

# **Versuch 308 "Spulen und Magnetfelder"**

Robert Konradi  
robert.konradi@tu-dortmund.de

Lauritz Klünder  
lauritz.kluender@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.12.2017, Abgabe: 22.12.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Magnetische Flußdichte einer Spule . . . . .	7
4.2	Magnetfeld einer Helmholtz-Spule . . . . .	11
4.3	Bestimmung der Hysteresekurve . . . . .	17
	<b>Literatur</b>	<b>18</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen Magnetfelder von verschiedener Spulenordnung vermessen werden.

## 2 Theorie

Magnetische Felder werden erzeugt, wenn sich elektrische Ladung bewegt. Dabei sind sie von Betrag und Richtung als Vektorgroße durch die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  beschrieben. Wichtig zu erwähnen ist das Magnetfelder keine Monopole besitzen sondern immer paarweise auftreten und geschlossen sind im Gegensatz zum elektrischen Feld. Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  wird über die Feldstärke  $\vec{H}$  und über die Permeabilität  $\mu$  zu der Formel:

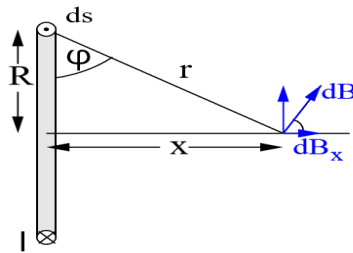
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1)$$

Dabei beschreibt die Permeabilität  $\mu$  die "Leitfähigkeit" des Materials und setzt sich aus  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  zusammen.  $\mu_0$  ist die Vakuum-Permeabilität und beträgt  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  und  $\mu_r$  die relative Permeabilität der Materie. Bei einem stromdurchflossenen Leiter verlaufen die Feldlinien in konzentrische Kreise und stehen senkrecht zum Stromfluss. Mit Hilfe des Biot-Savartschen Gesetz lässt sich das Magnetfeld mit einem Abstand  $r$  und dem Strom  $I$

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

berechnen. In Abbildung (1), folgt für die stromdurchflossene Spule die Formel:

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



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Biot-Savartschen Gesetz[1].

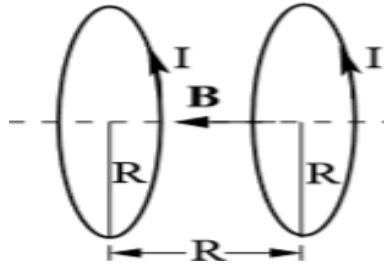
Im Inneren für langgestreckten Spule (Solenoid) ist die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  homogen und konstant während es außerhalb inhomogen ist. Mit der Spulenlänge  $l$ , der Windungszahl  $n$  und den Strom  $I$  lässt sich das homogene Magnetfeld mit der Formel

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

darstellen. Wird die langgestreckte Spule zu einem Kreis gebogen so wird die Spulen-anordnung als Torus bezeichnet. Die Besonderheit des Torus ist, dass außerhalb kein Magnetfeld existiert und im Inneren das Magnetfeld homogen ist. Somit lässt sich die Gleichung(3) mit  $l = 2\pi r_T$  zu

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{n}{2\pi r_T} I \quad (4)$$

umschreiben. Dabei ist  $r_T$  der Radius des Torus. Ein anderes Verfahren zu Herrichtung eines homogenen Magnetfeldes ist die Helmholtz-Spule. Zwei parallele Kreisspulen, die die gleiche Stromrichtung besitzen, erzeugen ein homogenes Feld im Inneren der beiden Spulen. Eine Darstellung ist in Abbildung(2) zu sehen.



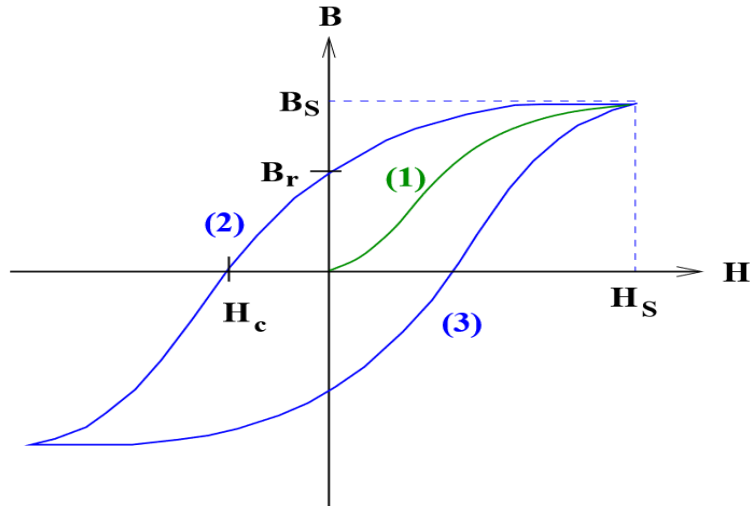
**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Helmholtz-Spule[1].

