

Versuch V308

Spulen und Magnetfelder

Toby Teasdale
toby.teasdale@tu-dortmund.de

Erich Wagner
erich.wagner@tu-dortmund.de

Durchführung: 23.11.2021

Abgabe: 07.12.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Anwendungen vom Biot-Savartschen Gesetz	4
2.2	Ferromagnetische Stoffe	4
3	Durchführung	5
3.1	Lange Spule	5
3.2	Helmholtzspulenpaar	5
3.3	Hysteresekurve einer Ringspule	6
4	Auswertung	6
4.1	Lange Spule	6
4.2	Helmholtzspulenpaar	7
4.3	Ringspule	7
5	Diskussion	12
	Literatur	13

1 Ziel

Das Ziel des Versuchs „Spulen und Magnetfelder“ ist es, Magnetfelder verschiedener Spulenanordnungen zu messen und diese zu analysieren. Dabei soll unter anderem die Hysteresekurve einer Ringspule mit Eisenkern gemessen und grafisch dargestellt werden.

2 Theorie

Es ist bekannt, dass bewegte elektrische Ladungen magnetische Felder erzeugen (z.B. ein bewegtes Elektron). Dabei lässt sich das Magnetfeld als eine Vektorgröße beschreiben, dessen Richtung und Betrag durch die magnetische Feldstärke \vec{H} beschrieben wird. Die magnetische Flussdichte wird beschrieben durch

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (1)$$

wobei μ die *Permeabilität*, μ_0 die *Vakuum-Permeabilität* und μ_r die *relative Permeabilität* ist. Für bewegte Ladungen in einem stromdurchflossenen Leiter gilt das *Biot-Savartsche Gesetz*:

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

Dabei beschreibt I den Strom, der durch gegebenen Leiter fließt und $d\vec{s}$ das Leiterstück (siehe Abbildung 1).

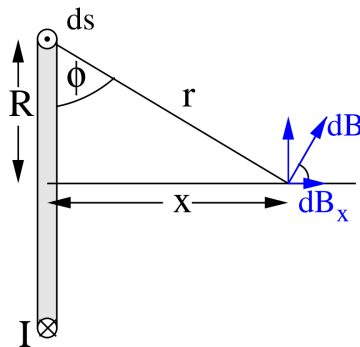


Abbildung 1: Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. [2]

2.1 Anwendungen vom Biot-Savartschen Gesetz

Durch die Gleichung (2) ergibt sich die wichtige Formel für Leiterschleifen.

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

Nun ist das Magnetfeld innerhalb stromdurchflossener Spulen annähernd homogen und die Gleichung (3) bedarf einer Anpassung. Außerdem haben wir nun N Windungen und die Spule eine Länge l :

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

Dabei ist zu beachten, dass diese Gleichung ihre Gültigkeit außerhalb der Spule verliert, da das Magnetfeld dort inhomogen wird.

Das Magnetfeld der **Ringspule** lässt sich ebenfalls über das Bio-Savart Gesetz (2) berechnen. Die Ringspule ist charakterisiert durch die Windungszahl N und den Radius R . Man kommt schließlich auf folgende Gleichung:

$$B = \mu_0 \mu_r I \frac{N}{2\pi R} \quad (5)$$

Das Magnetfeld eines **Helmholtzspulenpaares**, zwei identische Spulen im Abstand x zum Mittelpunkt, berechnet sich wie folgt:

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

Dabei ist das Magnetfeld im Idealfall auf der Symmetrieachse nahezu homogen.

2.2 Ferromagnetische Stoffe

Ferromagnetische Stoffe (wie z.B. Eisen) unterscheiden sich von gewöhnlichen Stoffen. Zunächst haben sie eine extrem große relative Permeabilität μ_r und die Gleichung (1) verliert ihre Gültigkeit. Solche Ferromagnetischen Stoffe besitzen ein permanentes magnetisches Moment. Die sogenannten *Weiß'schen Bezirke* richten sich in einzelnen Bereichen parallel zueinander aus.

