

V308

## **Magnetfelder und Spulen**

Samuel Haefs

samuel.haefs@tu-dortmund.de

Max Koch

max.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.11.2019

Abgabe: 03.12.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen . . . . .	3
2.2 Biot-Savart . . . . .	3
2.3 Leiterschleifen . . . . .	3
2.4 Spulen . . . . .	4
2.5 Helmholtz-Spule . . . . .	4
2.6 Magnetismus in Materie . . . . .	5
2.6.1 Paramagnetismus . . . . .	5
2.6.2 Diamagnetismus . . . . .	5
2.6.3 Ferromagnetismus . . . . .	5
2.7 Hysterese-Kurve . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1 Magnetfeld von Spulen . . . . .	6
3.2 Magnetfeld eines Spulenpaares . . . . .	7
3.3 Hysteresekurve . . . . .	8
<b>4 Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1 Lange Spule . . . . .	8
4.2 Kurze Spule . . . . .	10
4.3 Helmholtzspulen . . . . .	12
4.4 Hysteresekurve . . . . .	18
<b>5 Diskussion</b>	<b>20</b>
<b>Literatur</b>	<b>21</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>22</b>

# 1 Zielsetzung

Ziel der Versuche ist die Bestimmung der Feldstärke, welche von verschiedenen Spulen erzeugt wird. Die Feldstärke wird in verschiedenen Abständen von der Spule aus gemessen, so kann später der Verlauf dargestellt werden. Mithilfe der Ringspule ist es möglich die Magnetisierung des Eisenkerns mit einer Hysteresis-Kurve zu beschreiben.

## 2 Theorie

### 2.1 Grundlagen

Magnetfelder werden durch die Bewegung elektrischer Ladungen erzeugt. Die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  beschreibt die Richtung und Stärke des Magnetfelds. Der Verlauf des Magnetfeldes kann durch Feldlinien dargestellt werden. Diese bilden sogenannte Schleifen und sind immer geschlossen.

Häufig besitzen Atome allein durch ihre Elektronenanordnung und -bewegung ein dauerhaftes magnetisches Moment. In dem Fall, dass die magnetischen Momente statistisch verteilt sind, kann die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$

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

verwendet werden.

Dabei ist  $\mu$  die Permeabilität und  $\vec{H}$  das von außen angelegte Magnetfeld.  $\mu$  ergibt sich aus der Vakuum-Permeabilität  $\mu_0$  und der materialabhängigen relativen Permeabilität  $\mu_r$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r.$$

### 2.2 Biot-Savart

Jeder stromdurchflossener Leiter (z.B. Draht) ist von einem Magnetfeld umgeben. Dieses verläuft in Schleifen, die in einer Ebene senkrecht zum Stromfluss verlaufen. Das Magnetfeld ergibt sich aus dem Biot-Savartschen Gesetz

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

mit der Magnetfeldstärke  $\vec{B}$  bei dem Abstand  $r$  vom Draht, welcher mit einem Strom  $I$  durchflossen wird.

### 2.3 Leiterschleifen

Das Biot-Savart-Gesetz wird nun verwendet um das Magnetfeld einer Leiterschleife zu berechnen. Eine Leiterschleife kann als Spule mit  $n = 1$  Windungen angesehen werden. Im Mittelpunkt des stromdurchflossenen Ringes folgt aus dem Biot-Savart-Gesetz(2)

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

für die Magnetfeldstärke. Hier beschreibt  $x$  den Abstand zur Ringmitte und  $R$  den Radius des Kreisrings.

## 2.4 Spulen

Bei einem Solenoid (zylindrische Spule) verlaufen die Feldlinien innerhalb der Spule parallel zum Spulenrand. Das Magnetfeld ist in der Spulenmitte homogen und konstant. Außerhalb der Spule verlaufen die Feldlinien in geschlossenen Schleifen. Das Feld ist hier inhomogen.

Die magnetische Feldstärke einer langen Spule berechnet sich durch

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

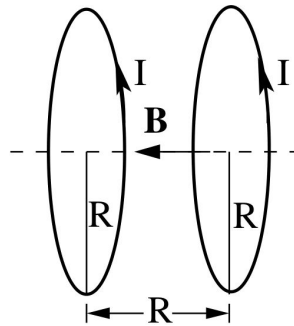
mit der Windungszahl  $n$  und der Spulenlänge  $l$ .

## 2.5 Helmholtz-Spule

Wird ein homogenes Magnetfeld benötigt, so werden häufig zwei gleiche Spulen mit Radius  $R$  verwendet. Die Spulen stehen gegenüber mit dem Abstand  $d = R$  (siehe 1). Das Magnetfeld in der Mitte der Symmetrieachse eines Helmholtz-Spulenpaar mit  $n = 1$  Windungen wird durch

$$B(0) = B_1(x) + B_1(-x) = \frac{\mu_0 I R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (5)$$

beschrieben.



**Abbildung 1:** Helmholtz-Spulenpaar mit Radius  $R$  und Abstand  $d = R$ . [2, S. 2]

Der allgemeine Fall für eine Spule mit  $n$  Windungen und beliebigen Abstand  $d$  wird durch die Formel [1, S. 87–88]

$$B(z) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2 \cdot n}{2} \cdot \left( \frac{1}{((z + d/2)^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{((z - d/2)^2 + R^2)^{3/2}} \right) \quad (6)$$

beschrieben.

## 2.6 Magnetismus in Materie

### 2.6.1 Paramagnetismus

Paramagnetische Stoffe setzen sich aus zufällig angeordneten permanenten magnetischen Dipole zusammen. Von außen betrachtet existiert kein magnetisches Feld, da sich in Summe die Dipole wegheben. Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, so richten sich einige Dipole parallel zum Feld aus.

### 2.6.2 Diamagnetismus

Diamagnetismus beschreibt Stoffe die kein permanentes Dipolmoment besitzen. Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, so richten sich induzierte Dipole gegen das Magnetfeld aus. Auch die Magnetisierung ist dem äußerem Feld entgegengerichtet. Die Probe wird aus dem Magnetfeld heraus gedrückt.

### 2.6.3 Ferromagnetismus

Die Magnetisierung eines Körpers setzt sich aus vielen kleinen Magnetisierungen, wie Ionen und quasifreie Elektronen zusammen. Ferromagnetismus beschreibt Material, welches auch ohne äußeres Feld ein magnetisches Moment besitzt (z.B. Eisen).

Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, so richten sich die magnetischen Momente in sogenannten Weiß'schen Bezirken zueinander aus, bis alle Weiß'schen Bezirke parallel zum Magnetfeld stehen. Wird das äußere Magnetfeld abgeschaltet so besitzt das Material weiterhin ein magnetisches Moment. Die relative Permeabilität  $\mu_r$  ist sehr groß und die Gleichung (1) beschreibt nicht mehr das Magnetfeld  $B$ .

