

V308

Magnetfelder und Spulen

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 16.11.2021

Abgabe: 23.11.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Bestanden

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	5
3.1 Allgemein	5
3.2 Helmholtz-Spulenpaar	5
3.3 lange Spule	5
3.4 Toroidspule mit Eisenkern	6
4 Auswertung	6
4.1 Lange Spule	6
4.2 Helmholtz-Spulenpaar	8
4.3 Hysteresekurve	10
5 Diskussion	15

1 Einleitung

Ziel des Versuches ist es, Magnetfelder von verschiedenen Spulentypen in verschiedenen Anordnungen zu messen. Dabei wird das Magnetfeld einer langen Spule und das eines Spulenpaars, sowohl in der Spule selbst, als auch außerhalb, gemessen. Es wird außerdem eine Hysteresekurve einer toroidförmigen Spule mit einem Eisenkern gemessen. Abschließend werden die Messwerte aus dem Versuch mit der Theorie verglichen und ausgewertet. unicode-mathsiunitx ?

2 Theorie

Theoretische Grundlagen für diesen Versuch sind das Biot-Savartsche Gesetz, Stoffmagnetismus mit besonderer Rücksicht auf Ferrimagnetismus, der Hall-Effekt (und Magnetfelder in Materie).

Bewegte elektrische Ladungsträger erzeugen magnetische Felder, die durch die beiden Größen \vec{H} und \vec{B} beschrieben werden können. Dabei entspricht \vec{H} der magnetischen Feldstärke, die Betrag und Richtung des Magnetfeldes beschreibt, und \vec{B} die magnetische Flussdichte, die zusätzlich noch die Permeabilität $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ berücksichtigt. Dabei ist $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [Vs/Am] die magnetische Feldkonstante und μ_r , die vom Material abhängige Permeabilität. Die magnetische Feldstärke lässt sich zum Beispiel mit dem Biot-Savartschen Gesetz (1) quantifizieren:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_{\text{Leiter}} \frac{d\vec{s} \times \vec{l}}{r^3}. \quad (1)$$

Durch

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2)$$

folgt somit auch ein Zusammenhang für die magnetische Flussdichte.

Aus der Untersuchung von Stoffmagnetismus, wie es in diesem Versuch auch durchgeführt wurde, folgt eine Klassifizierung verschiedener Stofftypen in Para-, Dia- und Ferromagnetismus. Da die relative Permeabilität μ_r in allen drei Typen konstant ist, folgt zur Unterteilung eine davon abgeleitete Klassifizierung, die Magnetisierung $\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$ mit der magnetischen Suszeptibilität $\chi = \mu_r - 1$.

Bei Diamegneten gilt $\chi < 0$; $|\chi| \ll 1$. In einem angelegten B-Feld ist die Magnetisierung \vec{M} dem B-Feld entgegengerichtet, wodurch es eine abschwächende Wirkung hat. Diamegneten bewegen sich aus Bereichen mit hoher Feldstärke zu Bereichen mit kleinerer. Paramagnetische Stoffe hingegen haben $\chi > 0$; $|\chi| \ll 1$. Die Magnetisierung richtet sich parallel zu einem äußeren B-Feld aus, wodurch sie eine verstärkende Wirkung hat. Paramagneten werden zu Bereichen hoher Feldstärke angezogen.

Bei Stoffen des Ferrimagnetismus gilt der Zusammenhang (2) nicht mehr, da die relative Permeabilität μ_r sehr hoch ist. Es gilt damit $\chi > 0$; $|\chi| \gg 1$. Ferromagneten richten sich, analog zu Paramagneten, parallel zum angelagten Magnetfeld aus und verstärken dieses stark. Bei Ferromagneten ist die stoffabhängige Permeabilität allerdings nicht konstant,

