

**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 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Allgemein . . . . .	3
2.2 Spulen . . . . .	3
2.3 Lange Spule . . . . .	4
2.4 Ringspule . . . . .	4
2.5 Helmholtzspulen . . . . .	4
2.6 Hysteresekurve . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1 Vermessung von Spulen/Magnetfeld von Spulen . . . . .	6
3.2 Vermessung von Helmholtzspulen/Magnetfeld eines Spulenpaares . . . . .	7
3.3 Hysteresekurve . . . . .	8
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Magnetische Flußdichte zweier Spulen . . . . .	9
4.2 Magnetische Flußdichte eines Helmholtzspulenpaares . . . . .	13
4.3 Hysteresekurve einer Spule mit Eisenkern . . . . .	13
<b>5 Diskussion</b>	<b>18</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>18</b>
<b>Literatur</b>	<b>22</b>

# 1 Ziel

Soll ich in der Durchführung die Werte für die Stromstärke und falls vorhanden auch für die Spannung angeben? Ich brauche die Bilder für die Durchführung.

Bei dem vorliegenden Versuch sollen die Magnetfelder unterschiedlicher Spulen, beziehungsweise Spulenpaare, vermessen werden. Außerdem soll die Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials, welches sich in einer Ringspule befindet, aufgezeichnet und untersucht werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Allgemein

Verweis auf Konstanten

Magnetfelder werden durch bewegte elektrische Ladungen hervorrufen. Der magnetische Fluss  $B$  wird in der Einheit Tesla angegeben und sowohl seine Richtung, als auch sein Betrag wird mithilfe der magnetischen Erregung  $H$  beschrieben. Zwischen der magnetischen Flussdichte  $B$  und der magnetischen Erregung  $H$  besteht der Zusammenhang

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (1)$$

wobei sich der Vorfaktor  $\mu$  aus dem Produkt der Vakuum-Permeabilität  $\mu_0$  und der stoffabhängigen relativen Permeabilität  $\mu_r$  zusammensetzt. Die relative Permeabilität ist lediglich dann relevant, wenn das Magnetfeld mit Materie wechselwirkt.

### 2.2 Spulen

Da bewegte Ladungen magnetische Felder hervorrufen, lässt sich auch um stromdurchflossene Leiter ein magnetisches Feld messen. Die magnetische Flussdichte  $B$  um eine beliebig geschlossene Leiterschleife lässt sich, mithilfe des Biot-Savart-Gesetzes

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}, \quad (2)$$

im Abstand  $r$  berechnen. Mithilfe dieser Formel kann die magnetische Flussdichte auf einer Geraden, die durch den Mittelpunkt einer Leiterschleife verläuft ermittelt werden. Aus der Gleichung ?? ergibt sich

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

?HILFE? wobei  $R$  den Radius des Ringes und  $\hat{x}$  der Einheitsvektor ist, der die Richtung des magnetischen Feldes angibt. Liegt an Stelle eines Ringes eine Spule vor, so kann das Ergebnis mit der Windungszahl  $N$  multipliziert werden.

### 2.3 Lange Spule

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

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{n}{l} I \quad (4)$$

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. Am Rand, ebenso wie außerhalb der Spule, ist das magnetische Feld inhomogen.

### 2.4 Ringspule

Falls eine Ringspule vorliegt, dessen Spulenradius  $R$  deutlich kleiner ist, als dessen Länge  $l$ , lässt sich der Betrag  $B$  mit der Formel

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{N}{l} I \quad (5)$$

berechnen. Ebenso wie bei der langen Spule ist auch innerhalb der Ringspule das magnetische Feld vollkommen homogen, allerdings ist außerhalb der Spule kein Magnetfeld vorhanden.

### 2.5 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 voneinander 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

$$B(0) = B_1(x) + B_1(-x) = \frac{\mu_0 I R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (6)$$