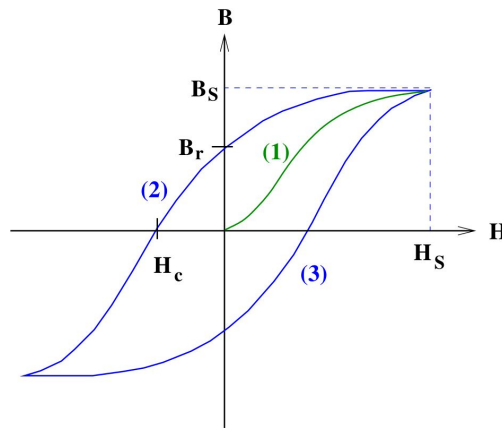
## 2.7 Hysterese-Kurve

Die Änderung der Magnetisierung für ferromagnetische Stoffe, kann durch die Hysterese Kurve dargestellt werden. Der Verlauf der Kurve ist materialabhängig und variiert mit der Vorgeschichte des Materials.

Bei einem zuvor unmagnetisiertem Material sind die Weiß'schen Bezirke ohne äußeres Magnetfeld zufällig verteilt. Wird nun ein äußeres Feld angelegt so steigt die Magnetisierung bis zum Sättigungswert  $B_s$  (siehe Abbildung 5: Neukurve (1)). Hier sind alle Weiß'schen Bezirke parallel ausgerichtet.

Wird jetzt das äußere Magnetfeld abgeschaltet, so bleibt eine Restmagnetisierung, die Remanenz  $B_r$  (siehe Abbildung 5: (2)). Mithilfe der Koerzitivkraft  $H_c$  (ein magnetisches Gegenfeld) kann die Remanenz aufgehoben werden und die Magnetisierung beträgt wieder null.

Wird nun weiter das äußere Magnetfeld erhöht, nähert sich die Magnetisierung dem Sättigungswert  $-B_s$ . Zum Schluss wird das Magnetfeld wieder abgeschaltet und ein Magnetfeld wie am Anfang angelegt (siehe Abbildung 5: (3)).



**Abbildung 2:** Die Hysteresekurve zeigt den Verlauf der Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes. [2, S. 3]

Wie in der Abbildung 5 zu sehen, muss  $\mu_r$  eine Funktion der Feldstärke  $H$  sein. Die differentielle Permeabilität

$$\mu_{\text{diff}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (7)$$

beschreibt die Neukurve(1). Allgemein wird der magnetische Fluss einer Spule mit Eisenkern durch

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (8)$$

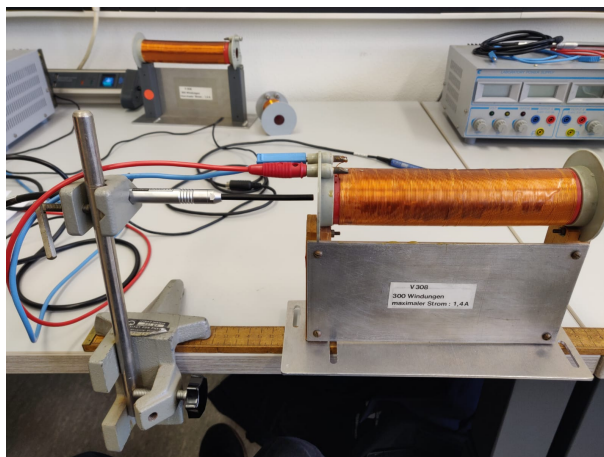
beschrieben, wobei  $\vec{M}$  für die Magnetisierung des Materials steht.

## 3 Durchführung

### 3.1 Magnetfeld von Spulen

Zuerst wird eine Spule an das Netzgerät angeschlossen und eine bestimmte Spannung und einen bestimmten Strom eingestellt. Dabei ist es wichtig den maximalen zulässigen Strom der Spule nicht zu überschreiten. Nun wird eine longitudinale Sonde an der Halterung befestigt. Die Spule wird auf das Lineal gestellt, so dass die Sonde am Anfang der Spule misst (wie in Abbildung 3 zu sehen). Der Ort wird als  $x = 0$  gewählt.

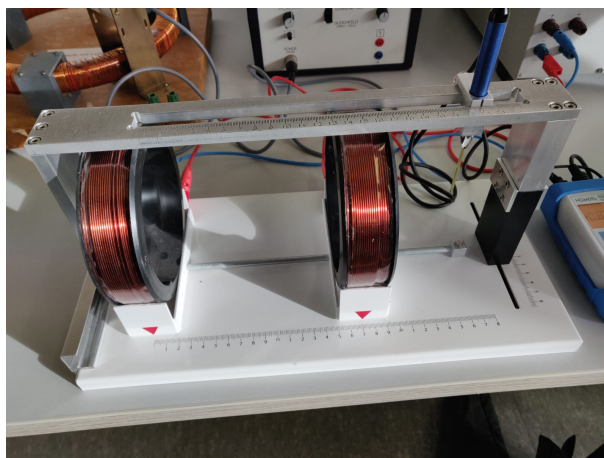
Jetzt wird die magnetische Feldstärke abgelesen und notiert. Im Anschluss wird die Spule um  $\Delta x = 0,5 \text{ cm}$  verschoben und nochmal die Feldstärke gemessen. Insgesamt sollten mindestens 10 Werte innerhalb und ein paar Werte außerhalb der Spule gemessen werden. Um bei der Auswertung einen Plot zu erhalten der die ganze Spule abbildet, sollte die lange Spule gedreht und das Feld gemessen werden. Bei der Drehung der Spule wird das Koordinatensystem um die Länge der Spule verschoben und die Ausrichtung der x-Achse verdreht.



**Abbildung 3:** Versuchsaufbau um das Magnetfeld einer Spule mit einer Hall-Sonde zu messen.

### 3.2 Magnetfeld eines Spulenpaares

Das Spulenpaar wird an das Netzgerät angeschlossen und ein Strom  $I$  und eine Spannung  $U$  wird eingestellt. Um die Spulen nicht zu überlasten sollte der Strom unter 5 A gehalten werden. Von oben wird eine transversale Hall-Sonde zwischen die Spulen montiert (siehe Abbildung 4).



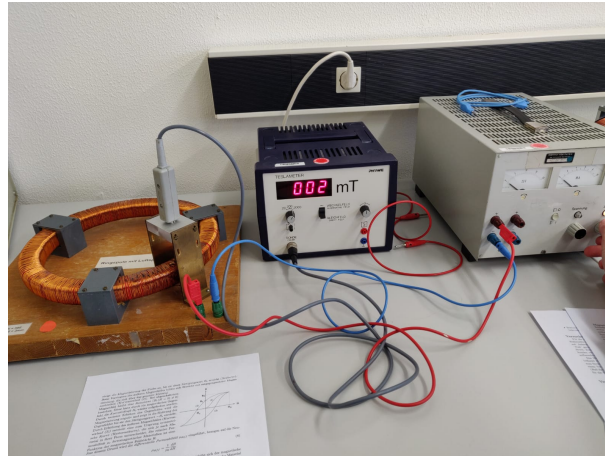
**Abbildung 4:** Spulenpaar mit Abstand  $d$  und Radius  $R$ , mit transversaler Hall-Sonde.