sondern davon abhängig in welchem Zustand es bereits einem Magnetfeld mit dessen Magnetfeldstärke ausgesetzt worden war. Es ist dadurch zustandsabhängig. Eine Hysteresekurve, die die Magnetisierung auf das äußere Magnetfeld aufträgt, beschreibt das Verhalten von Ferromagneten in angelegten Magnetfeldern und wird im folgenden beschrieben. Die magnetischen Dipolmomente von Ferromagneten sind in einem angelegten Magnetfeld parallel zu diesem. In einzelnen Bereichen, die man Weiß'sche Bezirke nennt, richten sich diese Dipolmomente parallel zueinander aus. Im unmagnetisierten Zustand sind die Dipole, aufgrund der thermischen Bewegungen, statistisch verteilt.

Wenn ein äußeres Magnetfeld angelegt wird, in dem sich der zu untersuchende Stoff befindet, dann steigt die Magnetisierung der Probe bis auf einen Sättigungswert an. Drosselt man das Magnetfeld nun, sinkt auch die Magnetisierung des Stoffes. Bei einem abgeschalteten Magnetfeld jedoch, ist sie nicht null ($\vec{M}(\vec{B} = 0) \neq 0$) und es bleibt eine *Remanenz*. Diese kann durch bilden eines Gegenfeldes, der *Koerzitivkraft*, wieder aufgehoben werden. Erhöht man das Gegenfeld weiter, so bildet sich ein negativer Sättigungswert. Durch erhöhen des äußeren Magnetfeldes, bildet sich eine parallele Kurve, wie auch bei der Erhöhung des Gegenfeldes. Sie erreicht den ursprünglichen, positiven Sättigungswert. Eine Hysteresekurve hat je nach Stoff eine unterschiedliche Form.

Mithilfe des Biot-Savartschen Gesetzes (1) folgt ein Zusammenhang zu dem Magnetfeld einer mit dem Strom I durchflossenen Leiterschleife mit Radius R auf der durch den Kreismittelpunkt gehenden Symmetriechse, wobei x im Kreismittelpunkt Null sei.:

$$|\mathbf{B}_{\text{Ring}}(x)| = B_{\text{Ring}}(x) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

Aus dem Superpositionsprinzip folgt für einen symmetrischen Aufbau aus zwei Leiterschleifen bei $x = \pm d/2$:

$$B_d(x) = B_{\text{Ring}}(x - \frac{d}{2}) + B_{\text{Ring}}(x + \frac{d}{2}) \quad (4)$$

Innerhalb einer Spule, bei der der Radius sehr viel kleiner als die Länge ist, liegt ein homogenes Magnetfeld vor, dass durch folgende Relation beschrieben werden kann:

$$B_{\text{Sp}} = \mu_r \mu_0 \frac{n}{l} I \quad (5)$$

, wobei n die Windungszahl und l die Länge der beschriebenen Spule darstellt.

Biegt man eine lange Spule soweit, dass die beiden Enden zusammengefügt werden, entsteht eine Toroidspule, dessen äußeres Magnetfeld Null ist und die Randeffekte verschwinden. Die Länge l in Gleichung (5) wird durch den Umfang des Toroides mit Radius r_T ersetzt und es folgt:

$$B_T = \mu_r \mu_0 \frac{n}{2\pi r_T} I \quad (6)$$

3 Durchführung

3.1 Allgemein

Es werden insgesamt 3 Spulen untersucht. Eine lange Spule, 3 verschiedene Anordnungen eines Helmholtz-Spulenpaars und eine Toroidspule mit Eisenkern. Bei der ersten beiden Spulen(anordnungen) wird ein konstanter Strom eingestellt und das erzeugte Magnetfeld, wird in Abhängigkeit zum Abstand gemessen. Bei der Toroidspule wird der Spulenstrom variiert, um eine Hysteresekurve anzufertigen.