Mit Hilfe der Gleichung (2) lässt sich das Magnetfeld

$$B(0) = B_1(x_1) + B_1(-x_1) = \mu_0 I \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

beschreiben. Dabei ist  $x = \frac{d}{2}$  mit  $d$  als Abstand der beiden Spulen gemeint.

Ferromagnetische Materialien wie z.B. Eisen, Kobalt oder Nickel besitzen ohne ein äußeres Magnetfeld ein permanentes magnetisches Moment. Magnetischen Momente richten sich in einzelnen Bereichen (Weißsche Bezirke) parallel zu einander aus. Ohne äußeres Feld ist die Ausrichtung der Weißschen Bezirke statisch verteilt. Mit einem äußeren Magnetfeld gibt es eine Richtungsänderung und zu einer Vergrößerung des Bezirks. Dies wird solange ausgeführt bis alle magnetischen Momente mit der Ausrichtung vom Magnetfeld übereinstimmen. Für ferromagnetische Materialien ist die relative Permeabilität  $\mu_r$  sehr hoch, somit ist die Gültigkeit der Gleichung (1) ungültig. Die Hysteresekurve beschreibt diese Nicht-linearität und ist in Abbildung (3) dargestellt.



**Abbildung 3:** Schematische Darstellung einer Hysteresekurve

Liegt ein äußeres Magnetfeld an so wird die **1** in der Abbildung (3) eine Neukurve dargestellt. Sie erreicht nach einiger Zeit ein Sättigungswert  $B_s$ . Beim Abschalten des äußeren Magnetfeldes, bleibt noch beim Ferromagnet eine "Restmagnetisierung" die als Remanenz bezeichnet wird. Die **2** beschreibt die Koerzitivkraft um die Remanenz auf null zu bekommen. Durch Erhöhung des Gegenfeldes wird ebenfalls ein negativen Sättigungswert erreicht. Die **3** zeigt den Kurvenverlauf durch Erhöhung des Magnetfeldes und sie ist symmetrisch zur Hysteresekurve. Somit wird die relative Permeabilität  $\mu_r$  eine Funktion zur Feldstärke  $\vec{H}$ . Somit wird die Neukurve durch die differentielle Permeabilität  $\mu_{diff}$  eingeführt und wird

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

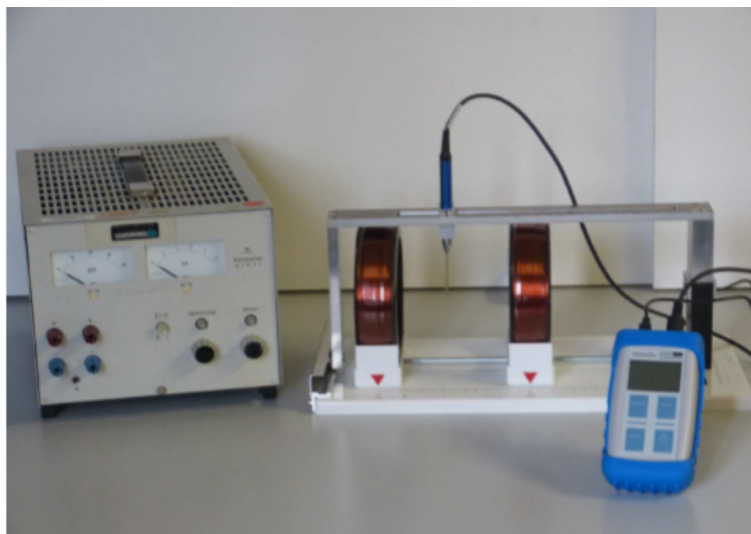
### 3 Durchführung

Zur Berechnung des Magnetfeldes der Spule wird eine Hall-Sonde verwendet. Die Hall-Sonde beruht auf dem Hall-Effekt. An der Spitze der Hall-Sonde befindet sich ein Leiterplättchen an das ein Strom angeschlossen ist. Durch ein Magnetfeld wirkt senkrecht auf die Ladung die Lorenzkraft und erzeugt ein Verschiebungsstrom und ebenfalls eine Spannung (Hall-Spannung). Mit Hilfe der Hall-Spannung kann die Stärke des Magnetfeldes, die von außen erzeugt worden ist, messen. In Abbildung (4) ist der Versuchsaufbau dargestellt, dabei wird eine longitudinal Sonde verwenden. Anschließend fährt die Sonde im Inneren der Magnetspule in verschiedenen Abstände ab und misst dabei das Magnetfeld.



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau zur Messung der Magnetspule[1].

Für die Messung des Magnetfeldes der Helmholtz-Spule wird eine transversale Sonde verwendet. Dabei misst man sowohl im Inneren der beiden Spule als auch außerhalb die Magnetfelder. In Abbildung (5) ist der Versuchsaufbau dargestellt.