Wichtig dabei ist, dass die Feldlinien transversal auf die Hall-Sonde treffen. Jetzt wird ein wählbarer Spulenabstand eingestellt und das Magnetfeld innerhalb der Spulen und außerhalb der Spulen gemessen. Dieser Vorgang wird mit zwei weiteren Abständen durchgeführt.

### 3.3 Hysteresekurve

Zuerst wird die Ringspule mit dem Netzgerät verbunden und ein Strom  $I$  eingestellt. Hier ist keine externe Hall-Sonde notwendig, da bereits eine festmontierte transversale Hall-Sonde in der Spule verbaut ist. (Abbildung 5)

Um die Neukurve darstellen zu können, wird zuerst die Magnetisierung des Eisenkerns der Spule durch ein Gegenfeld kompensiert und umgepolt, bis kein magnetisches Feld mehr zu messen ist. Dann werden folgende Messungen getätigt



**Abbildung 5:** Versuchsaufbau für die Messung der Magnetfeldstärke für die Ringspule mit Eisenkern.

1. Der Strom wird in 1 A-Schritten erhöht und das Magnetfeld gemessen und notiert, bis 10 A erreicht sind.
2. Anschließend wird der Strom in 1 A-Schritten verringert bis kein Strom mehr fließt. Dann wird die Richtung des Stromfluss vertauscht um ein Gegenfeld zu erzeugen. Auch hier wird wieder das Magnetfeld von 1 bis 10 Volt gemessen und notiert.
3. Nun wird der Strom in 1 A-Schritten reduziert und das Magnetfeld gemessen bis wieder 0 Volt erreicht sind. Dann wird das Feld erneut umgepolt und die magnetische Feldstärke wird in 1 A-Schritten gemessen und notiert.

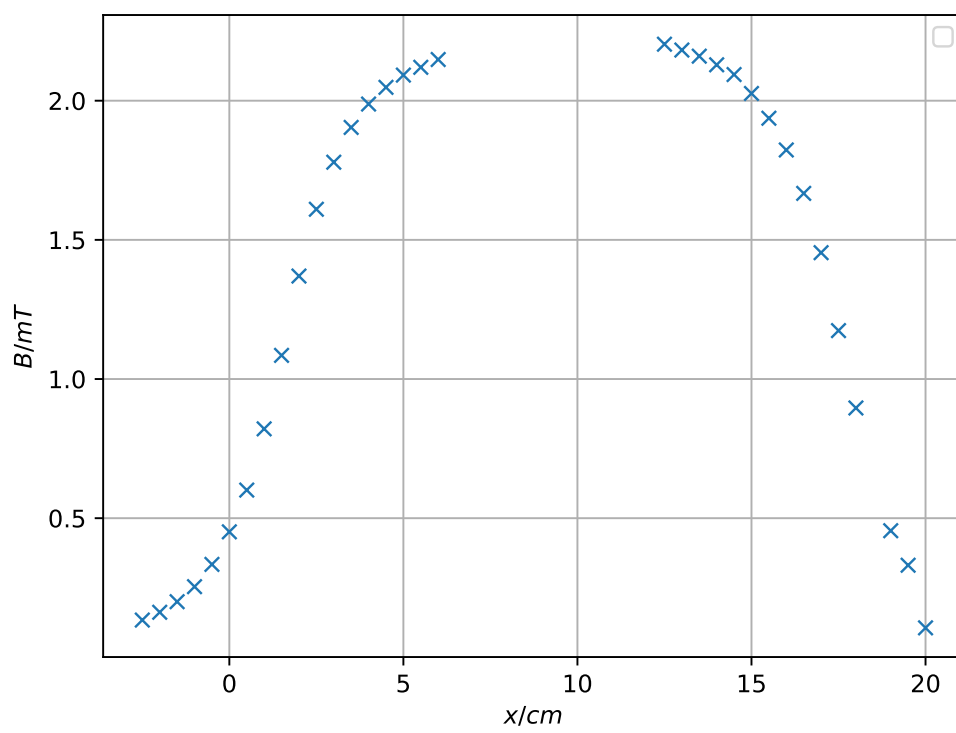
## 4 Auswertung

Die Plots sind mit Verwendung des Python Plug-In matplotlib [3] erstellt.

### 4.1 Lange Spule



**Abbildung 6:** Das Magnetfeld der langen Spule in Abhängigkeit vom Ort in der Spule.



**Tabelle 1:** Messwerte der langen Spule.

$x / \text{cm}$	$B / \text{mT}$	$x / \text{cm}$	$B / \text{mT}$
-2.5	0.134	6.0	2.148
-2.0	0.162	12.5	2.203
-1.5	0.2	13.0	2.182
-1.0	0.254	13.5	2.160
-0.5	0.334	14.0	2.129
0.0	0.451	14.5	2.094
0.5	0.601	15.0	2.026
1.0	0.821	15.5	1.937
1.5	1.085	16.0	1.823
2.0	1.370	16.5	1.667
2.5	1.610	17.0	1.454
3.0	1.779	17.5	1.174
3.5	1.904	18.0	0.896
4.0	1.988	19.0	0.455
4.5	2.048	19.5	0.331
5.0	2.092	20.0	0.106
5.5	2.120		

In der Tabelle 1 sind die gemessenen Werte aufgefasset. Dabei steht  $x = 0$  für den Anfang der Spule. In der Abbildung 6 sind die Werte graphisch dargestellt. Da aus technischen Gründen das Magnetfeld in der Mitte der Spule nicht gemessen werden kann, wird näherungsweise der Messerte bei 6 cm genommen.

$$B(6 \text{ cm}) = 2,148 \text{ mT}$$

Der nach (4) berechnete Werte liegt bei:

$$B = 1,9936 \text{ mT}$$

Dabei ist  $n = 300$ , die Stromstärke  $I = 1 \text{ A}$  und die Länge  $l = 18,9 \text{ cm}$ .