3.2 Helmholtz-Spulenpaar

Beim Helmholtz-Spulenpaar soll vor allem die physikalische Besonderheit untersucht werden, dass das Magnetfeld in ihrem gemeinsamen Mittelpunkt auf der rotationssymmetrischen Achse näherungsweise homogen ist. Für diese Besonderheit muss der Abstand der beiden Spulen zueinander dem Radius der Spulen entsprechen.

Die beiden Spulen sind auf einer Schiene in einer Halterung befestigt worden, auf der eine Spule fest und die andere frei beweglich ist. Die Halterung besitzt eine weitere Schiene, die es ermöglicht eine Hall-Sonde in das Magnetfeld der Spule einzulassen und somit die Magnetflussdichte des Spulenpaars zu messen. Da beide Schienen ein eigenes, festes Lineal besitzen, kann man den Spulen- und den Sondenabstand genau einstellen.

Es werden 3 verschiedene Spulenabstände eingestellt und deren magnetische Flussdichte in Abhängigkeit der Position zu den Spulen gemessen.

Für diesen Aufbau wird eine transversale Hall-Sonde verwendet. Es wird darauf getachtet, dass die Sonde orthogonal zu der Symmetrieachse beider Spulen platziert wird. Die beiden Spulen werden in Reihe geschaltet, wobei darauf geachtet werden muss, dass der Strom langsam von Null hochgedreht wird. Dabei darf der maximal zulässige Spulenstrom nicht überschritten werden. Bevor jedoch der Strom hochgedreht wird, schaltet man das Messgerät für die magnetische Feldstärke ein und setzt es durch drücken der Taste **Null** auf Null.

Über den Knopf **Range** stellt man ein, welche Stellen des Messwertes angezeigt werden sollen.

Anschließend werden die Messungen, wie oben beschrieben durchgeführt.

3.3 lange Spule

Bei der Messung der magnetischen Flussdichte einer langen Spule wird eine longitudinale Hall-Sonde verwendet. Die Spule wird auf ein festes Lineal gestellt, an dessen Ende sich ein Stativ befindet, in dessen Stellschraube eine Hall-Sonde ist. Die Hall-Sonde ist möglichst auf der Symmetrieachse der langen Spule anzubringen. Die lange Spule wird an den Strom angeschlossen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Strom anfangs auf Null steht und dann langsam hochgedreht wird. Der maximale Spulenstrom darf nicht überschritten werden.

Es werden nun sowohl in der Spule, als auch außerhalb, Messungen vorgenommen.

3.4 Toroidspule mit Eisenkern

Die Toroidspule hat einen für die Messungen vorgesehenen Luftspalt, in dem die Messungen vorgenommen werden. Die Spule wird an den Strom angeschlossen und eine transversale Hall-Sonde in den Luftspalt eingelassen. Es ist darauf zu achten, dass der maximale Spulenstrom nicht überschritten wird.

Die Messungen werden in gleichmäßigen Inkrementen des Stroms vollzogen. Da bei der Spule ein Maximalwert von 10 Ampere nicht überschritten werden darf, ist es sinnvoll die Abstände auf 1 Ampere zu wählen. Die Größe der Inkremente ist im allgemeinen jedoch frei zu wählen, solange sie gleichmäßig und sinnvoll sind.

Ist ein Spulenstrom von +10 Ampere erreicht, senkt man ihn in 1-Ampere-Schritten wieder auf Null. Danach polt man die Toroidspule um und erhöht den Spulenstrom auf -10 Ampere. Ist dieser Wert erreicht, wird wieder auf 0 und danach auf +10 Ampere erhöht. Es zeichnet sich eine Hysteresekurve ab.

4 Auswertung

4.1 Lange Spule

Es wird an einer langen Spule die Magnetfeldstärke in Abhängigkeit des Ortes, bei konstanter Stromstärke gemessen.

Die Messergebnisse der langen Spule sind in Abbildung 1 dargestellt. Hierbei liegt der Rand der Spule bei $x=136\text{mm}$, wobei x -Werte darüber als außerhalb und solche darunter als innerhalb der Spule zu betrachten sind.

