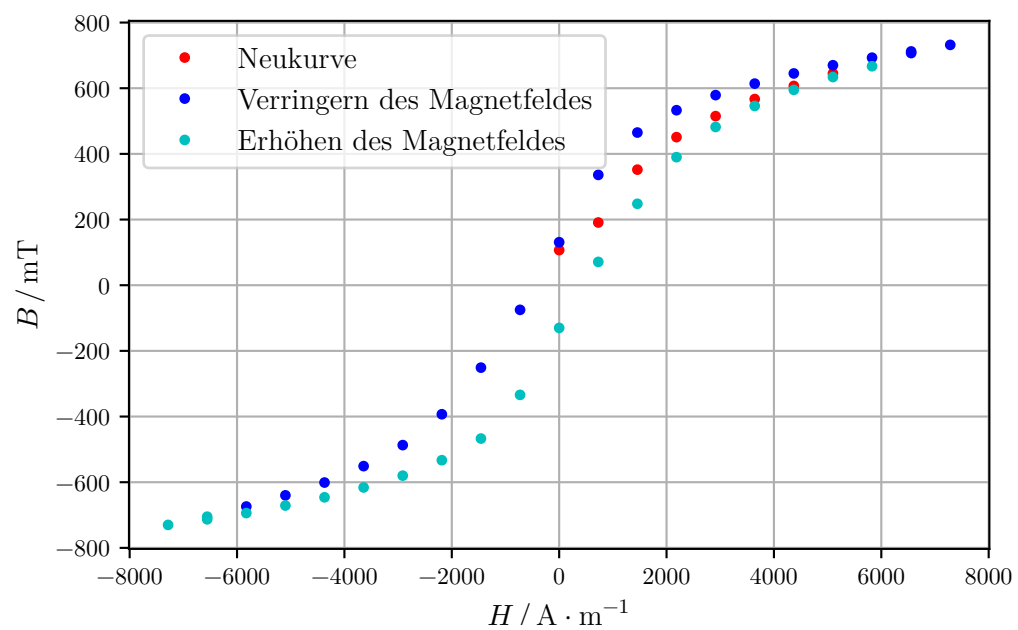
$I / \text{A}$	$B / \text{mT}$	$H / \text{A}$
0	107	0
1	191	728
2	352	1457
3	451	2185
4	515	2914
5	567	3642
6	607	4371
7	645	5099
8	677	5828
9	707	6556
10	732	7284
9	712	6556
8	693	5828
7	670	5099
6	645	4371
5	614	3642
4	579	2914
3	533	2185
2	465	1457
1	336	728
0	131	0
-1	-75	-728
-2	-251	-1457
-3	-393	-2185
-4	-487	-2914
-5	-551	-3642
-6	-601	-4371
-7	-640	-5099
-8	-674	-5828
-9	-705	-6556
-10	-730	-7284
-9	-713	-6556
-8	-694	-5828
-7	-671	-5099
-6	-646	-4371
-5	-616	-3642
-4	-580	-2914
-3	-533	-2185
-2	-467	-1457
-1	-334	-728
0	-130	0
1	718	728
2	248	1457
3	390	2185
4	482	2914
5	546	3642
6	595	4371
7	634	5099
8	667	5828
9	696	6556
10	722	7284











## 4 Diskussion

## 5 Anhang

V308 26.11.19

o)  $N = 595$   
 $d = 3 \text{ mm}$

Durchmesser der Ringspule: 26 cm

$\theta$	$\Delta A$	$\Delta \Phi$	$B$ -field [mT]
0	0	107,4	
1	1,5	191,5	
2	3	352	
3	5	451	
4	6	515	
5	7,5	567	
6	8,5	608	
7	10	645	
8	11,5	677	
9	13	707	
10	14,5	732	
9	13	712	
8	11,5	693	
7	10	670	
6	9	645	
5	7,5	614	
4	6	578	
3	5	533	
2	4,5	465	
1	3,5	376	
0	2	131	
1	0	-75	
2	-2	-251	
3	-3	-393	
4	-4,5	-487	
5	-6	-551	
6	-7,5	-601	
7	-9	-640	
8	-10	-674	
9	-11,5	-705	
10	-13	-730	
9	-14,5	-713	
8	-13	-694	
7	-11,5	-671	
6	-10	-646	
5	-8,5	-616	
4	-7,5	-580	
3	-6	-533	
2	-4,5	-467	
1	-3	-334	
0	-1,5	-130	
1	0	71	
2	1,5	248	
3	3	390	
4	5	482	
5	6,5	546	
6	7,5	595	
7	9	634	
8	10	667	
9	12	696	
10	13,5		

