

**V308**

# **Spulen und Magnetfelder**

Justus Weber

justus.weber@tu-dortmund.de

Guy Lochny

guy.lochny@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.12.2024

Abgabe: 17.12.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Hysteresekurve . . . . .	3
2.2 Fehlerrechnung . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>4</b>
3.1 Magnetfeld von Spulen . . . . .	4
3.2 Hysteresekurve . . . . .	5
3.3 Helmholtz-Spule . . . . .	7
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Magnetfeld von Spulen . . . . .	7
4.1.1 Kurze Spule . . . . .	7
4.1.2 Lange Spule . . . . .	9
4.2 Hysteresekurve . . . . .	12
4.3 Helmholtz-Spulen . . . . .	14
<b>5 Diskussion</b>	<b>18</b>
5.1 Magnetfeld einer langen und kurzen Spule . . . . .	18
5.2 Hysteresekurve . . . . .	18
5.3 Helmholtz-Spule . . . . .	19
<b>6 Anhang</b>	<b>19</b>
<b>Literatur</b>	<b>23</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Experiment sollen die Magnetfelder von unterschiedlichen Spulen gemessen und darüber hinaus die Hysteresekurve erstellt werden.

## 2 Theorie

Der gesamte Versuch basiert auf der Tatsache, dass bewegte Ladungen magnetische Felder erzeugen. Aufgrund von Elektronenbewegungen verfügen Atome über ein magnetisches Moment. Es gilt die Verknüpfung

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

wenn sich diese Momente statistisch im Raum verteilen. Der Faktor  $\mu$  wird dabei als Permeabilität bezeichnet und setzt sich durch die Vakuum-Permeabilität  $\mu_0$  und die relative Permeabilität  $\mu_r$  (in Materie) mittels des Produkts Beider zusammen. Bei jedem stromdurchflossenen Leiter sind die Feldlinien konzentrische Kreise, welche senkrecht zu dem Stromfluss stehen. Die dazugehörige Magnetfeldstärke  $\vec{B}$  mit einem Abstand  $r$  zum Leiter lässt sich über das Biot-Savart-Gesetz bestimmen.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V j(\vec{r}') \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{(|\vec{r} - \vec{r}'|)^3} dV' \quad (2)$$

Damit lässt sich ein Zusammenhang für die magnetische Flussdichte im Mittelpunkt eines Leiterrings mit  $n$  Windungen erstellen:

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

Das Magnetfeld innerhalb eines Solenoids gilt als homogen, solange die Bedingung  $R \ll l$  erfüllt ist ( $R$ : Radius,  $l$ : Länge). Die Feldlinien verlaufen parallel zu der Symmetriechse und sind geschlossen. Es lässt sich festhalten:

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

Handelt es sich um eine Spule mit Eisenkern, so fließt noch die Magnetisierung  $\vec{M}$  mit ein. Der Magnetische Fluss ergibt sich dann als

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}). \quad (5)$$

### 2.1 Hysteresekurve

Die Hysteresekurve zeigt das Verhalten eines ferromagnetischen Materials unter Einfluss eines wechselnden Magnetfelds. Bei Anlegung eines äußeren Magnetfeldes steigt die Magnetisierung des Materials an. Der anschließend erreichte Wert wird auch Sättigungswert  $B_S$  genannt.

Verschwindet das Feld, bleibt die Remanenz  $B_R$ , eine Restmagnetisierung, welche bei Visualisierung als y-Achsenabschnitt zu verstehen wäre. Um diese aufzuheben, kann die Koerzitivkraft  $H_C$ , ein Gegenfeld, genutzt werden. Durch diese Umpolung zeigt diese Magnetisierung symmetrisch in die andere Richtung, effektiv wird  $-B_S$  erreicht. Es ergibt sich die Hysteresekurve.

Dabei ist wichtig, dass diese nicht allgemeingültig ist und von Material zu Material unterschiedliches Ausmaß annimmt. Die Kurve hängt vom Ausgangszustand der Probe ab, so sollte das Material auch zu Beginn nicht magnetisiert sein. Die relative Permeabilität  $\mu_r$  ferromagnetischer Materialien abhängig von der magnetischen Feldstärke  $H$ , welche das Außenfeld erzeugt. Demfolgend wird die differentielle Permeabilität eingeführt.

$$\mu_{diff} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (6)$$

## 2.2 Fehlerrechnung

Die gemessenen Werte unterliegen Messunsicherheiten und werden demnach im Folgenden nicht als fehlerfrei angesehen. Die Fehler entstehen bei der Bildung der Mittelwerte durch den Fehler des Mittelwerts und bei der Regressionsrechnung sowie der Fehlerfortpflanzung durch Python. Der Fehler des Mittelwerts ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \Delta\bar{x} &= \sqrt{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \\ &= \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Um Fehler einzubeziehen, wird die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung verwendet:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (8)$$

## 3 Durchführung

### 3.1 Magnetfeld von Spulen

Der Versuchsaufbau ist recht simpel, zwei Spulen (eine längere, welche von beiden Seiten untersucht werden muss und eine kürzere) werden untersucht, dazu werden eine Hall-Sonde (befestigt auf einem Lineal) und ein Steuergerät verwendet.