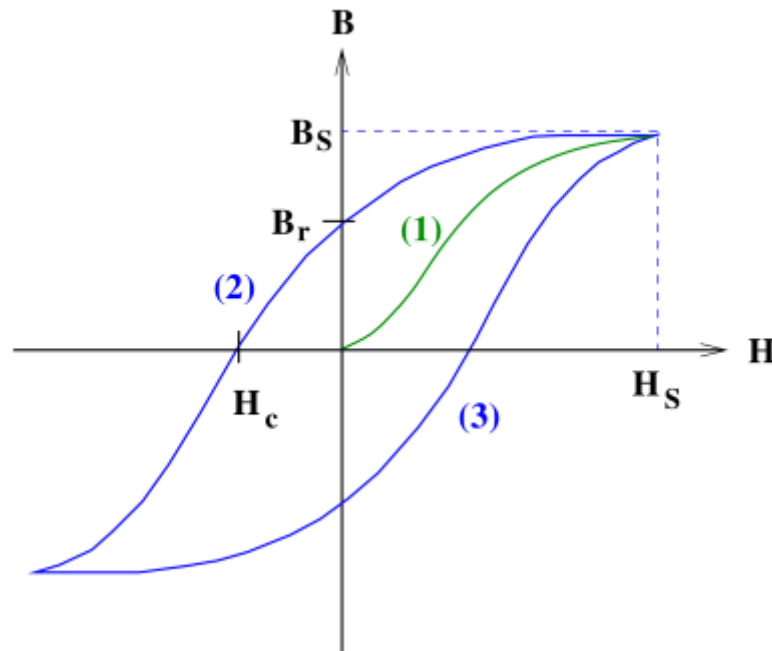
wobei der Nullpunkt so gewählt ist, dass der Mittelpunkt der Helmholtzspulen in ihm liegt und der Wert  $x$  der Hälfte des Abstandes der Spulen zueinander entspricht.

### 2.6 Hysteresekurve

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, welches noch nicht magnetisiert ist, zum ersten Mal durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst, vergrößern sich die Weißschen Bezirke, bis alle magnetischen Momente in dieselbe Richtung zeigen. In diesem Punkt ist der magnetische Fluss am größten. Es wird im Allgemeinen von der Sättigungsmagnetisierung  $B_s$  gesprochen. Weiterhin wird der Kurvenverlauf vom Ursprung bis zur Sättigungsmagnetisierung Neukurve genannt.



**Abbildung 1:** Darstellung einer allgemeinen Hysteresekurve (blau) samt Neukurve (grün)

Wenn das äußere Magnetfeld nun stufenweise abgeschaltet wird, verbleibt der Ferromagnet weiterhin in einem magnetisierten Zustand. Der Wert für den magnetischen Fluss wird als Remanenz  $B_r$  bezeichnet. Durch das Anlegen eines Magnetfeldes, welches antiparallel zu dem zuerst angelegten Feld verläuft, kann das Material wieder in einen unmagnetisierten Zustand gebracht werden. Der hier gemessenen Wert für die magnetische Erregung  $H$  wird allgemein Koerzitivkraft  $H_c$  genannt. Das äußere Magnetfeld kann nun gleichmäßig herauf- und anschließend wieder herabgefahren werden. Abgesehen von dem Vorzeichen ergeben sich dieselben Werte für die Sättigungsmagnetisierung beziehungsweise die Remanenz. Um die Hysteresekurve zu vervollständigen kann das äußere Feld ein weiteres Mal umgepolt und schrittweise erhöht werden, sodass sich abermals die Sättigungsmagnetisierung ergibt.

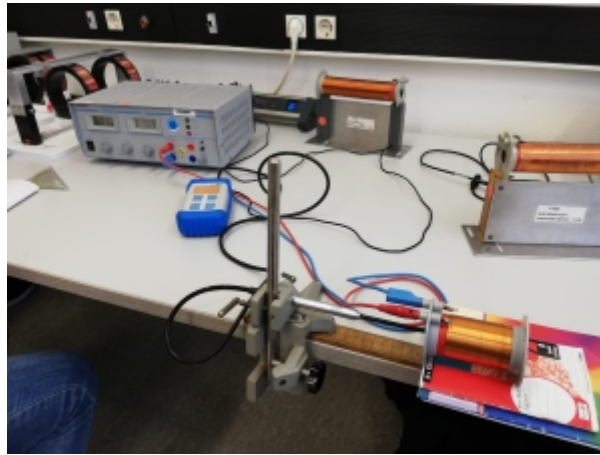
Es ist zu beachten, dass der Zustand des Ferromagneten nicht nur von dem außen

angelegten Feld abhängig ist, sondern auch davon von der Vorgeschichte des Materials. Zusätzlich fällt auf, dass die Hysteresekurve symmetrisch zum Ursprung verläuft.