**Abbildung 5:** Versuchsaufbau zur Messung der Magnetfelder der Helmholtz-Spule[1].

Für die Bestimmung der Hysteresekurve wird, wie in Abbildung(6) dargestellt, ebenfalls eine transversale Sonde verwendet.

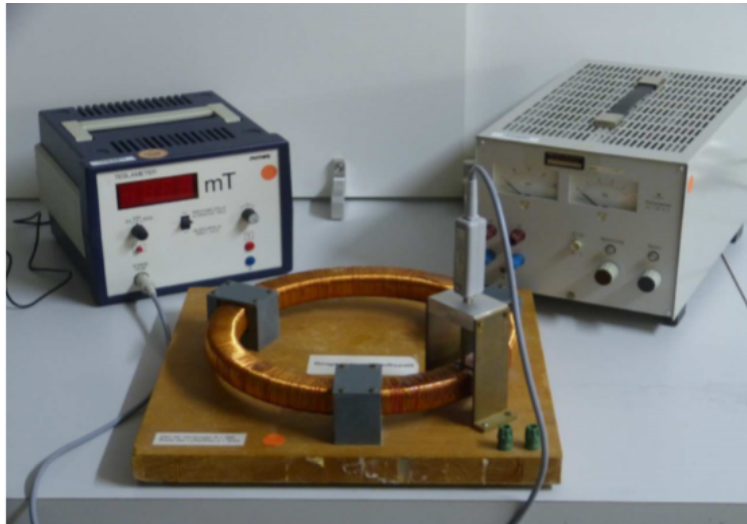


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Messung der Hysteresekurve[1].

## 4 Auswertung

### 4.1 Magnetische Flußdichte einer Spule

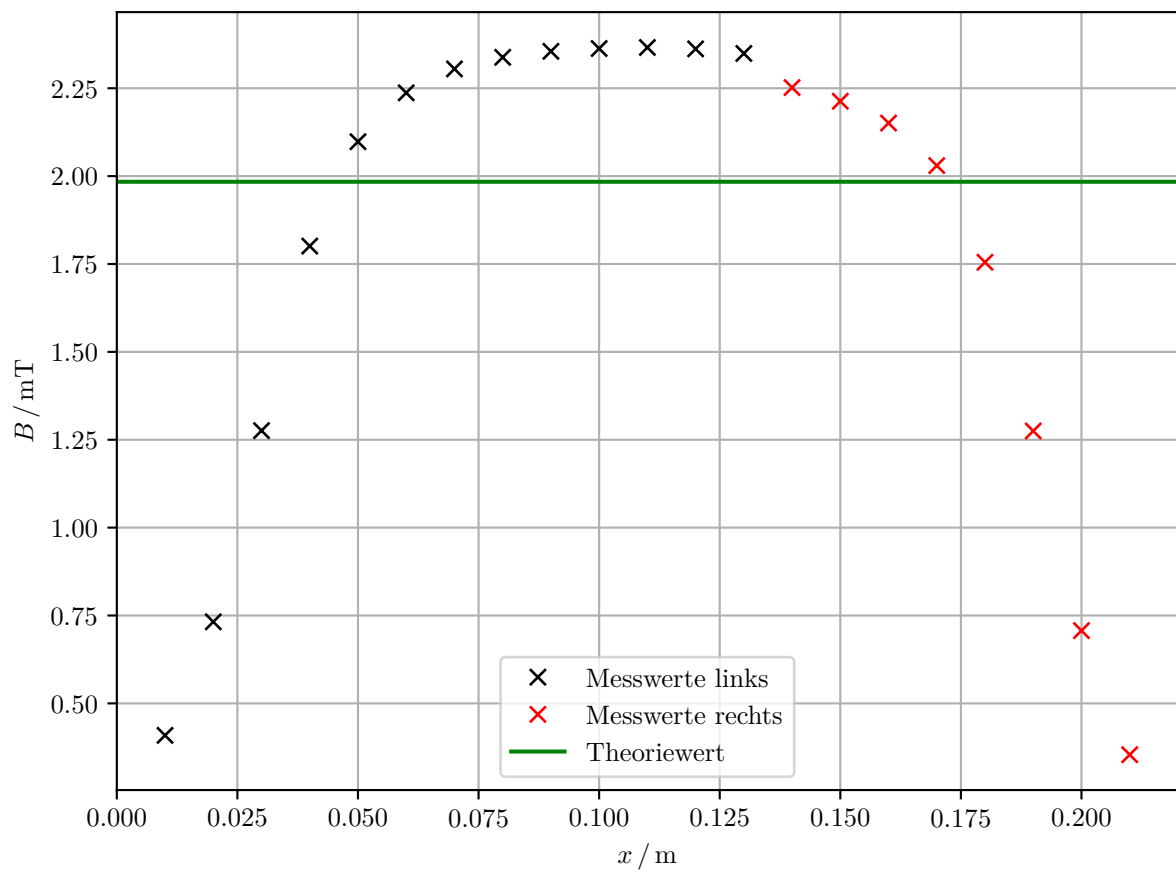
Zunächst wird das Magnetfeld einer langen Spule mit einer Hall-Sonde ausgemessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung (7) graphisch dargestellt und in der Tabelle (1) tabellarisch. Mithilfe der Gleichung (3) wird die Theoriekurve bestimmt. Die Parameter der Spule lauten:

- Windungszahl:  $n=300$
- mittlerer Spulendurchmesser:  $d = 0,041 \text{ m}$
- Spulenlänge:  $l = 0,19 \text{ m}$
- Strom:  $I = 1 \text{ A}$

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

$x/\text{m}$	$B/\text{mT}$
0,01	0,409
0,02	0,732
0,03	1,276
0,04	1,801
0,05	2,098
0,06	2,237
0,07	2,305
0,08	2,338
0,09	2,355
0,10	2,363
0,11	2,366
0,12	2,362
0,13	2,349
0,14	2,252
0,15	2,213
0,16	2,151
0,17	2,030
0,18	1,755
0,19	1,275
0,20	0,707
0,21	0,354





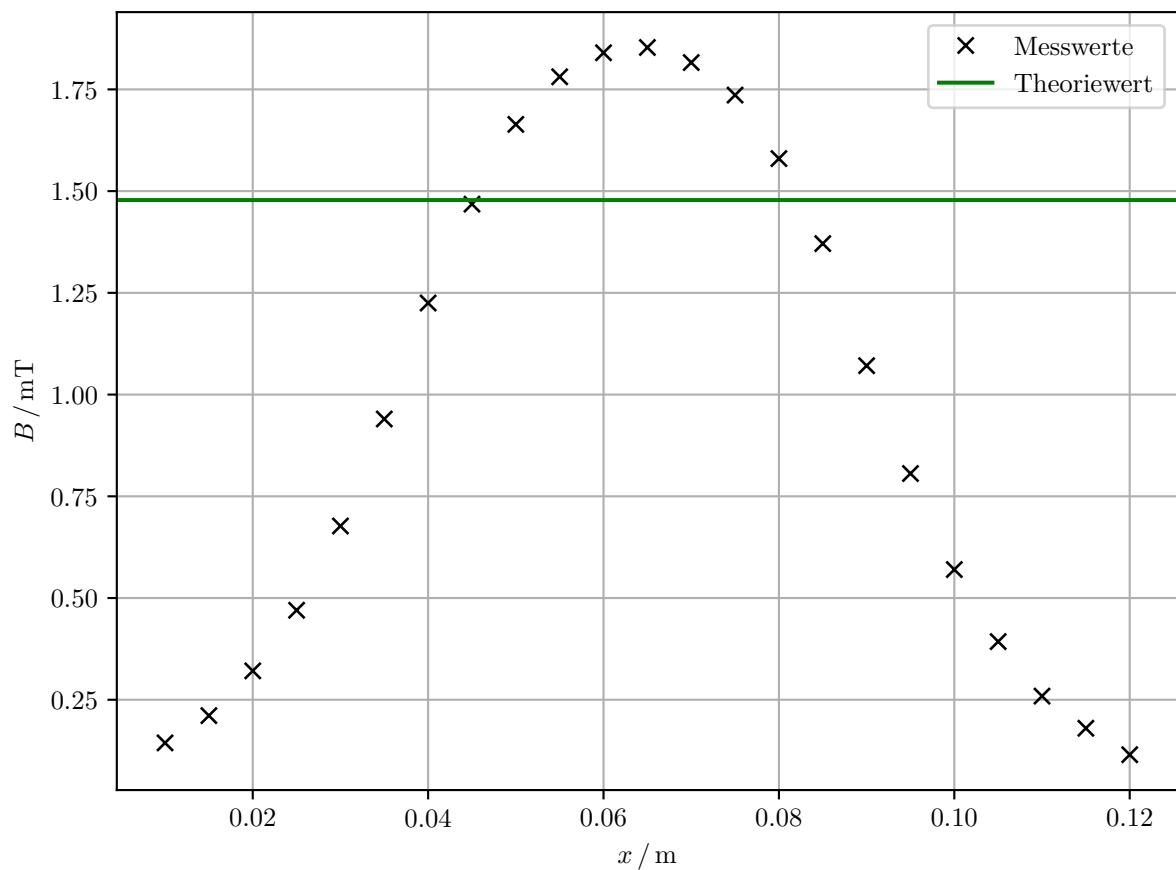
**Abbildung 7:** Graphische Darstellung der Messwerte, die von links und von rechts Gemessen wurden.