Als experimenteller Wert wird der Höchstwert von

$$B = 2,230 \text{ mT} \quad (7)$$

gewählt.

Da keine Länge der Spule gegeben war und diese auch nicht gemessen wurde, ist die Angabe eines Theoriewertes nicht möglich.

Besser
mit
Text{-}
?

Eigentlich in der Theorie, aber nicht
so schlimm

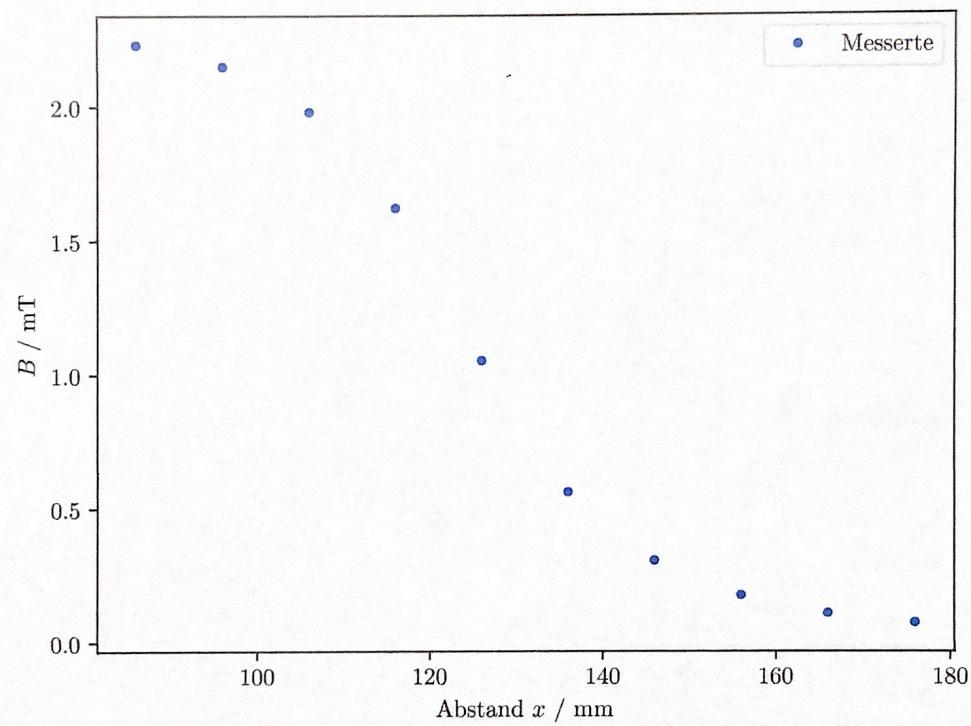


Abbildung 1: Messwerte der langen Spule.

4.2 Helmholtz-Spulenpaar

Nun wird das Magnetfeld innerhalb eines Helmholtz-Spulenpaars bei verschiedenen Abständen der Spulen gemessen. Die konkreten Abstände sind $d_1 = 237\text{mm}$, $d_2 = 198\text{mm}$ und $d_3 = 143\text{mm}$, wobei der Verlauf der Feldstärke beim Abstand d_1 in Abbildung 2, bei d_2 in Abbildung 3 und bei d_3 in Abbildung 4 aufgeführt ist.

In Abbildung 1 liegt der Mittelpunkt bei $x=100\text{mm}$, in Abbildung 2 bei $x=80\text{mm}$ und in Abbildung 3 bei $x=52,5\text{mm}$.

Die folgenden Werte spiegeln jeweils die Feldstärke im Mittelpunkt zwischen den Spulen wieder.