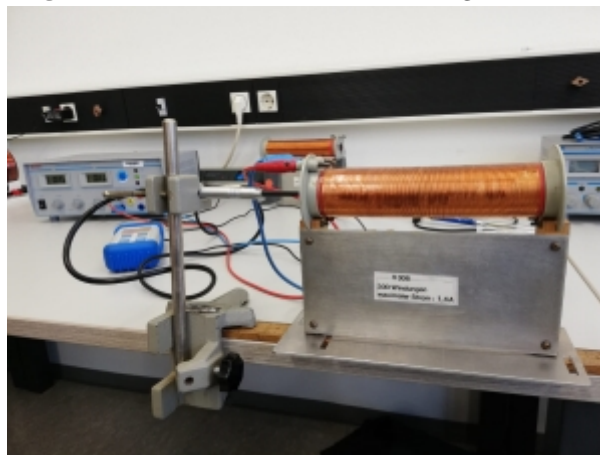
### **3 Durchführung**

#### **3.1 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 bei konstanter Spannung  $U$  und konstantem Strom  $I$ , die magnetische Flussdichte misst. Dabei sollen von beiden Seiten Messwerte sowohl außerhalb, als auch innerhalb der Spule aufgenommen werden. Die dabei erhaltenen Ergebnisse sollen graphisch aufgetragen und mit dem Theoriewert des magnetischen Flusses innerhalb der Spulen verglichen werden.



**Abbildung 2:** Versuchsaufbau zur Vermessung einer kurzen Spule

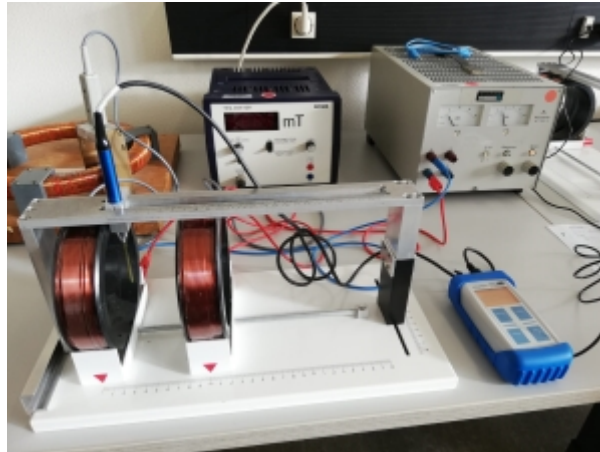


**Abbildung 3:** Versuchsaufbau zur Vermessung einer langen Spule

### 3.2 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

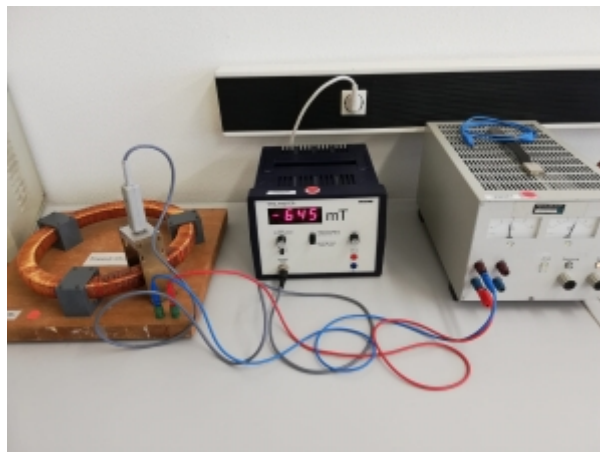
werden.



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau zur Vermessung von Helmholtzspulen