## 4.2 Kurze Spule

Die Messwerte des Magnetfeldes der kurzen Spule sind in der Tabelle 2 zu sehen. Grafisch aufgetragen ergibt sich die Kurve in Abbildung 7. Das Magnetfeld in der Mitte der Spule hat nach Messung folgenden Wert

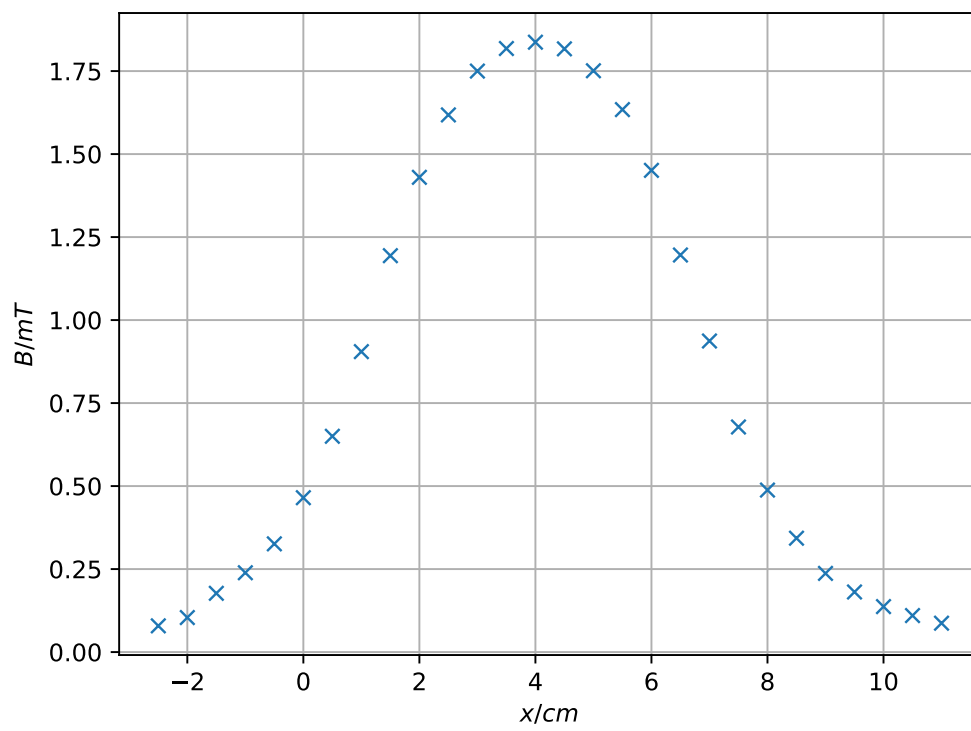
$$B(4 \text{ cm}) = 1,837 \text{ mT}.$$

Der theoretisch berechnete Werte liegt bei

$$B = 1,477 \text{ mT}$$

mit  $I = 1 \text{ A}$ ,  $n = 100$  und  $l = 8,5 \text{ cm}$ .

**Abbildung 7:** Die Messwerte aus der Tabelle 2 grafisch aufgefasst.



**Tabelle 2:** Messwerte der kurzen Spule.

$x / \text{cm}$	$B / \text{mT}$	$x / \text{cm}$	$B / \text{mT}$
-2.5	0.079	4.5	1.817
-2.0	0.104	5.0	1.751
-1.5	0.177	5.5	1.634
-1.0	0.239	6.0	1.451
-0.5	0.326	6.5	1.196
0.0	0.465	7.0	0.937
0.5	0.650	7.5	0.678
1.0	0.905	8.0	0.488
1.5	1.194	8.5	0.343
2.0	1.430	9.0	0.237
2.5	1.618	9.5	0.181
3.0	1.750	10.0	0.137
3.5	1.818	10.5	0.110
4.0	1.837	11.0	0.087

### 4.3 Helmholtzspulen

Das Magnetfeld der Helmholtzspulen wird für drei verschiedene Abstände gemessen. Es ergeben sich Abstände  $d_1 = 11 \text{ cm}$ ,  $d_2 = 7 \text{ cm}$  und  $d_3 = 15 \text{ cm}$ . Dabei folgt für die Messung bei dem Abstand  $d_1$ , die Werte in Tabelle 3. Die Werte in Tabelle 4 zeigen die Messungen für den Abstand  $d_2 = 7 \text{ cm}$ . Die Messung für den Abstand  $d_3 = 15 \text{ cm}$  ergeben die Werte in Tabelle 5. Die Werte in den Tabellen werden in den Graphiken 8 für  $d_1$ , 9 für  $d_2$  und 10 für  $d_3$  dargestellt.

Alle Theoriewerte werden mit einer Stromstärke von  $I = 2,5 \text{ A}$ , einer Windungszahl von  $n = 100$  und einem Spulendurchmesser von  $d = 0,125 \text{ m}$  berechnet. Bei dem Spulenpaar mit Abstand  $d_1$  wird in der Mitte der beiden Spulen eine Feldstärke von

$$B(5,5 \text{ cm}) = 2,755 \text{ mT}$$

gemessen. Der nach Gleichung (6) berechnete Theoriewert beträgt dabei

$$B_1 = 2,241 \text{ mT}.$$

Beim Abstand  $d_2$  kann das Magnetfeld nicht in der Mitte der Spulen gemessen werden. Deswegen wird der Wert für  $x = 2 \text{ cm}$

$$B(2 \text{ cm}) = 3,841 \text{ mT}$$

mit dem Theoriewert verglichen (6) und

$$B_2 = 3,255 \text{ mT}$$

beträgt. Für den Abstand  $d_3$  hat das Magnetfeld in der Mitte der Spulen eine Stärke von

$$B(8\text{ cm}) = 1,919\text{ mT}.$$

Der Theoriewert beträgt dabei

$$B_3 = 2,656\text{ mT}.$$

**Tabelle 3:** Messwerte der Helmholtzspulen mit Abstand  $d_1 = 11\text{ cm}$ .

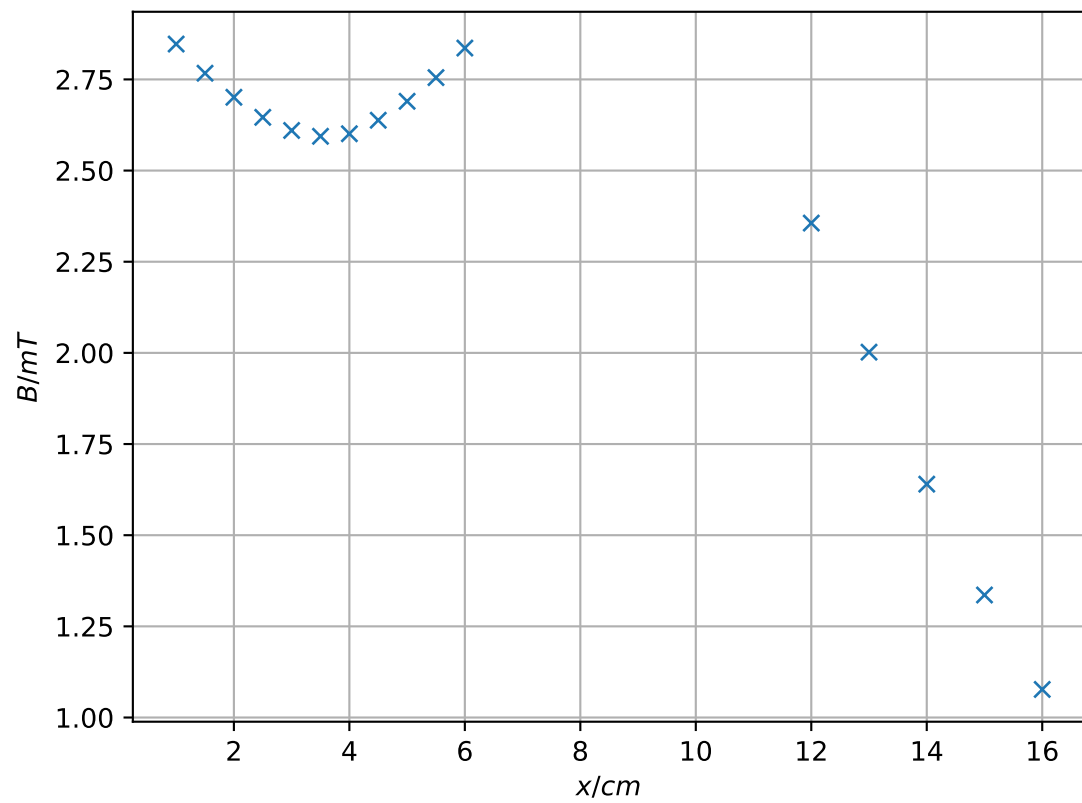
$x / \text{ cm}$	$B / \text{ mT}$
1.0	2.847
1.5	2.767
2.0	2.701
2.5	2.646
3.0	2.610
3.5	2.594
4.0	2.601
4.5	2.638
5.0	2.690
5.5	2.755
6.0	2.836
12.0	2.356
13.0	2.002
14.0	1.640
15.0	1.336
16.0	1.077