Daraufhin wird das Magnetfeld einer kürzeren Spule untersucht. Die Messwerte sind in Tabelle (2) und in Abbildung (8) dargestellt. Auch bei dieser Spule werden die Theoriewerte mithilfe der Gleichung (??) bestimmt. Die Parameter dieser Spule lauten wie folgt:

- Windungszahl:  $n = 100$
- mittlerer Spulendurchmesser:  $d = 0,041 \text{ m}$
- Spulenlänge:  $l = 0,085 \text{ m}$
- Strom:  $I = 1 \text{ A}$

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

$x/\text{m}$	$B/\text{mT}$
0,01	0,144
0,015	0,211
0,02	0,321
0,025	0,470
0,03	0,677
0,035	0,940
0,04	1,225
0,045	1,468
0,05	1,664
0,055	1,781
0,06	1,840
0,065	1,853
0,07	1,816
0,075	1,736
0,08	1,580
0,085	1,371
0,09	1,071
0,095	0,806
0,10	0,570
0,105	0,393
0,11	0,259
0,115	0,180
0,12	0,115



**Abbildung 8:** Graphische Darstellung der Messwerte für die kurze Spule.

## 4.2 Magnetfeld einer Helmholtz-Spule

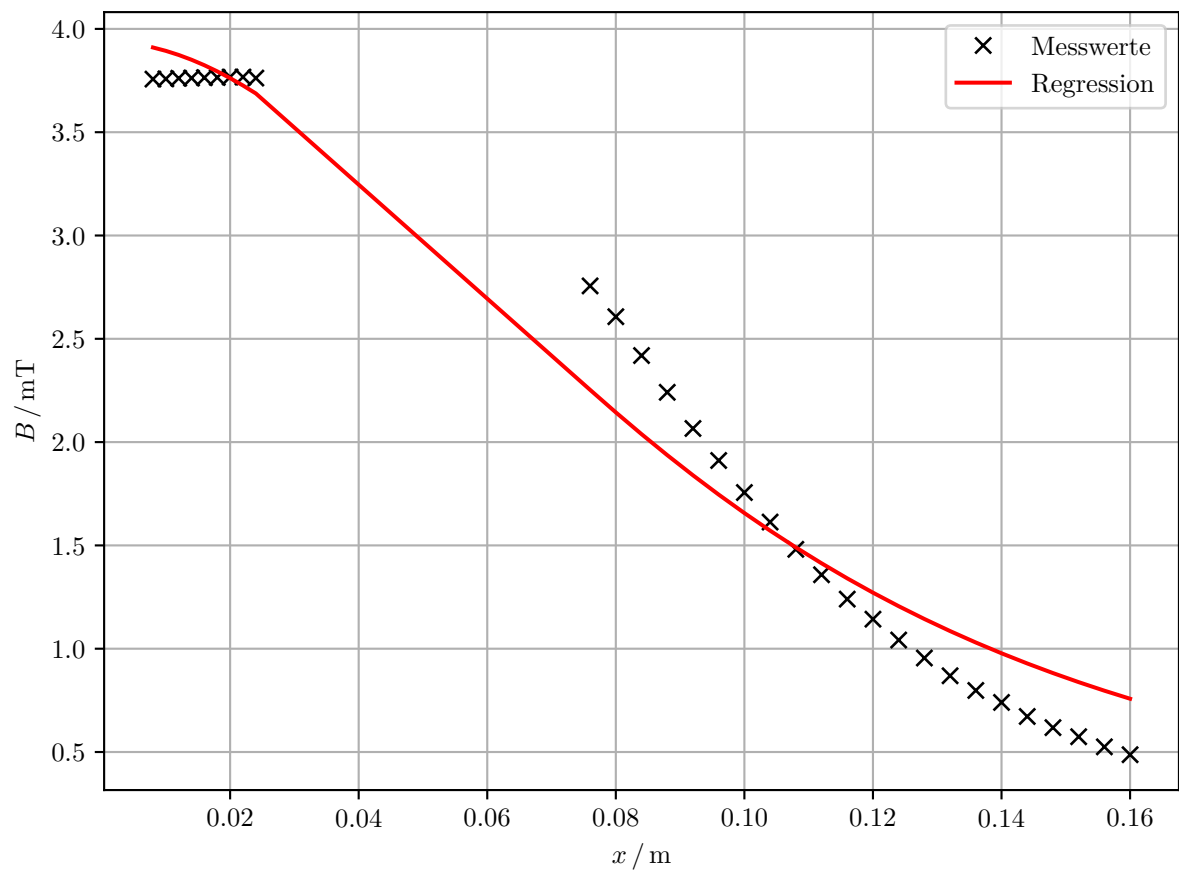
In dem zweiten Teil des Versuches wird nun das Magnetfeld einer Helmholtz-Spule mit verschiedenen Abständen der Spule ermittelt. Die Parameter des Spulenpaares lauten:

- Windungszahl pro Spule:  $n = 100$
- mittlerer Spulendurchmesser:  $d = 1,25 \text{ m}$
- Spulenbreite:  $b = 0,033 \text{ m}$
- Strom:  $I = 3 \text{ A}$

Der erste Abstand der beiden Spulen ist  $0,07 \text{ m}$ . Für diesen Fall sind die Messergebnisse in Tabelle (3) und in der Abbildung (9) dargestellt.