Die im Bild zu erkennende Spule wird mithilfe einer longitudinalen Hall-Sonde untersucht, diese wird dazu langsam in die Spule eingeführt. Jeweils in 1 cm- Abständen wird die Magnetfeldstärke gemessen und dokumentiert, außerhalb der Spule werden bereits Messwerte aufgenommen. Der Strom wird maximal aufgedreht für den Strom wird 1 A angelegt. Es ist darauf zu achten, dass das alles möglichst präzise platziert wird; die Hall-Sonde auf dem Lineal, die Spule parallel zu diesem, sowie die Ausrichtung der

**Abbildung 1:** Hallsonde und Spule [1].



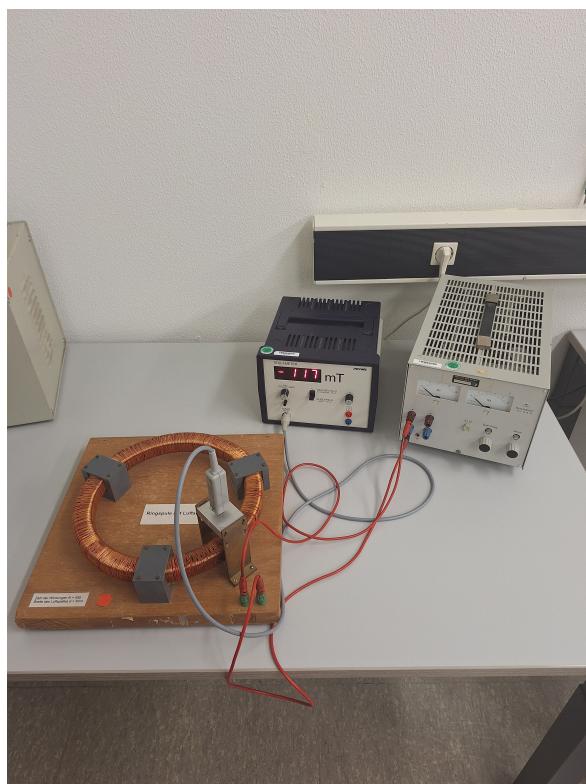
Sonde bei Einführung in die Spule. Da das Magnetfeld nicht überall identisch ist, können bereits kleine Abweichungen zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Dokumentation der Magnetfeldstärke führen.

Dieser Vorgang wird für eine längere und eine kürzere Spule durchgeführt. Bei der kürzeren reicht es, die Hall-Sonde von einer Seite durchzuführen. Die andere Spule hingegen ist jedoch zu lang, sodass die Sonde beidseitig hineingeleitet wird.

### 3.2 Hysteresekurve

Der Versuchsaufbau unterscheidet sich nicht wesentlich von dem Vorherigen, es liegt eine Ringspule mit Luftspalt vor, welche an ein Netzgerät und eine transversale Hall-Sonde angeschlossen ist. Genau so wird eine maximale Spannung angelegt. Wichtig ist, dass eine Entmagnetisierung der Torusspule stattfindet, damit kein Magnetfeld das Experiment beeinflusst. Um nun an die gefragte Hysteresekurve, Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivkraft zu gelangen, wird der Strom variiert; Es wird eine Steigerung um 1 A bis zu einem Limit von 5 A gewählt. Der höchste Wert gibt schlussendlich den Sättigungswert  $B_S$  an. Darauffolgend wird der Strom in identischen Abständen wieder herunterreguliert. Wird kein Spulenstrom mehr detektiert, so kann an der Hall-Sonde die Remanenz abgemessen werden. Anschließend findet eine Umpolung statt, welche möglichst schnell stattfinden sollte, damit ungewünschte Effekte wie Energieverluste oder thermische Effekte vermieden werden können. Weiterhin wird die Stromstärke wie gehabt schrittweise erhöht (bis zur negativen Sättigung  $B_S$ ) und danach wieder verringert, woraufhin eine letzte Umpolung stattfindet und der Versuch anschließend beendet wird.

**Abbildung 2:** Toroidspule mit Eisenkern [1].



### 3.3 Helmholtz-Spule

Abbildung 3: Spulenpaar [1].