**Tabelle 4:** Messwerte der Helmholtzspulen mit Abstand  $d_2 = 7$  cm.

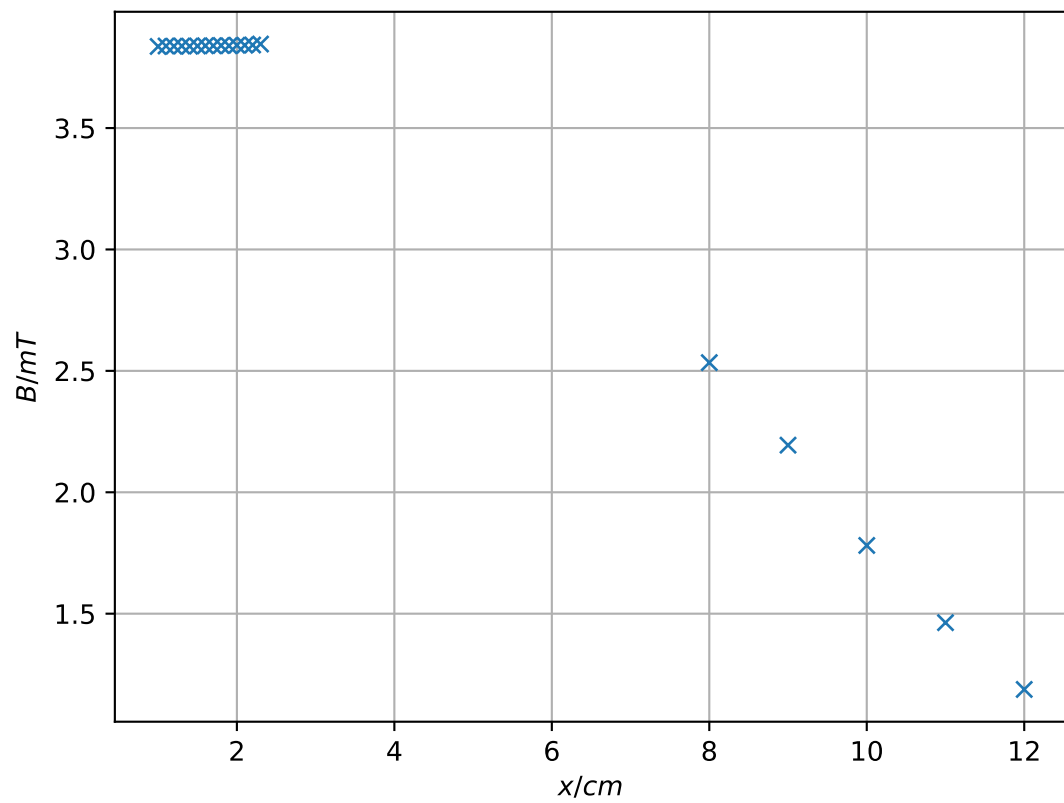
$x$ / cm	$B$ / mT
1.0	3.836
1.1	3.838
1.2	3.837
1.3	3.838
1.4	3.837
1.5	3.838
1.6	3.839
1.7	3.839
1.8	3.840
1.9	3.839
2.0	3.841
2.1	3.841
2.2	3.842
2.3	3.846
8.0	2.534
9.0	2.194
10.0	1.781
11.0	1.463
12.0	1.188

**Tabelle 5:** Messwerte der Helmholtzspulen mit Abstand  $d_3 = 15$  cm.

$x$ / cm	$B$ / mT
1	2.423
2	2.155
3	1.927
4	1.753
5	1.668
6	1.665
7	1.753
8	1.919
9	2.149
10	2.418
16	2.229
17	1.899
18	1.561
19	1.262
20	1.015