**Tabelle 3:** Messwerte der Helmholtz-Spule für den Abstand 0,07 m.

$x/\text{cm}$	$B/\text{mT}$
0,8	3,757
1,0	3,758
1,2	3,761
1,4	3,762
1,6	3,764
1,8	3,765
2,0	3,767
2,2	3,767
2,4	3,762
7,6	2,756
8,0	2,607
8,4	2,419
8,8	2,241
9,2	2,066
9,6	1,911
10,0	1,756
10,4	1,613
10,8	1,481
11,2	1,358
11,6	1,240
12,0	1,143
12,4	1,042
12,8	0,955
13,2	0,869
13,6	0,798
14,0	0,740
14,4	0,672
14,8	0,618
15,2	0,574
15,6	0,525
16,0	0,487

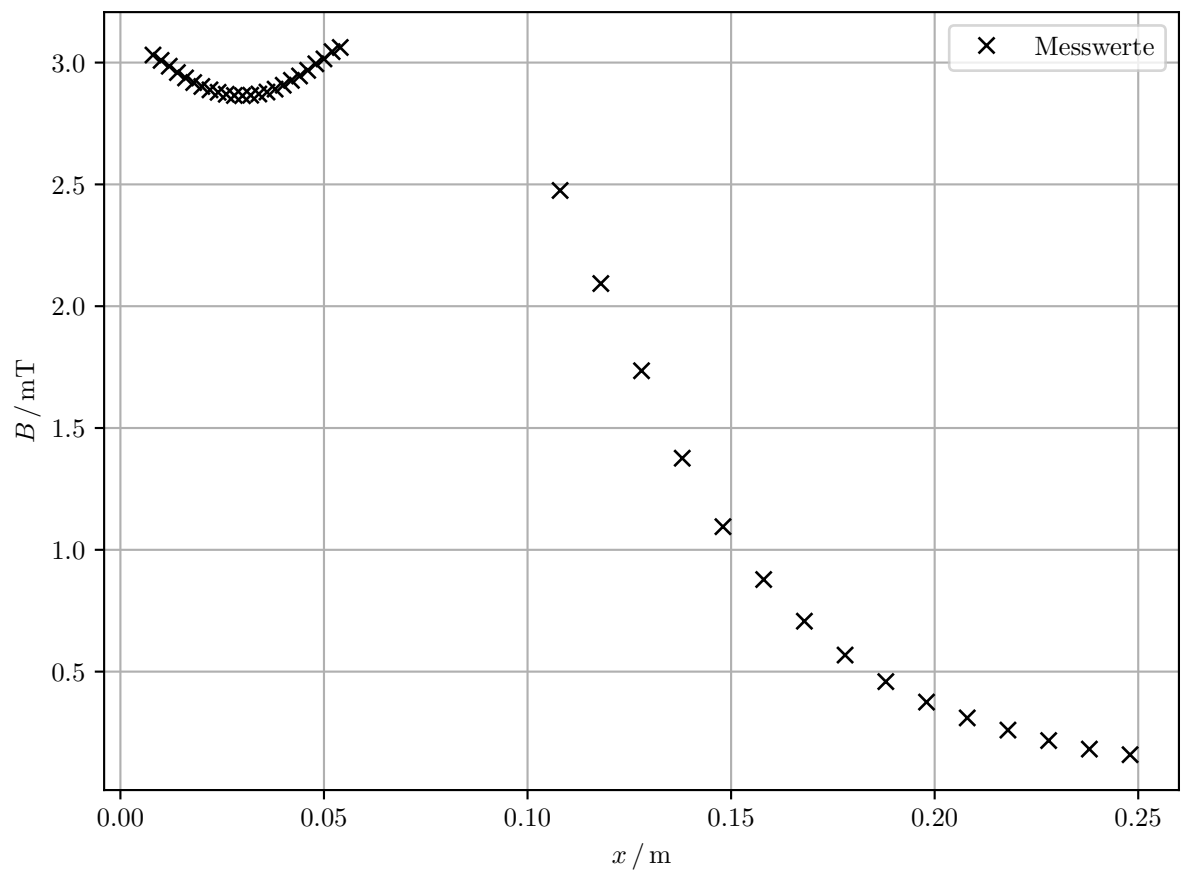


**Abbildung 9:** Graphische Darstellung der Messwerte für das Spulenpaar bei 0,07 m.

Der nächste Abstand der beiden Spulen ist 0,1 m. Auch in diesem Fall werden die Messwerte in der Tabelle (4) und Abbildung (10) dargestellt.