### 3.3 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.



**Abbildung 5:** Versuchsaufbau zur Ermittlung der Hysteresekurve



## 4 Auswertung

### 4.1 Magnetische Flußdichte zweier Spulen

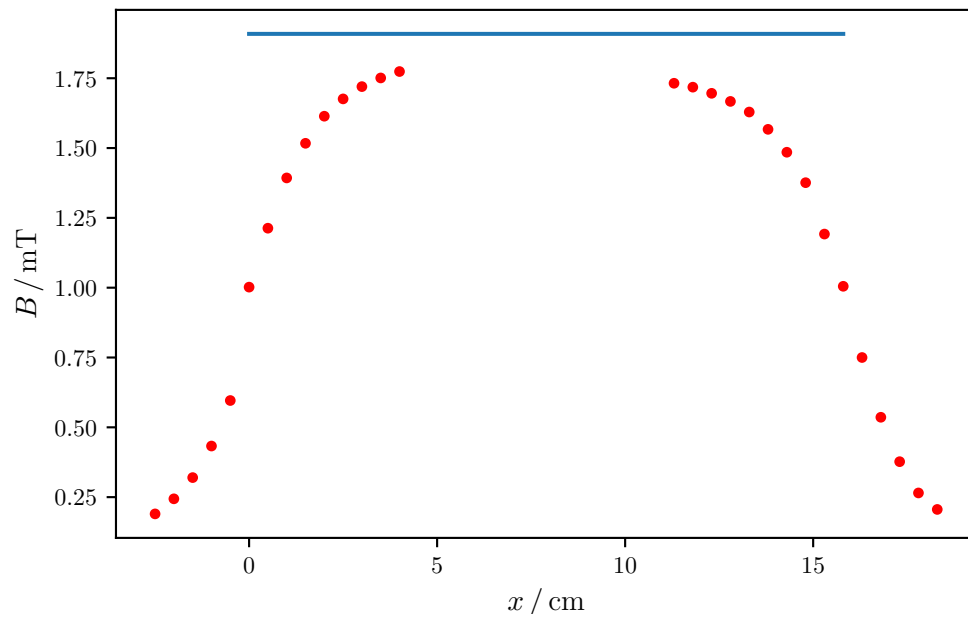
$I / \text{cm}$	$B / \text{mT}$
−2,5	0,190
−2	0,244
−1,5	0,320
−1	0,433
−0,5	0,596
0	1,002
0,5	1,213
1	1,393
1,5	1,517
2	1,614
2,5	1,676
3	1,720
3,5	1,751
4	1,774
11,3	1,732
11,8	1,718
12,3	1,696
12,8	1,667
13,3	1,629
13,8	1,567
14,3	1,485
14,8	1,376
15,3	1,192
15,8	1,005
16,3	0,750
16,8	0,536
17,3	0,377
17,8	0,265
18,3	0,206

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.

$I / \text{cm}$	$B / \text{mT}$
-2,5	0,244
-2	0,335
-1,5	0,447
-1	0,617
-0,5	0,809
0	0,995
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
6,5	0,791
7	0,580
7,5	0,425
8	0,309



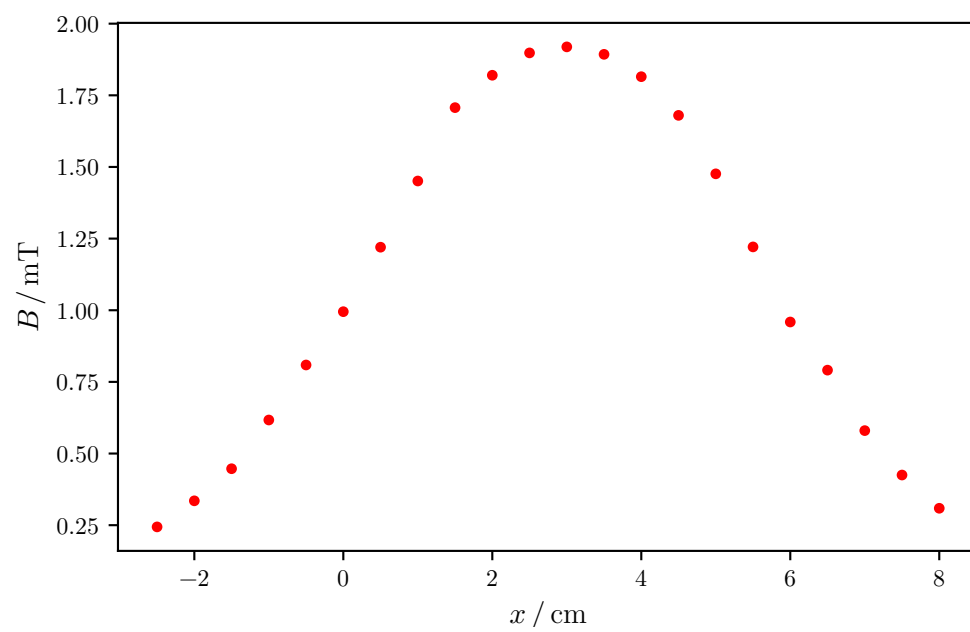
Beim Vergleich mit der Theorie fällt auf, dass die gemessenen Werte noch in der Spule am Randbereich abfallen und auch in der Mitte nicht ganz den vollen Theoriewert erreichen.