Für den Abstand $d_1 = 237\text{mm}$:

$$B_1 = 0,984\text{mT} \quad (8)$$

Für den Abstand $d_2 = 198\text{mm}$:

$$B_2 = 1,475\text{mT} \quad (9)$$

Für den Abstand $d_3 = 143\text{mm}$ wurde kein Messwert aus der Mitte genommen. Die Werte

$$B_{3a} = 2,769\text{mT} \quad (10)$$

und

$$B_{3b} = 2,742\text{mT} \quad (11)$$

haben jedoch einen geringen, identischen Abstand zum Mittelpunkt.

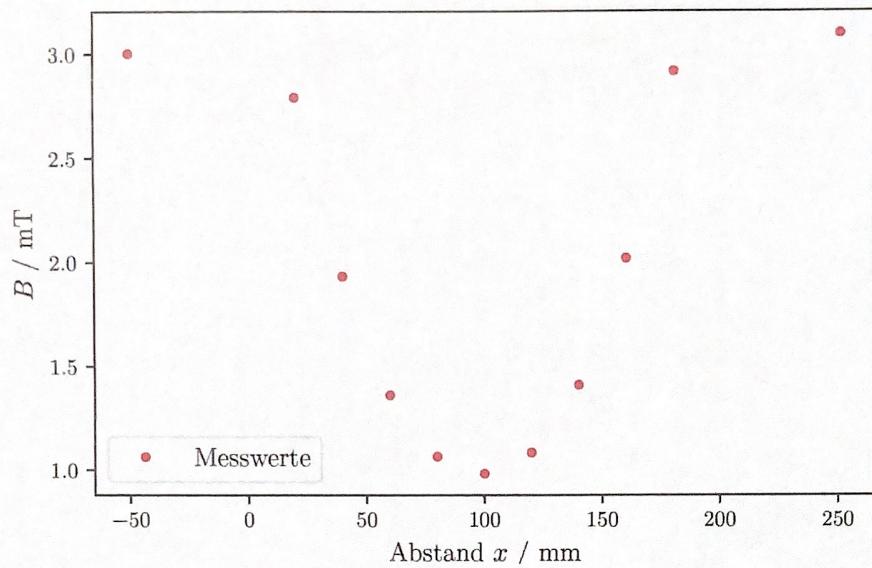


Abbildung 2: Messwerte des ersten Spulenpaars.

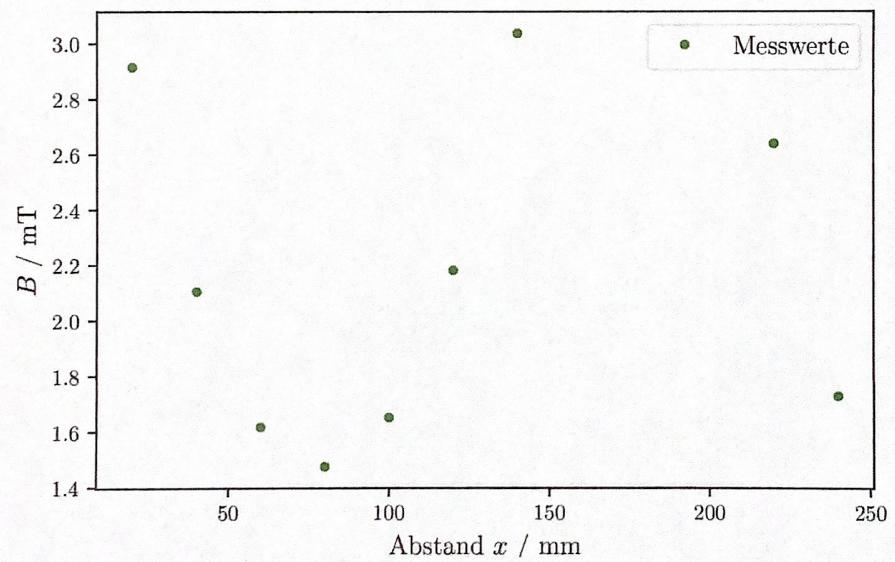


Abbildung 3: Messwerte des zweiten Spulenpaars.