**Tabelle 4:** Messwerte des Spulenpaares mit dem Abstand 0,1 m.

$x/\text{cm}$	$B/\text{mT}$
0,8	3,031
1,0	3,009
1,2	2,985
1,4	2,959
1,6	2,937
1,8	2,918
2,0	2,902
2,2	2,888
2,4	2,878
2,6	2,870
2,8	2,865
3,0	2,864
3,2	2,866
3,4	2,871
3,6	2,879
3,8	2,891
4,0	2,907
4,2	2,927
4,4	2,945
4,6	2,968
4,8	2,995
5,0	3,015
5,2	3,045
5,4	3,062
10,8	2,475
11,8	2,093
12,8	1,735
13,8	1,376
14,8	1,095
15,8	0,878
16,8	0,707
17,8	0,568
18,8	0,459
19,8	0,375
20,8	0,310
21,8	0,260
22,8	0,217
23,8	0,182
24,8	0,159



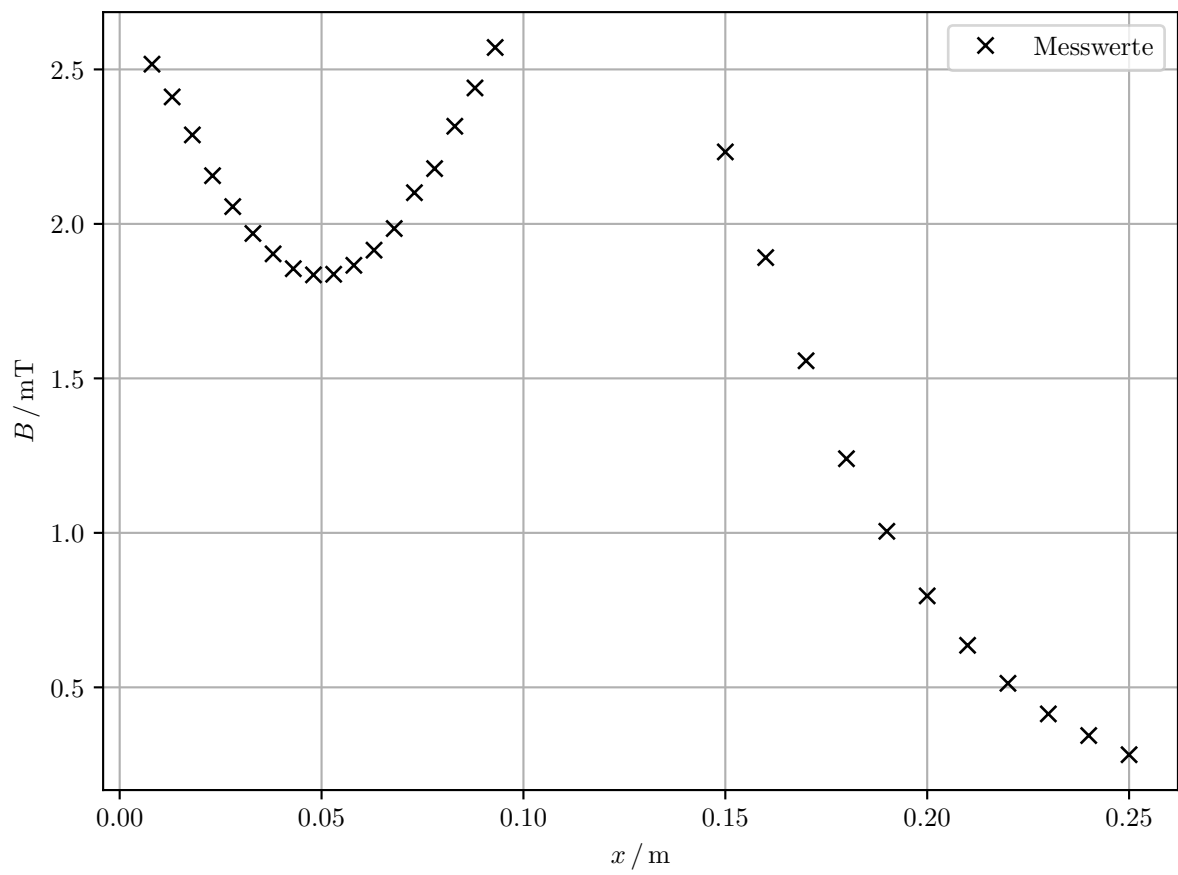
**Abbildung 10:** Graphische Darstellung der Messwerte des Spulenpaares für den Abstand 0,1 m.

Als letztes wird eine Helmholtz-Spule mit dem Abstand 0,14 m untersucht. Die Messwerte des Magnetfeldes werden in der Tabelle (5) und in der Abbildung (11) dargestellt.