Das in der Abbildung gezeigte Helmholtz-Spulen-Paar wird in Reihe geschaltet bei einer maximalen Spannung. Die Spulen werden zunächst in einem beliebigen Abstand ausgerichtet, mithilfe der transversalen Hall-Sonde wird dann die Magnetfeldstärke in 1 cm-Abständen gemessen, jenes geschieht sowohl innerhalb-als auch außerhalb der Spule. Bei dem Messvorgang wird eine Stromstärke von 5 A nicht überschritten. Die gemessenen Ergebnisse werden dann mit den theoretischen Werten verglichen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Magnetfeld von Spulen

#### 4.1.1 Kurze Spule

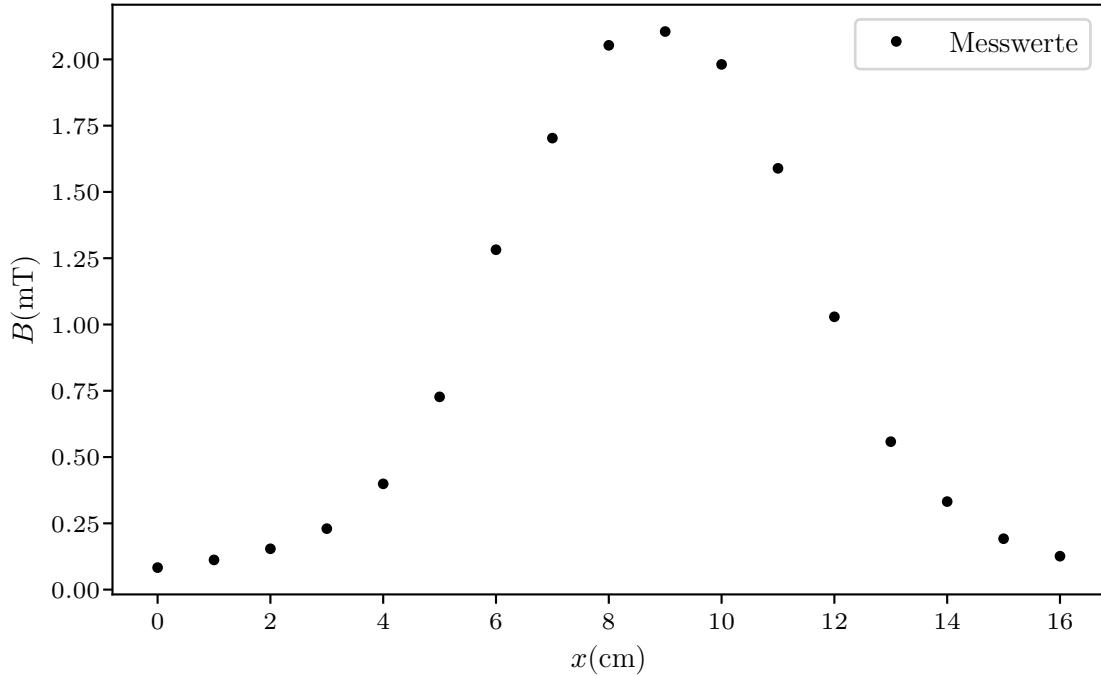
In diesem Abschnitt wird die gemessene Magnetfeldstärke auf der radialsymmetrischen Achse von der kleinen und der großen Spule mit den theoretischen Werten für die erwartete Magnetfeldstärke verglichen.

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

x(cm)	B(mT)
0	0,083
1	0,112
2	0,154
3	0,230
4	0,399
5	0,727
6	1,282
7	1,703
8	2,053
9	2,105
10	1,981
11	1,589
12	1,029
13	0,558
14	0,332
15	0,192
16	0,126

In Tabelle 1 sind die aufgenommenen Messwerte der Magnetfeldstärke auf der Achse der kleinen Spule zu entnehmen. x ist der Abstand von einem Punkt 5 cm vor der Spule bis 5 cm hinter der Spule. Des weiteren sind die Messwerte in Abbildung 5 graphisch dargestellt.

**Abbildung 4:** Magnetische Feldstärke auf der Achse der kurzen Spule



In Anbetracht der Tatsache, dass der Eintritt der Hall-Sonde in das Magnetfeld 5 cm von  $x = 0$  entfernt liegt und genau so nach dem Austritt 5 weitere Messwerte aufgenommen wurden, können wir die restlichen Messwerte, die in der Spule aufgenommen wurden, mitteln. Jenes dient dazu, das Magnetfeld im Inneren der Spule zu berechnen. Damit wird eine Feldstärke von

$$B_{exp} = (1,63 \pm 0,18) \text{ mT}$$

erreicht. Die theoretische Magnetfeldstärke im Inneren der Spule kann mit Gleichung 4 bestimmt werden. Mit den Werten  $I = 1\text{A}$ ,  $n = 100$  und einer Länge von etwa 8 cm ergibt sich

$$B_{theo} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ T} = 1,57 \text{ mT}$$