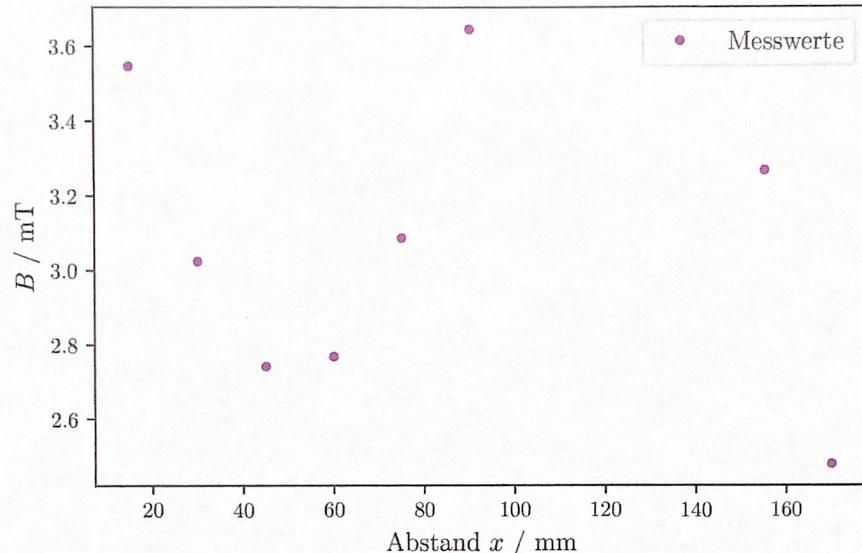


Abbildung 4: Messwerte des dritten Spulenpaars.

4.3 Hysteresekurve

Zuletzt wird das Magnetfeld innerhalb einer Toroidspule mit Eisenkern bei variierender Stromstärke gemessen.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die gemessenen Werte für die Remanenz(B_r) und den Sättigungswert(B_s) betragen:

$$B_r = 2,769 \text{ mT} \quad (12)$$

und

$$B_s = 2,742 \text{ mT} \quad (13)$$

Die Koerzitifkraft(H_c) lässt sich bestimmen als ungefähr:

$$H_c = 0,6 \text{ A} \quad (14)$$

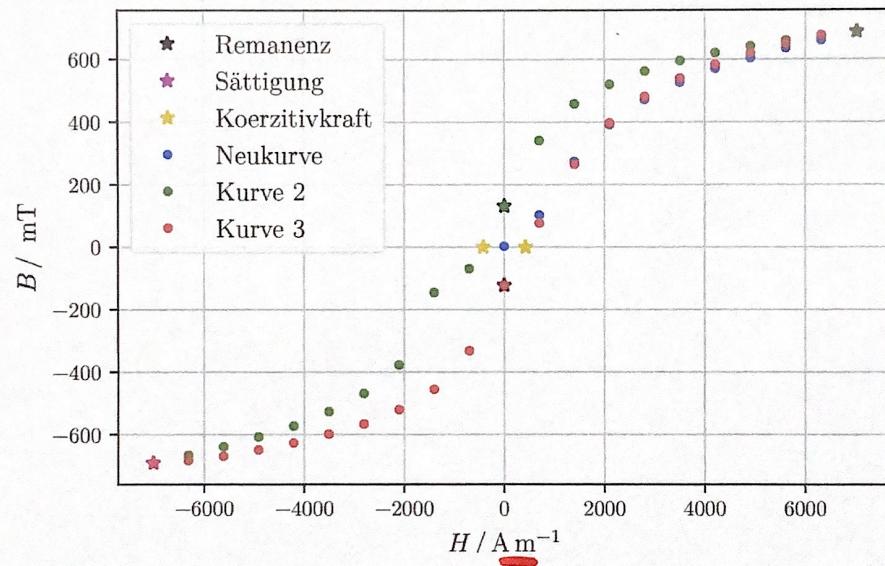


Abbildung 5: Messwerte der Hysteresekurve.

eigentlich
gegen I,
aber auch
ok.