Durch ein äußeres Magnetfeld lässt sich diese Ausrichtung verändern. Diese Richtungsänderung geschieht so lange, bis alle Weißschen Bezirke ausgerichtet sind. Diese Magnetisierungskurve lässt sich durch eine Hysteresekurve beschreiben. Diese ist rechts schematisch aufgetragen. Magnetisiert man ein zuvor unmagnetisiertes Material, wird dieses sich

zuerst an der Neukurve (grün) zum Sättigungswert B_s bewegen. Wird der Strom dann heruntergeregt, wird sich eine Restmagnetisierung einstellen.

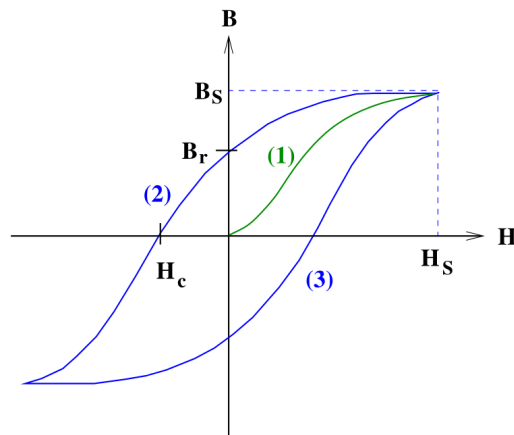


Abbildung 2: Kurvenverlauf der Hysterese. [2]

Diese Restmagnetisierung B_r nennt man die Remanenz. Diese lässt sich durch die *Koerzitivkraft* H_c ausgleichen (siehe Abbildung 2).

3 Durchführung

3.1 Lange Spule

Zunächst wird das Magnetfeld B einer langen Spule mit Windungszahl $N = 300$ und der Länge $L = 16.3\text{cm}$ gemessen. Dafür wird es zunächst an ein Netzteil angeschlossen. Bei der Durchführung wurde dabei ein Strom $I = 1\text{A}$ angelegt. Um das Magnetfeld zu messen wird der Halleffekt verwendet. Dafür wird eine longitudinale Hall-Sonde benutzt. Wir beginnen die Messung etwas außerhalb bei -0.02m und mit einer Schrittgröße von 0.005m wird die Sonde weiter reingeschoben.

3.2 Helmholtzspulenpaar

Das Helmholtzspulenpaar besteht aus jeweils zwei Spulen, wobei jede Spule identisch ist. Der Radius R beträgt dabei 62.5mm und die Windungszahl N beträgt 100 . Die Spulen werden über ein Netzgerät mit dem Strom $I = 2.1\text{A}$ betrieben. Hier wird das Magnetfeld um das Zentrum der beiden Spulen und etwas außerhalb in Abhängigkeit des Abstandes gemessen. Dabei wird eine transversale Hall-Sonde benutzt. Die Messung wird mit verschiedenen Abständen durchgeführt. Diese sind $d_1 = 0.12\text{m}$, $d_1 = 0.14\text{m}$ und $d_1 = 0.16\text{m}$.

3.3 Hysteresekurve einer Ringspule

Hier soll die Hysteresekurve einer Ringspule gemessen werden. Dafür wird eine Ringspule mit Windungszahl $N = 595$ und einem Luftspalt mit der Breite $d = 0.03\text{m}$ und das Netzteil angeschlossen. Dabei wird der Strom in 1A-Schritten auf 10A erhöht, beginnend von $I = 0$. Danach wird er in der selben Schrittweite auf 0 reduziert. Dann wird umgepolt und der Prozess wird erneut durchlaufen. Am Ende wird nun erneut umgepolt und wieder auf 10A erhöht, um die Hysteresekurve einmal komplett zu durchlaufen. Dabei wird erneut mit einer transversalen Hall-Sonde gemessen. Diese wird dabei innerhalb des Luftspaltes angebracht.

4 Auswertung

4.1 Lange Spule

Im folgenden wird die magnetische Flussdichte einer langen Spule gemessen und graphisch dargestellt.