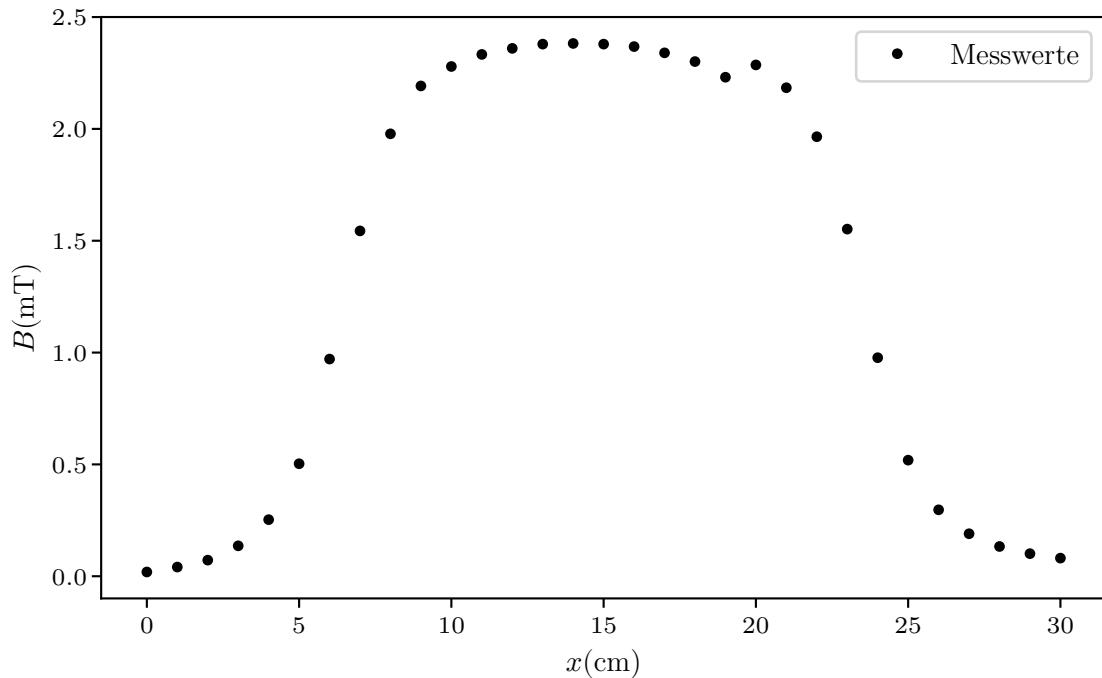
#### 4.1.2 Lange Spule

Bei der Ermittlung der Magnetfeldstärke in der langen Spule wird genauso verfahren, wie schon in Unterunterabschnitt 4.1.1.

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

$x(\text{cm})$	$B(\text{mT})$
0	0,019
1	0,041
2	0,072
3	0,136
4	0,253
5	0,503
6	0,971
7	1,544
8	1,978
9	2,192
10	2,279
11	2,333
12	2,360
13	2,379
14	2,382
15	2,379
16	2,368
17	2,340
18	2,301
19	2,231
20	2,286
21	2,184
22	1,965
23	1,552
24	0,977
25	0,519
26	0,297
27	0,190
28	0,133
29	0,101
30	0,081

**Abbildung 5:** Magnetische Feldstärke auf der Achse der langen Spule.



Aus den Messwerten kann analog zu der kleinen Spule das Magnetfeld im Inneren gemittelt werden, um einen experimentellen Wert für die Magnetfeldstärke im inneren der Spule zu erhalten. Es ergibt sich

$$B_{exp,lang} = (1,90 \pm 0,13) \text{ mT}.$$

Der Theoretische Wert der Spule mit Länge  $l = 19\text{cm}$  wird nach Gleichung 4 bestimmt und beläuft sich auf

$$B_{exp,lang} = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ T} = 1,98 \text{ mT}.$$