**Tabelle 5:** Messwerte des Spulenpaares mit dem Abstand 0,14 m.

$x/\text{cm}$	$B/\text{mT}$
0,8	2,517
1,3	2,411
1,8	2,288
2,3	2,156
2,8	2,056
3,3	1,969
3,8	1,903
4,3	1,855
4,8	1,835
5,3	1,837
5,8	1,866
6,3	1,915
6,8	1,985
7,3	2,101
7,8	2,179
8,3	2,316
8,8	2,440
9,3	2,571
15	2,233
16	1,891
17	1,557
18	1,240
19	1,005
20	0,796
21	0,636
22	0,513
23	0,414
24	0,344
25	0,282





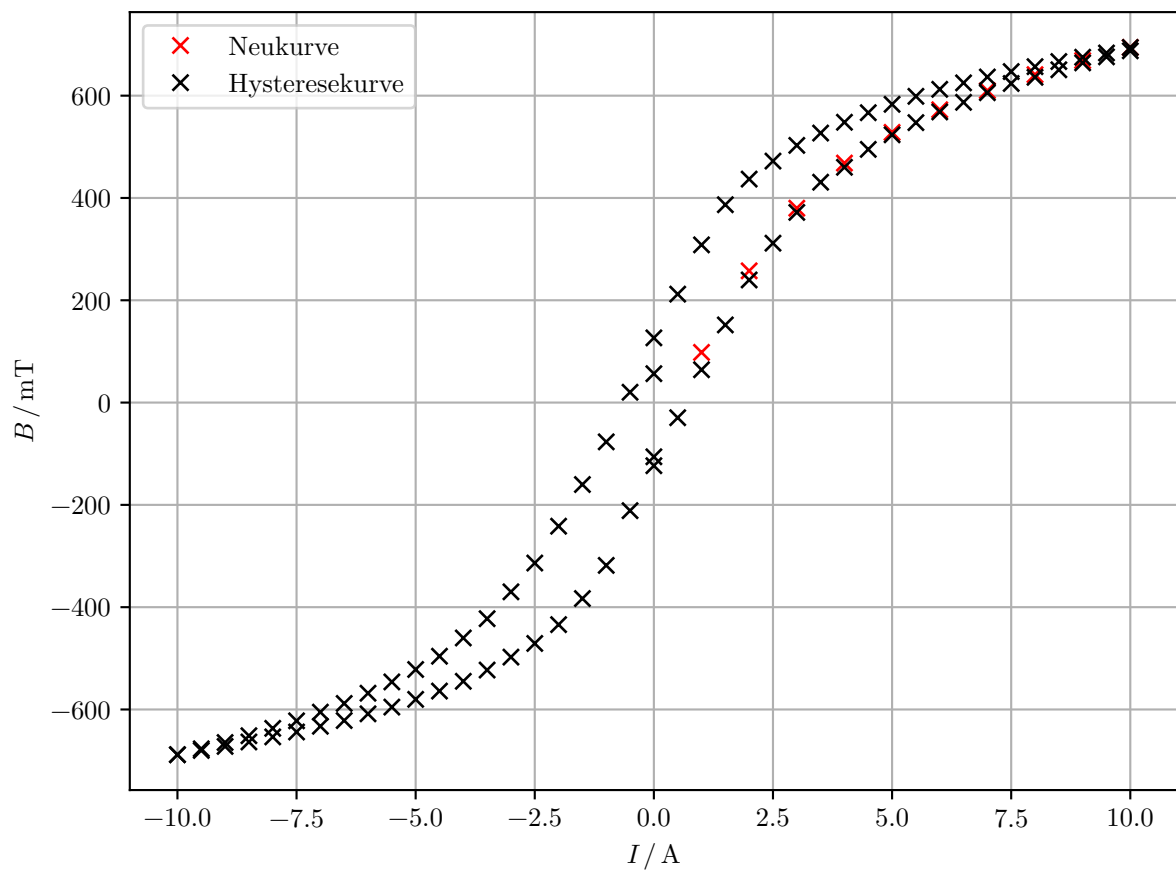
**Abbildung 11:** Graphische Darstellung der Messwerte des Spulenpaares für den Abstand 0,14 m.

### 4.3 Bestimmung der Hysteresekurve

In dem letzten Teil wird nun die Hysteresekurve eines Materials bestimmt. Dafür werden die Messwerte Graphisch in der Abbildung (12) dargestellt um die Parameter der Kurve zu bestimmen.

**Tabelle 6:** Messwerte der Neukurve.

**Tabelle 7:** Messwerte für die Hysteresekurve.



**Abbildung 12:** Graphische Darstellung der Hysteresekurve.

Aus dem Graphen lässt sich nun die Sättigungsmagnetisierung, die Remanenz und die Koerzitivkraft bestimmen.

Die Sättigungsmagnetisierung kann nur näherungsweise bestimmt werden, da die maximale Spannung des Generators 10 V ist und sich bei dieser Spannung noch keine Sättigungsmagnetisierung einstellt. Näherungsweise ist die Sättigungsmagnetisierung damit

$$B_s = 694,2 \text{ mT}.$$

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 308: Spulen und Magnetfelder*. 2017.