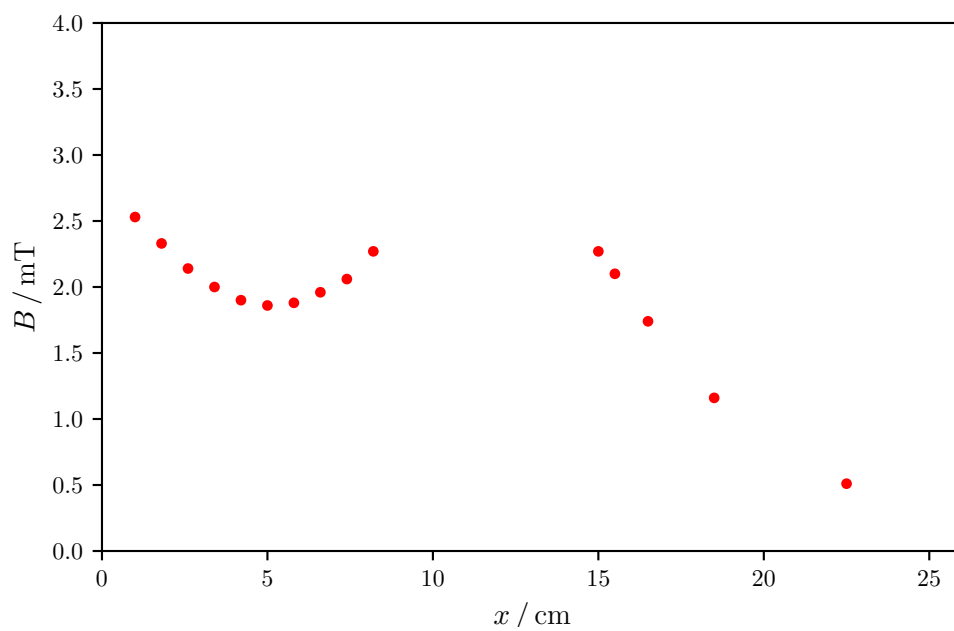
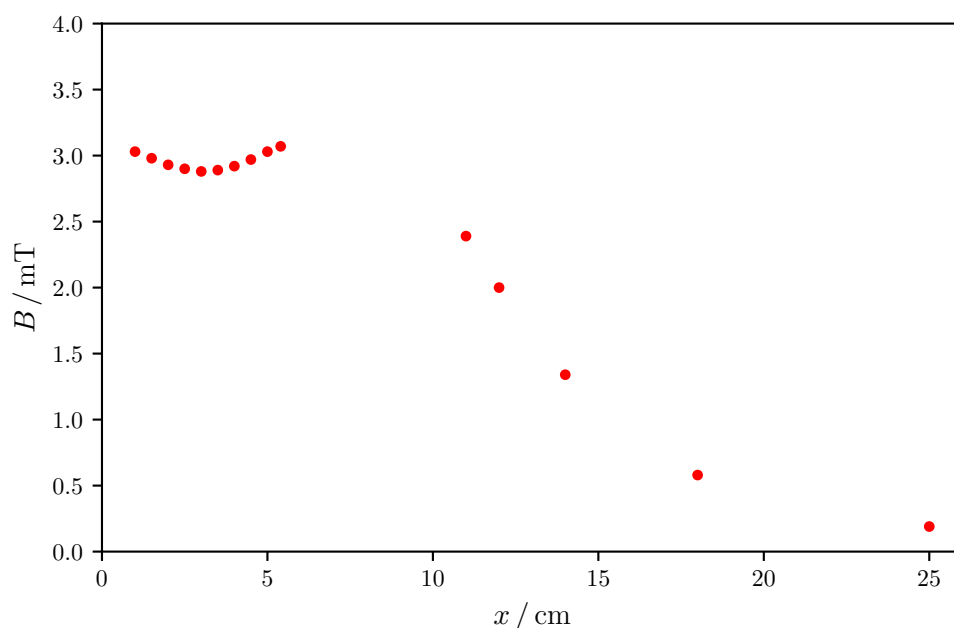