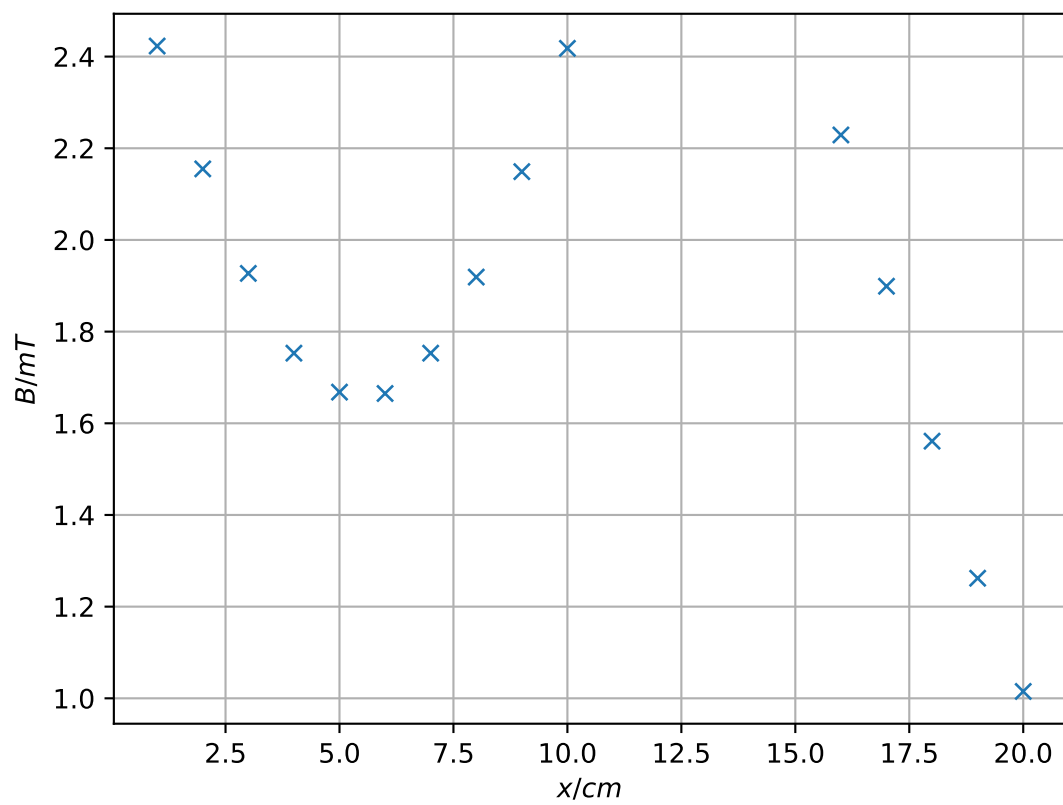


**Abbildung 8:** B-Feld in Abhängigkeit vom Ort  $x$  mit dem Spulenabstand  $d_1 = 11$  cm.



**Abbildung 9:** B-Feld in Abhängigkeit vom Ort  $x$  mit dem Spulenabstand  $d_2 = 7$  cm.





**Abbildung 10:** B-Feld in Abhängigkeit vom Ort  $x$  mit dem Spulenabstand  $d_3 = 15$  cm.

#### 4.4 Hysteresekurve

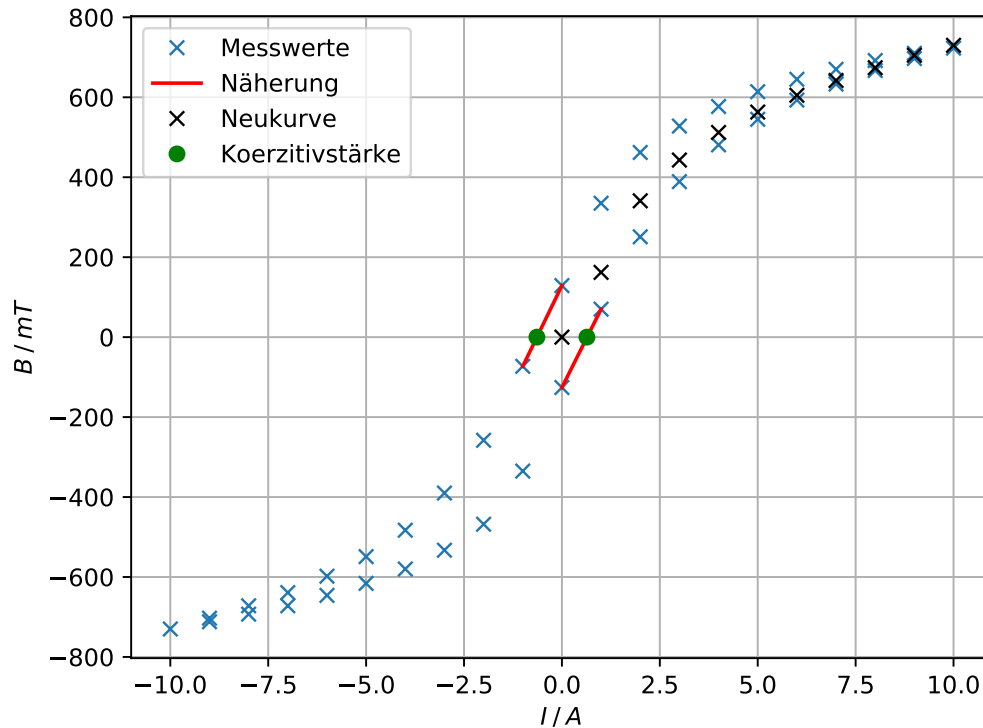


Abbildung 11: Die Hysteresekurve.

In der Tabelle 6 sind die Messwerte zum Magnetfeld der Ringspule aufgetragen. Die Werte sind in einer Hysteresekurve (Abbildung 11) dargestellt. Zu erkennen ist dabei, dass die Remanenz  $B_r$  bei

$$B_r = 129 \text{ mT}$$

liegt. In der Graphik 11 ist außerdem die Koerzitivfeldstärke  $H_c$  aufgetragen. Dieser Wert wird durch eine Näherung ermittelt. Diese erfolgt durch die Verbindung des Punktes  $I = 0 \text{ A}, B = 129 \text{ mT}$ , an welchem sich die Remanzen des Materials befindet. Mit dem Punkt  $I = -1 \text{ A}, B = -73 \text{ mT}$ , dieser ist der erste Punkt in der Tabelle 6 an dem das Magnetfeld ein negatives Vorzeichen hat. Nun wird die Nullstelle der Gerade berechnet um letztendlich den Wert für die Koerzitivfeldstärke

$$I_c = 0,638 \text{ A.}$$

zu ermitteln. Auch die Koerzitivfeldstärke der anderen Umpolung der Magnetfelder werden mit Hilfe dieser linearen Annäherung berechnet.

**Tabelle 6:** Messwerte der Ringspule mit Eisenkern.

$I / \text{A}$	$B / \text{mT}$	$I / \text{A}$	$B / \text{mT}$
0	0	-9	-712
1	162	-8	-693
2	341	-7	-672
3	443	-6	-646
4	512	-5	-616
5	563	-4	-580
6	605	-3	-533
7	642	-2	-468
8	674	-1	-335
9	705	0	-126
10	730	1	70
9	710	2	251
8	692	3	389
7	670	4	481
6	645	5	545
5	614	6	593
4	577	7	633
3	528	8	667
2	462	9	697
1	335	10	723
0	129		
-1	-073		
-2	-258		
-3	-390		
-4	-483		
-5	-549		
-6	-598		
-7	-639		
-8	-672		
-9	-703		
-10	-730		

## 5 Diskussion

Bei der Auswertung der langen Spule fällt auf, dass das vermutete Plateau nicht gemessen wird, da aufgrund der kurzen Hallsonde die Mitte der Spule nicht erreicht werden kann. In Abbildung 6 sollte zwischen den gemessenen Werten ein Plateau liegen.

Bei der kurzen Spule kann die Mitte der Spule erreicht werden. Allerdings ist kein Plateau zu messen, da durch die Länge der Spule die Randeffekte nicht vernachlässigt werden können. Dabei ist die prozentuale Abweichung, des experimentellen Wert und theoretischen Wert der langen Spule und der kurzen Spule in der Tabelle 7 aufgetragen. Die große Abweichung bei der kurzen Spule ist damit zu Begründen, dass bei der kurzen Spule die Randeffekte wesentlich größer sind als bei der langen Spule.

Bei dem Versuch mit den Helmholtzspulenpaar ist gut zu sehen, dass die Spulen nur bei einem bestimmten Abstand ein homogenes Feld aufbauen. Dabei kommt der Abstand  $d_2 = 7 \text{ cm}$  am nächsten an den optimalen Abstand  $d = R$  heran. Wie in der Grafik 9 zu sehen ist für diesen Abstand das Feld am homogensten. Die relativen Abweichungen sowie Theoriewerte und gemessene Werte sind für  $d_1$ ,  $d_2$  und  $d_3$  in der Tabelle 8 zusammengefasst. Die Abweichung kommt zustande, da der optimale Fall von  $d = R$  nicht erreicht wird.