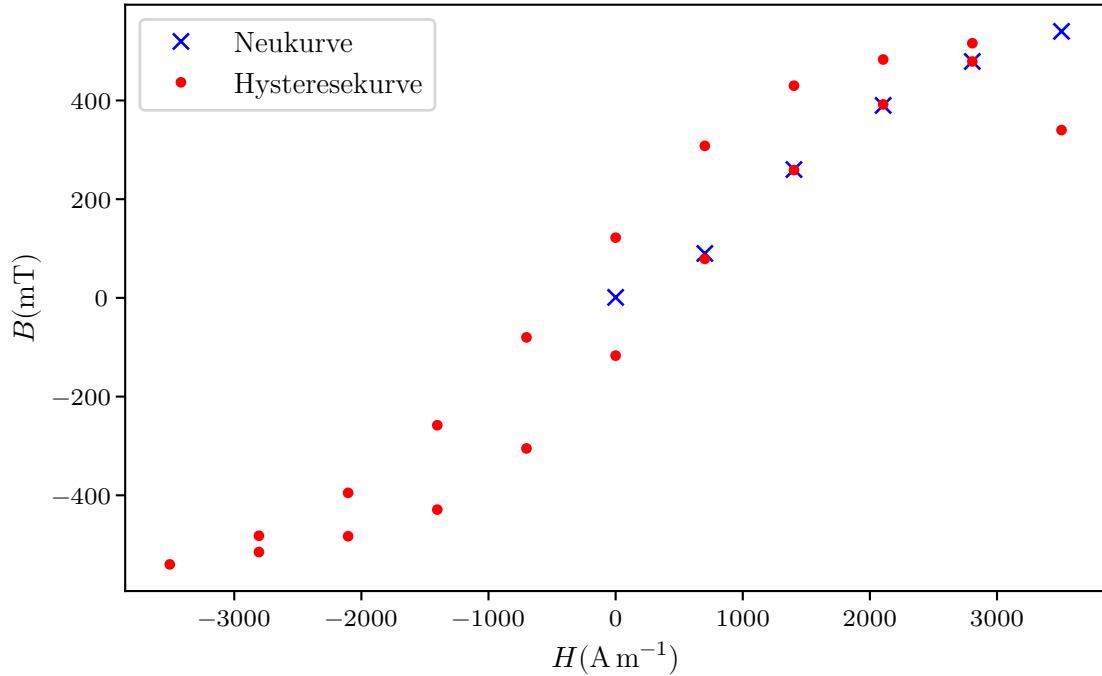
## 4.2 Hysteresekurve

**Tabelle 3:** Messwerte Hysteresekurve und resultierendes  $H$ -Feld.

$I$ (A)	$B$ (mT)	$HA$ m
0	1	0
1	90	701
2	260	1402
3	390	2104
4	479	2805
5	540	3507
4	516	2805
3	483	2104
2	430	1402
1	308	701
0	122	0
-1	-80	-701
-2	-258	-1402
-3	-395	-2104
-4	-482	-2805
-5	-540	-3507
-4	-515	-2805
-3	-483	-2104
-2	-429	-1402
-1	-305	-701
0	-117	0
1	79	701
2	259	1402
3	392	2104
4	479	2805
5	340	3507

Über die aufgenommenen Messwerte der Magnetfeldstärke im Luftspalt der Ringspule soll hier die Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivkraft bestimmt werden.

**Abbildung 6:** Hysteresekurve



Die Werte der Remananz, sowie der Sättigungswert können der Tabellle Tabelle 3 entnommen werden.

$$B_{R1} = 122 \text{ mT}$$

$$B_{R2} = -117 \text{ mT}$$

$$H_{S1} = 540 \frac{\text{MA}}{\text{m}}$$

$$H_{S2} = -540 \frac{\text{MA}}{\text{m}}$$

Die Koerzitivkraft kann mit einer linearen Ausgleichsgeraden durch die jeweils zwei nächsten Messpunkte zum Nulldurchgang der magnetischen Feldstärke  $B$  bestimmt werden. Es werden die Punkte  $(0 : 123), (-1 : -80)$  sowie  $(0 : -117), (1 : 79)$  verwendet. Daraus ergibt sich:

$$H_K = 0.344 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

$$H_K = 0.324 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

Die differentielle relative Permeabilität kann mit Gleichung 6 und den Messwerte aus Tabelle 3 berechnet werden.

$$\mu_{diff} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} \quad (9)$$

Durch Einsetzen der Werte ergibt sich die differentielle magnetische Permeabilität zu

$$\mu_{diff} = \frac{1}{\mu_0} \frac{0.00539\text{T}}{3507\text{A/m}} = 1.223 \quad (10)$$

### 4.3 Helmholtz-Spulen

Den Tabellen Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Werte für die Magnetfeldstärke auf der Symmetriearchse eines Helmholtzspulenpaars einmal für große und einmal für kleine Abstände der Spulen zu entnehmen.  $x$  in mm ist dabei der Abstand vom linken Ende der Skala zu der Hall-Sonde. Um die Darstellung und den Vergleich mit der Theoriekurve zu vereinfachen wurde die  $x$ -Skala so verschoben, dass der Nullpunkt jeweils in der Mitte der beiden Spulen liegt.

**Tabelle 4:** Gemessene Magnetfeldstärke im Abstand  $x$  vom inneren Rand der linken Spule aus (also ohne Verschiebung) für Spulenabstand  $d = 8\text{cm}$ .