$\Delta A$	$\Delta \Phi$	$B$ -field [mT]
10	15	722

13

b)  $h = 100$   
 $d = 125 \text{ mm}$

① Abstand  $\approx 10 \text{ cm}$   $I = 3 \text{ A}$

Skizze:

Abstand zwischen Spulen

Messung	Abstand [cm]	B-Feld [mT]
insgesamt: 1	1	3,03
2	1,5	2,98
3	2	2,93
4	2,5	2,90
5	3	2,88
6	3,5	2,89
7	4	2,92
8	4,5	2,97
9	5	3,03
10	5,5	3,07
ausgesamt:		
11	11	2,39
12	13	2,00
13	14	1,34
14	18	0,58
15	22,5	0,19

② Abstand  $l = 14 \text{ cm}$   $I = 3 \text{ A}$

Messung	Abstand [cm]	B-Feld [mT]
insgesamt: 1	<del>2,14</del> 1,00	<del>2,14 2,450 2,150</del> 2,527
2	1,8	<del>2,261</del> 2,325
3	3,6	<del>2,081</del> 2,133
4	3,4	1,940
5	4,2	1,850
6	5	1,807
7	5,8	1,825
8	6,6	
9	7,4	
10	8,2	
ausgesamt:		
11	15	2,2
12	15,5	2,097
13	16,5	1,744
14	18,5	1,158
15	23,5	0,507

Fehlerhafte Messung (Hohl-Sonde statt Stäbchen)

16.2

Abstand  $\ell = 17 \text{ cm}$ ,  $I = 3 \text{ A}$

Messung	Abstand [cm]	B-Feld [mT]
innen:		
1	2	<del>2,044</del> 2,060
2	3	1,789
3	4	1,572
4	5	1,423
5	6	1,347
6	7	1,338
7	8	1,404
8	9	1,538
9	10	1,742
10	11	2,003
außen:		
11	18	2,250
12	19	2,897
13	19,5	1,726
14	21	1,266
15	23	0,828

300 Windungen  
 $x_0 = 1,6 \text{ cm}$

$U = 3,6 \text{ V}$ ,  $I = 0,8 \text{ A}$

Länge der Spule  $15,8 \text{ cm}$

Messung	B-Feld [mT]	Abstand [cm]		B-Feld [mT]	Abstand [cm]
1	<del>0,780</del> 1,002	0	innen: links	0,750	16,3
2	1,213	0,5			
3	1,393	1		0,536	16,8
4	1,512	1,5			
5	1,614	2		0,377	17,3
6	1,676	2,5			
7	1,720	3		0,265	17,9
8	1,751	3,5			
9	1,774	4		0,206	18,3
10	<del>0,267</del> 0,596	-0,5	außen: links		
11	<del>0,578</del> 0,433	-1			
12	<del>0,422</del> 0,320	-1,5			
13	<del>0,315</del> 0,244	-2			
14	<del>0,237</del> 0,190	-2,5			
15	1,005	15,8	innen rechts		
16	1,192	15,3			
17	1,376	14,8			
18	1,485	14,3			
19	1,582	13,8			
20	1,629	13,3			
21	1,667	12,8			
22	1,696	12,3			
21	1,718	11,8			
22	1,732	11,3			

Kurze Spule: 100 Windungen  $x_0 = 1,7$   $U = 1,1V$   $I = 1,03A$  Länge der Spule:  $5,5cm$

Abstand [cm]	B-Feld [mT]	
0	0,995	innen
0,5	1,220	
1	1,451	
1,5	1,707	
2	1,820	
2,5	1,898	
3	1,919	
3,5	1,893	
4	1,815	
4,5	1,680	
5	1,476	
5,5	1,221	
6	0,959	außen links rechts
6,5	0,791	
7	0,580	
7,5	0,425	
8	0,309	
-0,5	0,809	außen rechts links
-1	0,617	
-1,5	0,447	
-2	0,335	
-2,5	0,244	

QR



## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch zum Literaturverzeichnis*. 2014.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.