Magnetfeld von Spulen) 16. Nov. 2021

Versuch 308-Teil 1

Hall-Sonde: 67 mm

Magnetische Flussdichte in mT Abstand in mm

2,230

86

2,150

96

1,981

106

1,623

116

1,053

126

0,562

136

0,307

146

0,177

156

0,110

166

0,075

176

- Nullpunkte

2,231

86

2,152

96

1,992

106

1,643

116

1,067

126

0,571

136

0,307

146

0,172

156

0,108

166

0,074

176

- Nullpunkte

→ Spule mit 300 Windungen, genommen bei 1A

Magnetfeld eines Spulenpaars)

Helmholz-Spulenpaar mit Radius R = 125 mm; 4,5 A

Magnetische Flussdichte in mT Spulenabstand in mm ohne Breite b/mm

237

200

Messwerte
besser
hinter die
Diskussion

Spulenabstand 287 mm

Bin mT	x in mm
3,097	250
2,917	180
2,054	160
1,414	120
1,016	120
0,984	100
1,067	80
1,364	60
1,936	40
2,752	20
3,002	-50

1. Messwerte
→ außerhalb

- Nullpunkt / Mittelpunkt

Bin mT	x in mm
3,100	250
2,937	180
2,034	160
1,420	140
1,096	120
0,984	100
1,066	80
1,371	60
1,923	40
2,784	20
3,086	-50

→ außerhalb
2. Messwerte
→ außerhalb

→ außerhalb

Spulenabstand 198 mm (80 mm Nullpunkt)

Bin mT	x in mm
1,728	240
2,640	220
3,039	140
2,182	120
1,651	100
1,275	80
1,613	60
2,105	40
2,916	20

} außerhalb

- Mittelpunkt

Spulenabstand 143 mm (545 mm Mittelpunkt)

Bin mT	x in mm
2,478	170
3,268 ¹³	155
3,646	90
2,018	75
2,769	60
2,742	45
3,1925	30
3,547	15

} außerhalb

→ x in mm bezeichnet den Abstand

Hysteresekurve)

B in mT

Strom in A

3
104
276
384
475
531
576
610
642
668
696

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

686
882
667
648
626
600
566
523
460
342
181

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

-70
-247
-380
-472
-531
-578
-614
-646
-674
-700

-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10

-681
-676
-655
-632
-603
-570
-523
-457
-333
-123

-9
-8
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0

.14

B in mT Strom in A

78
267
400
485
544
600

1
2
3
4
5
6

684 9
715 10

Ph.

5 Diskussion

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Ergebnisse sich größtenteils mit den Erwartungen decken.

Bei der langen Spule wäre zu bemängeln, dass die Länge der Spule nicht gegeben war oder diese nicht gemessen wurde. Außerdem war es uns durch den Aufbau der Messgeräte und deren Befestigungen nicht möglich, das Magnetfeld am Mittelpunkt der Spule zu messen, was vermuten lässt, dass der tatsächliche Betrag der Magnetfeldstärke etwas größer ist.

Zum Helmholtz-Spulenpaar lässt sich abschließend sagen, dass die Homogenität des Magnetfeldes im Inneren tatsächlich stark vom Abstand der Spulen abhängt. Auch hier kann an der Messung kritisiert werden, dass man den Abstand der Spulen bei einer Messung so hätte wählen können, dass dieser dem halben Spulenradius entspricht und man so die Homogenität des Feldes hätte sehen können. Da lediglich größere Abstände gewählt wurden, ist klar erkennbar, dass es sich um eine Überlagerung zweier Felder handelt.

Die Hysteresekurve hingegen ist auf der Abbildung deutlich zu erkennen, obwohl sie nicht ganz der Form der Literaturkurve entspricht. Obwohl sie deutlich schmäler ist, sind alle charakteristischen Punkte zu erkennen.