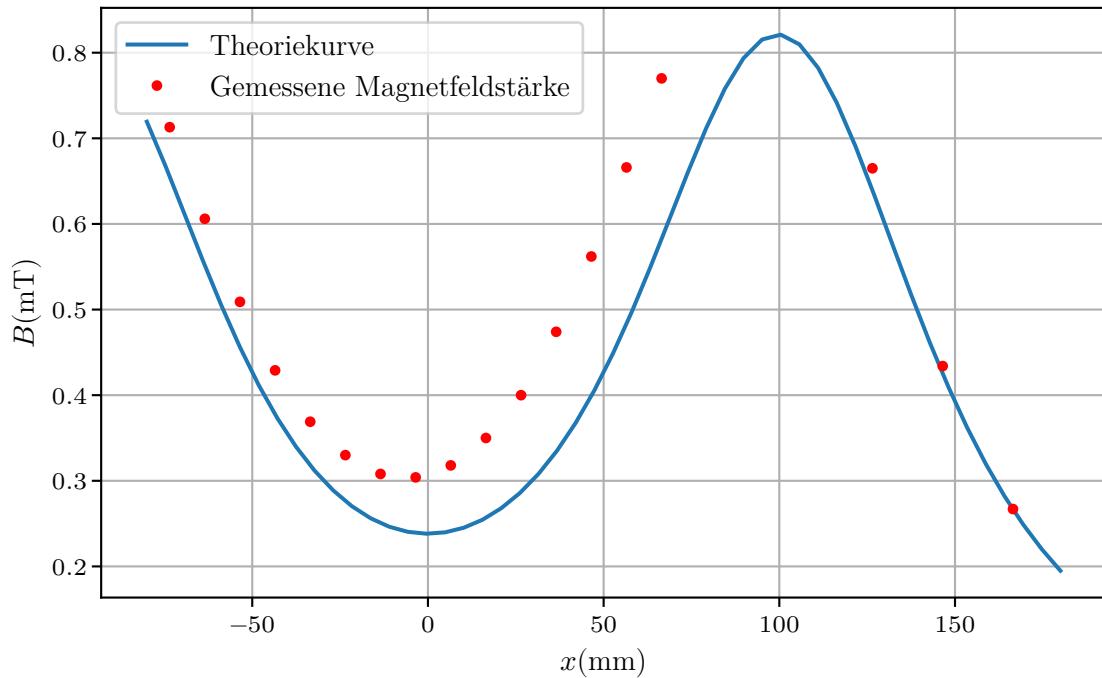
$x(\text{mm})$	$B(\text{mT})$
10	1,200
11	1,199
12	1,199
13	1,197
14	1,196
15	1,195
16	1,195
17	1,193
18	1,191
19	1,190
20	1,195
21	1,196
22	1,196
23	1,197
24	1,197
25	1,198
90	-0,808
100	-0,664
110	-0,537

**Tabelle 5:** Gemessene Magnetfeldstärke im Abstand  $x$  vom inneren Rand der linken Spule aus (also ohne Verschiebung) für Spulenabstand  $d = 20\text{cm}$ .

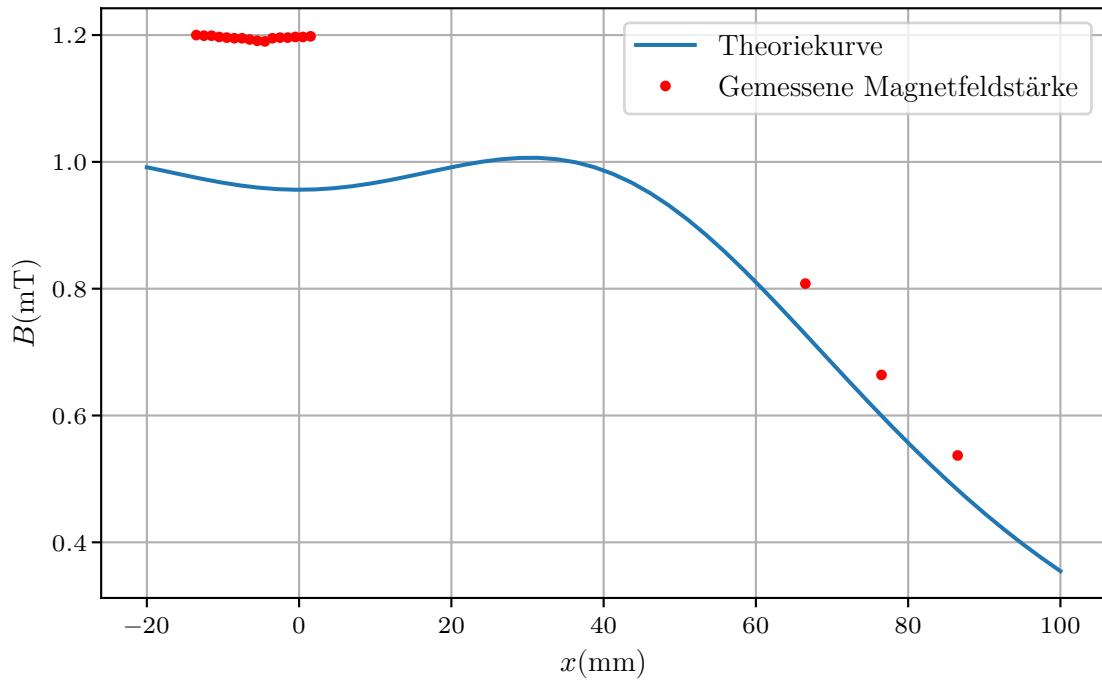
$x(\text{cm})$	$B(\text{mT})$
1	-0,713
2	-0,606
3	-0,509
4	-0,429
5	-0,369
6	-0,330
7	-0,308
8	-0,304
9	-0,318
10	-0,350
11	-0,400
12	-0,474
13	-0,562
14	-0,666
15	-0,770
21	-0,665
23	-0,434
25	-0,267