Da der Wert der Koerzitivkraft nicht direkt gemessen werden kann, wird dieser angenähert indem eine Verbindungslinie zwischen den zwei Werten gezogen wird, die der Koerzitivkraft am nächsten sind. Es fällt auf, dass die Hysteresekurve aufgrund des Materials des Kerns und ihrer Vorgeschichte schmaler als die typische Theoriekurve 5 verläuft.

**Tabelle 7:** Messwerte, Theoriewert und relative Abweichung der kurzen und langen Spule.

Spulenart	Messwert $B / \text{mT}$	Theoriewert $B / \text{mT}$	relative Abweichung in %
lange Spule	1.837	1.993	7.188
kurze Spule	1.837	1.477	19.597

**Tabelle 8:** Messwerte aufgetragen mit Theoriewerte und der relativen Abweichung bei der Helmholtzspule.

Spulenabstand $d / \text{cm}$	Messwert $B / \text{mT}$	Theoriewert $B / \text{mT}$	relative Abweichung in %
$d_1 = 11$	2.755	2.241	18.656
$d_2 = 7$	3.842	3.255	15.256
$d_3 = 15$	1.919	2.656	38.405

## Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2. Das Magnetfeld eines Helmholtz-Spulenpaares*. 7. Aufl. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017.
- [2] TU Dortmund. *Versuch 308 zu Spulen und Magnetfelder*. 2014.
- [3] 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/>.

## 6 Anhang

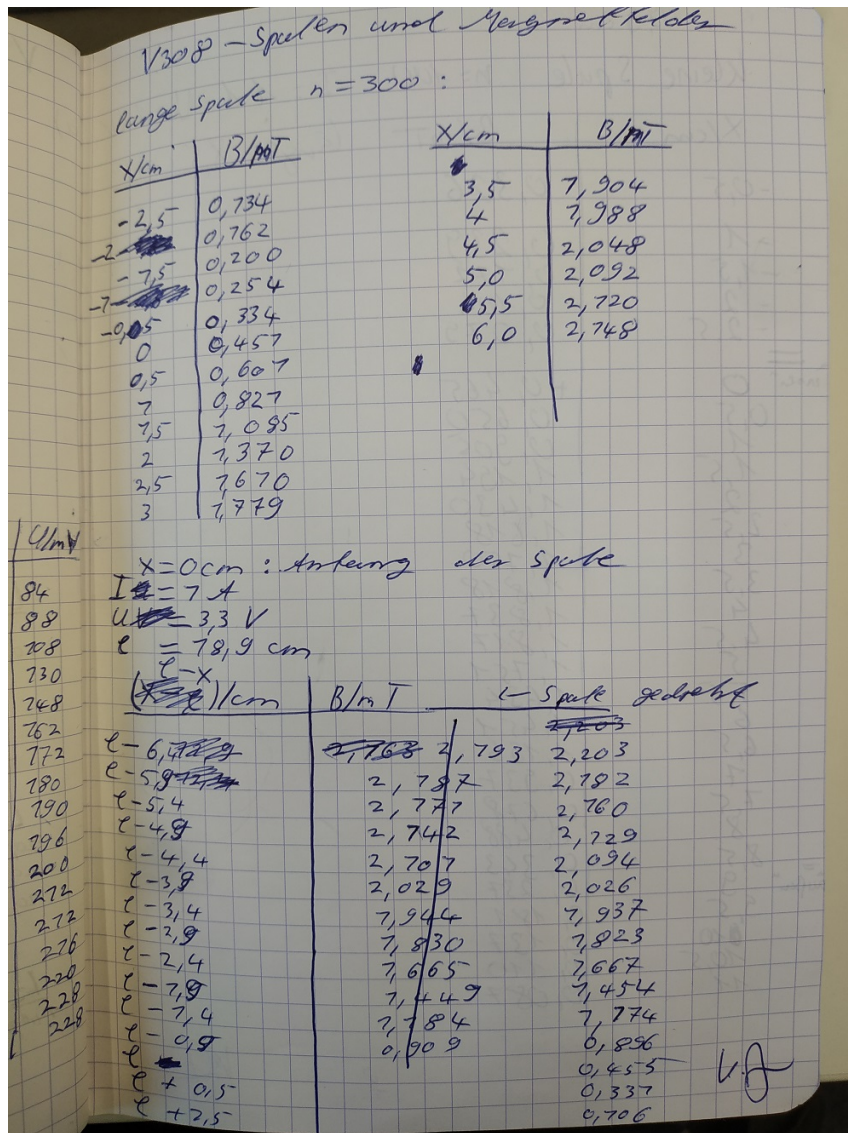


Abbildung 12: Seite 1 der Daten zu dem Versuch 308 Magnetfelder und Spulen.

kleine Spule  $n=100$   $I=1A$   $U=1,1V$   
 $\text{Länge } 8,5 \text{ cm}$

$x/\text{cm}$	$B/\text{mT}$
-0,5	0,326
-1	0,239
-1,5	0,177
-2	0,104
-2,5	0,079
<hr/>	
0	+0,465
0,5	0,650
1	0,905
1,5	1,154
2	1,430
2,5	1,618
3	1,750
3,5	1,818
4	1,837
4,5	1,817
5	1,751
5,5	1,634
6	1,451
6,5	1,186
7	0,937
7,5	0,678
8	0,488
8,5	0,343
9	0,237
9,5	0,181
10	0,137
10,5	0,110
11	0,087

Abbildung 13: Seite 2 der Daten zu dem Versuch 308 Magnetfelder und Spulen.