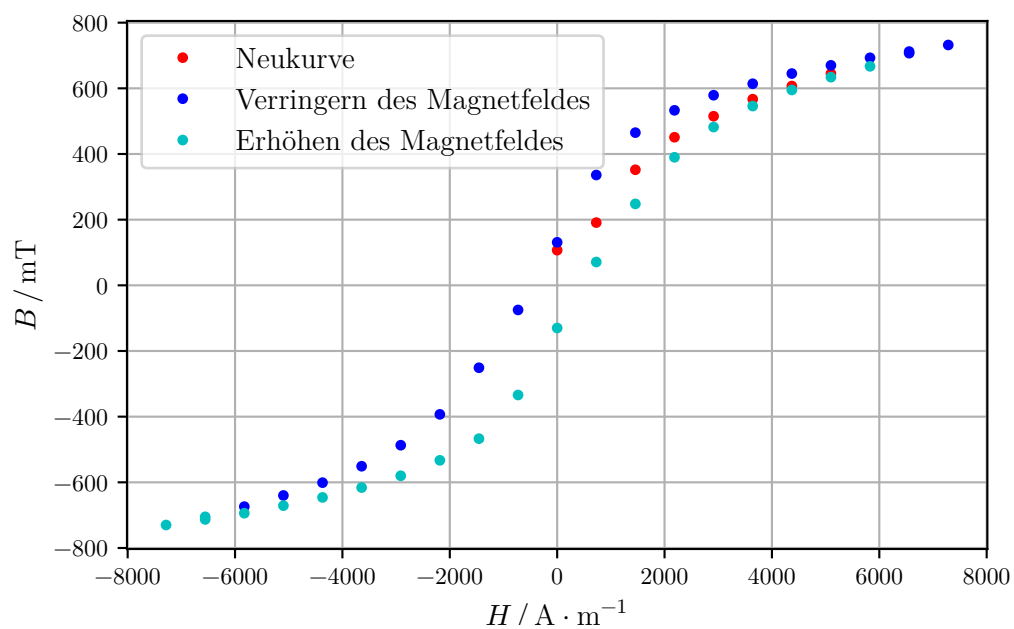
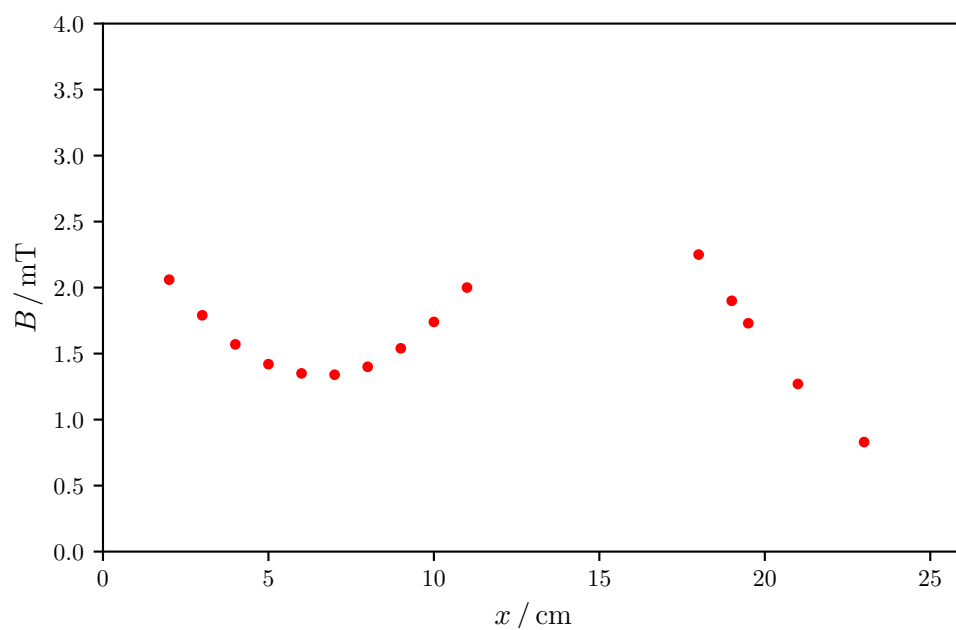
## 4.2 Magnetische Flußdichte eines Helmholtzspulenpaares

## 4.3 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	713	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











## 5 Diskussion

## 6 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

18

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

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

Skizze: 

Messung	Abstand [cm]	B-Feld [mT]
<u>innere Spule:</u>		
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
<u>äußere Spule:</u>		
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]
<u>innere Spule:</u>	1	<del>2,14</del> 2,527
2	1,8	<del>2,261</del> 2,325
3	3,6	<del>2,081</del> 2,133
4	3,4	<del>1,940</del> 1,935
5	4,2	<del>1,850</del> 1,900
6	5	<del>1,807</del> 1,862
7	5,8	<del>1,825</del> 1,883
8	6,6	1,964
9	7,4	2,060
10	8,2	2,272
<u>äußere Spule:</u>	11	15
12	15,5	2,097
13	16,5	1,744
14	18,5	1,158
15	23,5	0,507

~~2,14 2,261 2,450~~  
~~2,081 1,940 1,850 1,807 1,825~~  
 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	0,612	
-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/>.