Die Messwerte sind in Abbildung 7 für  $d = 20\text{cm}$  und in Abbildung 8 für  $d = 8\text{cm}$  zusammen mit einer nach Gleichung 2 berechneten Theoriekurve für den entsprechenden Abstand und einer Windungsanzahl von 100, sowie einem Radius von 62,5 mm und  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{N/A}^2$  graphisch dargestellt.

**Abbildung 7:** Magnetfeldstärke Spulenpaar 19cm Abstand.



**Abbildung 8:** Magnetfeldstärke Spulenpaar 8cm Abstand.



## 5 Diskussion

### 5.1 Magnetfeld einer langen und kurzen Spule

Für das Magnetfeld von zwei Spulen unterschiedlicher Länge lässt sich zunächst festhalten, dass sich das Ausrichten der longitudinalen Sonde mit dem Stativ nicht besonders präzise bewerkstelligen lässt. Einerseits sitzt die Sonde selbst nicht fest auf dem als Metermaß dienenden Lineal und kann leicht ausgelenkt werden, was bei der Messung große Unterschiede machen kann, da der Messer empfindlich ist. Darüber hinaus erfolgen jegliche Justierungen unter Augenmaß. Demnach ist es höchstwahrscheinlich, dass sich die Hall-Sonde bei jeder Messung genau zentral in der Spule befand. Dieses Problem vergrößert sich noch weiter bei der langen Spule, da bei dieser die Länge der Hall-Sonde nicht ausreicht und beidseitig eingeführt werden muss. Bei Drehungen von Instrumenten sind Abweichungen unvermeidbar.

Trotzdem werden mit den gemessenen Werten (für die kurze Spule) eine Flussdichte mit  $1.63 \pm 0.18\text{mT}$  bestimmt, welche dem theoretischen Wert mit  $1.57\text{mT}$  sehr nahe kommen. Das entspricht einer Abweichung von 3.75 %. Auch der Graph passt zu theoretischen Überlegungen; Zu erkennen ist ein klares Maximum, was eine Homogenität in der Mitte ausschließt.

Bei der langen Spule ergibt sich für die experimentell bestimmte Flussdichte ein Wert von  $1.90 \pm 0.13\text{mT}$  und weicht damit nur um 4.04 % vom theoretischen Wert mit  $1.98\text{mT}$  ab. Ein verhältnismäßig geringer Fehler, jedoch zu erwarten. Vor Allem unter Einbezug der Tatsache, dass die Justierung der Sonde nach Drehung der Spule erwartend unpräzise erfolgt. Jenes ist auch dem Graphen zu der magnetischen Feldstärke zu entnehmen. Nach Drehung und erneuter Einführung in die Spule kommt es zu einem Sprung der Messwerte, sodass ab 20 cm eine erhöhte Flussdichte detektiert wird. Weiterhin ist am Graphen abzulesen, dass das Feld im Inneren homogen scheint, zumal der Graph im x-Bereich zwischen 10 und 20 cm annähernd linear verläuft. Abweichungen sind durch systematische Fehler zu begründen.

### 5.2 Hysteresekurve

Die gemessenen Punkte, welche in Abbildung 6 vorliegen, benötigen keinen Hilfsgraphen um die Hysteresekurve zu erkennen. Die charakteristischen Punkte Remananz  $B_r$ , Koerzitivkraft  $H_c$  und Sättigungswert  $B_S$  sind auch deutlich abzulesen, ebenso die Neukurve. Für diese ist als Fehlerquelle bei minimalen Abweichungen die Umpolung heranzuziehen, je langsamer diese stattfand, desto eher waren Abweichungen zu erwarten. Lediglich ein Wert am Ende der Messungen entfällt der Norm was vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen ist. Für keinen der Graphen hat dieser jedoch einen Einfluss und kann daher vernachlässigt werden. Die experimentell bestimmten Werte für die Remananz

ergaben

$$B_{R1} = 122 \text{ mT}$$

$$B_{R2} = -117 \text{ mT}$$

und

$$H_{S1} = 540 \frac{\text{MA}}{\text{m}}$$

$$H_{S2} = -540 \frac{\text{MA}}{\text{m}}$$

für den Sättigungswert. Letztlich ergab sich für die Koerzitivkraft.

$$H_K = 0.344 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

$$H_K = 0.324 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

Als differentielle Permeabilität ergab sich ein Faktor von  $\mu_{diff} = 1.223$ , was ein sinniges Ergebnis ist, da die Spule sowohl einen Eisenkern als auch einen Luftspalt enthält. Jenes verringert die Gesamtpermeabilität.