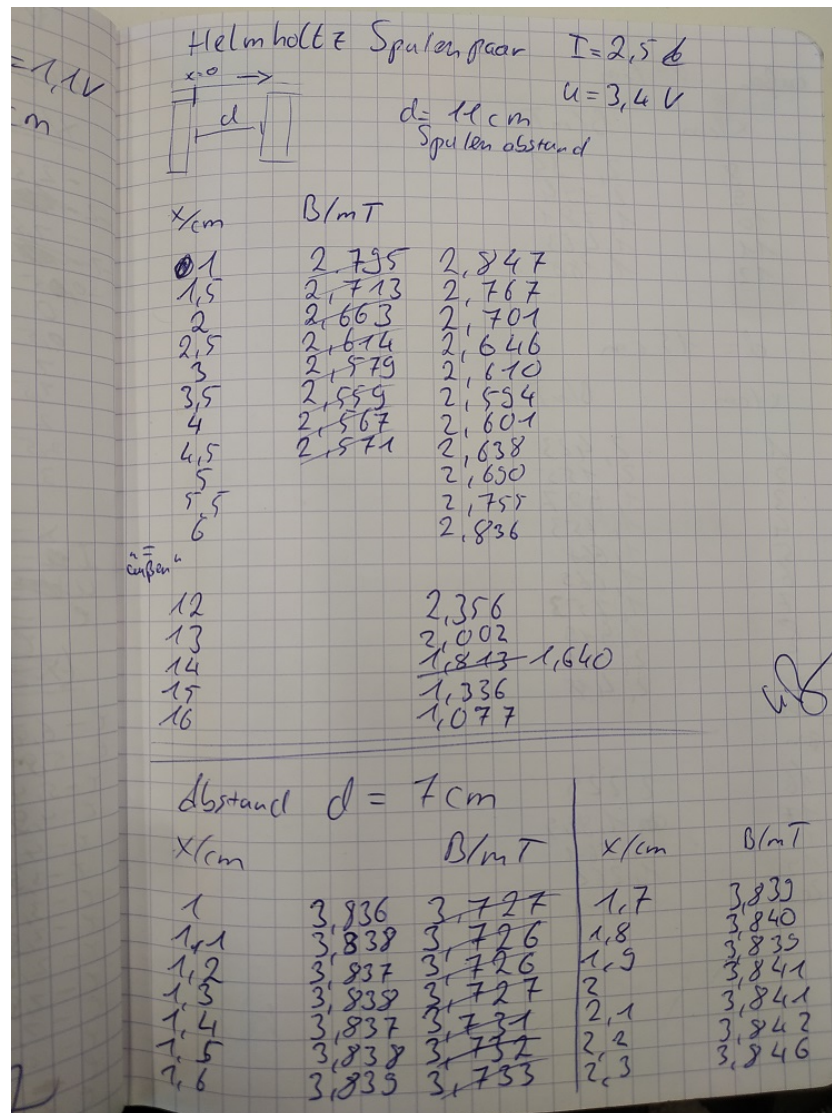


Abbildung 14: Seite 3 der Daten zu dem Versuch 308 Magnetfelder und Spulen.



außen	$d = 7 \text{ cm}$
$x / \text{cm}$	$B / \text{mT}$
8	2,534
9	2,154
10	1,781
11	1,463
12	1,188
	$d = 15 \text{ cm}$
$x / \text{cm}$	$B / \text{mT}$
1	2,423
2	2,155
3	1,927
4	1,753
5	1,668
6	1,665
7	1,753
8	1,919
9	2,149
10	2,418
<del>11</del>	
außen	
16	2,225
17	1,859
18	1,561
19	1,262
20	1,015

Abbildung 15: Seite 4 der Daten zu dem Versuch 308 Magnetfelder und Spulen.

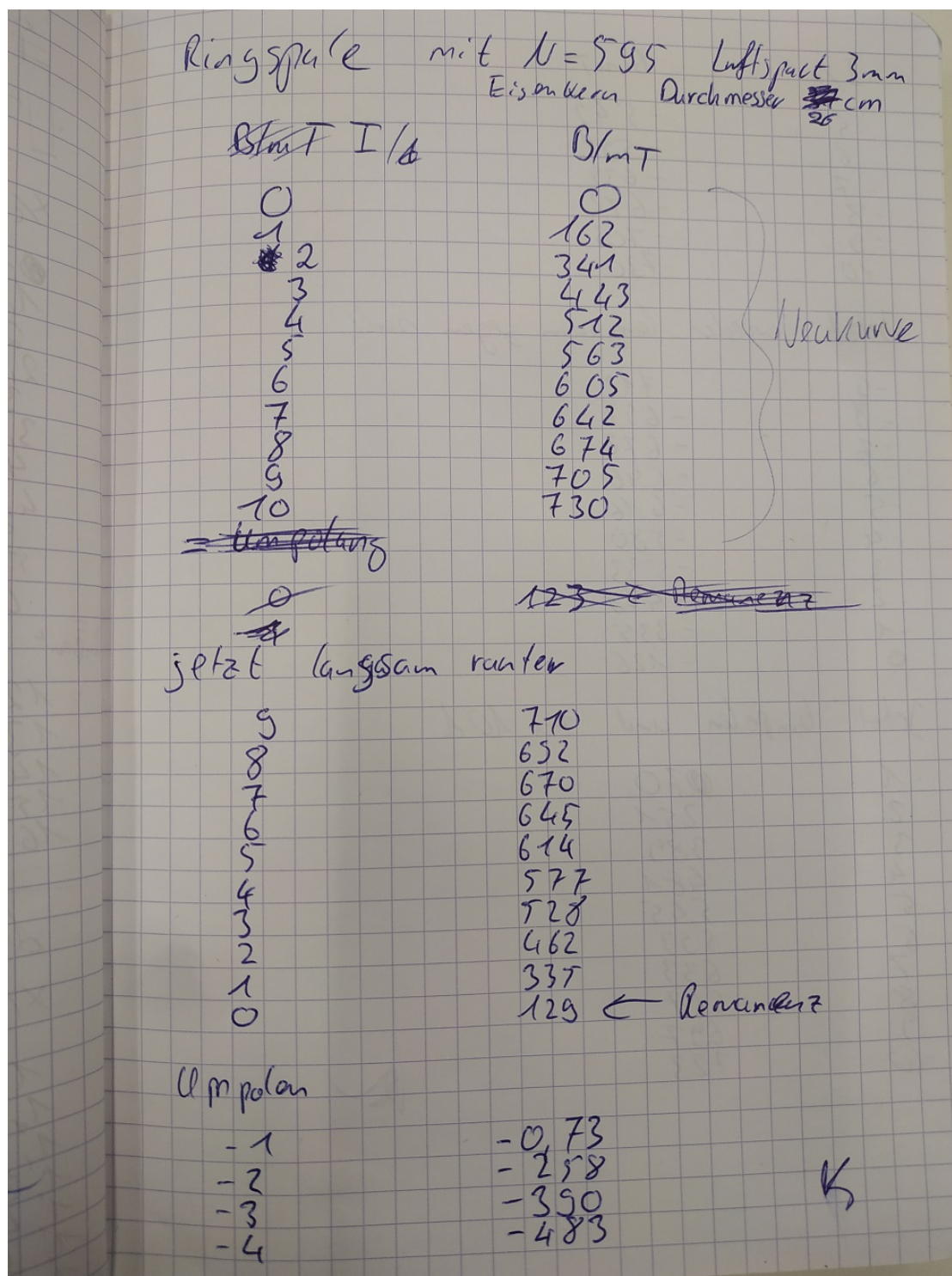


Abbildung 16: Seite 5 der Daten zu dem Versuch 308 Magnetfelder und Spulen.

I/A	B/mT
-5	-549
-6	-558
-7	-639
-8	-672
-9	-703
-10	-730
Jetzt wieder langsam gegen null	
-9	-712
-8	-693
-7	-672
-6	-646
-5	-616
-4	-580
-3	-533
-2	-468
-1	-335
0	-126
Jetzt umpolen und zu 10A	
1	070
2	251
3	389
4	481
5	545
6	553
7	633
8	667
9	697
10	723

Abbildung 17: Seite 6 der Daten zu dem Versuch 308 Magnetfelder und Spulen.