### 5.3 Helmholtz-Spule

Die beiden Graphen zur Helmholtz-Spule entsprechen näherungsweise der theoretischen Vorhersage, wenn es auch eher in Abbildung 7 danach aussieht. Der Tiefpunkt liegt bei der gemessenen Magnetfeldstärke bei  $x = 0 \text{ cm}$ , wie die Theoriekurve bestätigt. Das liegt daran, dass sich die Hall-Sonde dann genau zwischen dem Spulenpaar befindet. Einige Abweichungen sind dennoch erkennbar, allerdings auch unvermeidbar, Richtung Ende des Experiments liegen die gemessenen Größen nahezu exakt auf der Theoriekurve.

Auch die zweite Kurve, also bei einem Abstand von 8 cm beider Spulen unterscheiden sich die gemessenen Werte nicht allzu stark von der Theoriekurve. Die einzige Abweichung findet bei den ersten 15 Werten statt, diese liegen um 0.2 mT über dem Theoriwert des entsprechenden Abstands. Restliche Werte nähern sich der Theoriekurve plausibel nahe an. Die ungleiche Verteilung an Messwerten ist mit dem geringen Abstand der Spulen verbunden. Aufgrund dieser Tatsache erlangen die gemessenen Werte keine erkennbar ähnliche Gestalt zur Theoriekurve (auf den ersten Blick). Bei anderen Werten mit einem besseren Abstand wäre eine Ähnlichkeit offensichtlicher gewesen.

## 6 Anhang

**Abbildung 9:** Messwerte Seite 1 und 2.

USOP-Spulen & Magnethalter		
große Spule	x(cm)	B(GuT) ( <del>cm^-1</del> )
		B(mT) (markiert durch Linke)
0	0,019	
1	0,041	2,6
2	0,072	2,2
3	0,136	2,8
4	0,253	2,9
5	0,503	3,0
6	0,929	3,0
7	1,564	
8	2,192	
9	2,229	
10	2,229	
11	2,333	
12	2,360	
13	2,379	
14	2,382	
15	2,379	
16	2,368	
17	2,340	
18	2,301	
19	2,231	
20	-2,206	
21	-2,184	
22	-1,965	
23	-1,652	
24	-0,927	
25	-0,519	

kleine Spule		
	x(cm)	B(GuT)
5=14	0	-0,087
	1	-0,112
	2	-0,154
	3	-0,230
	4	-0,309
	5	-0,387
	6	-1,282
	7	-1,793
	8	-2,053
	9	-2,105
	10	-1,989
	11	-1,587
	12	-1,029
	13	-0,558
	14	-0,332
	15	-0,192
	16	-0,126

**Abbildung 10:** Messwerte Seite 3 und 4.

Amper	Blutdruck	HT
0	80	
1	-280	
2	-360	
3	-390	
4	-420	
5	-500	
6	-516	+
7	-483	
8	-430	
9	-308	
0	-122	
1	80	
2	258	
3	395	A
4	882	
5	540	
6	515	
7	483	
8	423	
9	305	
0	117	
1	-73	
2	-259	B
3	-392	
4	-423	
5	-500	

x (mm)	Blut T	Abstand der Zulen: 3cm mit J=14
10	0,022	
11	0,022	
12	0,022	
13	0,022	
14	0,022	
10	1,193	100 -0,664
11	1,193	90 -0,808
12	1,193	110 -0,537
13	1,192	
14	1,192	
15	1,193	
16	1,193	
17	1,193	
18	1,193	
19	1,193	
20	1,193	
21	1,196	
22	1,196	
23	1,197	
24	1,197	
25	1,198	

↓ zwischen Zulen

Pf

Abbildung 11: Messwerte Seite 5.

<i>Abstand 20mm</i>	<i>x(cm)</i>	<i>B(mT)</i>
	1	-0,713
	2	-0,606
	3	-0,509
	4	-0,429
	5	-0,369
	6	-0,330
	7	-0,308
	8	-0,304
	9	-0,318
	10	-0,350
	11	-0,400
	12	-0,474
	13	-0,562
	14	-0,666
	15	-0,770
<u>innerhalb Spule</u>		
<i>x(cm)</i>	<i>B(mT)</i>	
27	-0,665	
23	-0,434	
25	-0,267	
<u>außerhalb</u>		
		f. f.

## **Literatur**

- [1] *V308: Spulen und Magnetfelder.* TU Dortmund. 2024.