Tabelle 1: Messdaten der langen Spule

x/m	B/mT
-0.02	0.23
-0.01	0.28
-0.01	0.35
-0.01	0.46
0.00	0.60
0.01	0.84
0.01	1.15
0.01	1.43
0.02	1.70
0.03	1.89
0.03	2.02
0.04	2.12
0.04	2.18

Es ist eine abflachende Steigung des Magnetfeldes zu erkennen. Der Theoriewert, der sich aus der Formel (4) ergibt, lautet:

$$B_{\text{LS}} = 2.31\text{mT} \quad (7)$$

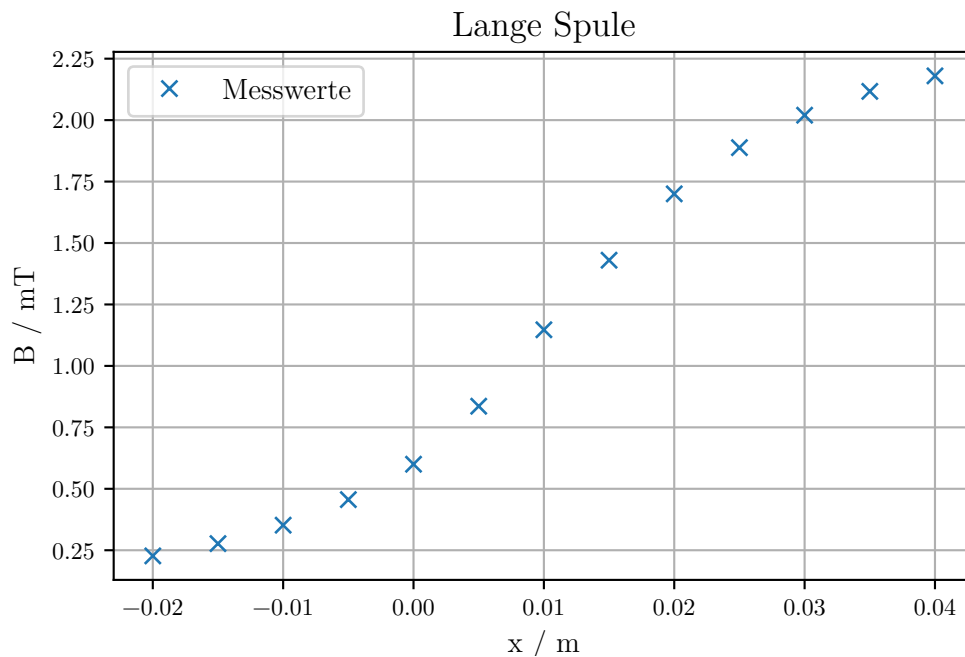


Abbildung 3: Magnetfeld in- und außerhalb der langen Spule.

4.2 Helmholtzspulenpaar

Im folgenden sind die Messdaten für die Abstände $d_1 = 0.12\text{m}$, $d_1 = 0.14\text{m}$ und $d_1 = 0.16\text{m}$ in Tabellen und Plots dargestellt.

Aus Gleichung (6) ergeben sich die theoretischen Vergleichswerte. In der Tabelle wird das Magnetfeld im Zentrum also mit der Theorie verglichen. Die prozentuale Abweichung berechnet sich über:

$$\Delta_{Abw} = \left(\frac{B_{\text{gemessen}}}{B_{\text{errech}}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (8)$$

4.3 Ringspule

Im Folgenden wollen wir die Hysteresekurve der Ringspule graphisch darstellen.

Aus den Messwerten lassen sich Remanenz und Koerzitivkraft angeben. Dabei wird die Koerzitivkraft aus der Abbildung abgelesen.

$$B_{r,1} = -86\text{mT}$$

$$H_{c,1} \approx 0.5\text{A}$$

$$B_{r,2} = 134.3\text{mT}$$

$$H_{c,2} \approx 0.7\text{A}$$

Tabelle 2: Messdaten Helmholtzspulenpaar $d_1 = 0.12\text{m}$

x/m	B/mT
-0.030	1.895
-0.025	1.826
-0.020	1.764
-0.015	1.705
-0.010	1.657
-0.005	1.645
0.000	1.632
0.005	1.638
0.010	1.660
0.015	1.700
0.020	1.754
0.025	1.818
0.030	1.890
0.090	1.634
0.100	1.390
0.110	1.137
0.120	0.915

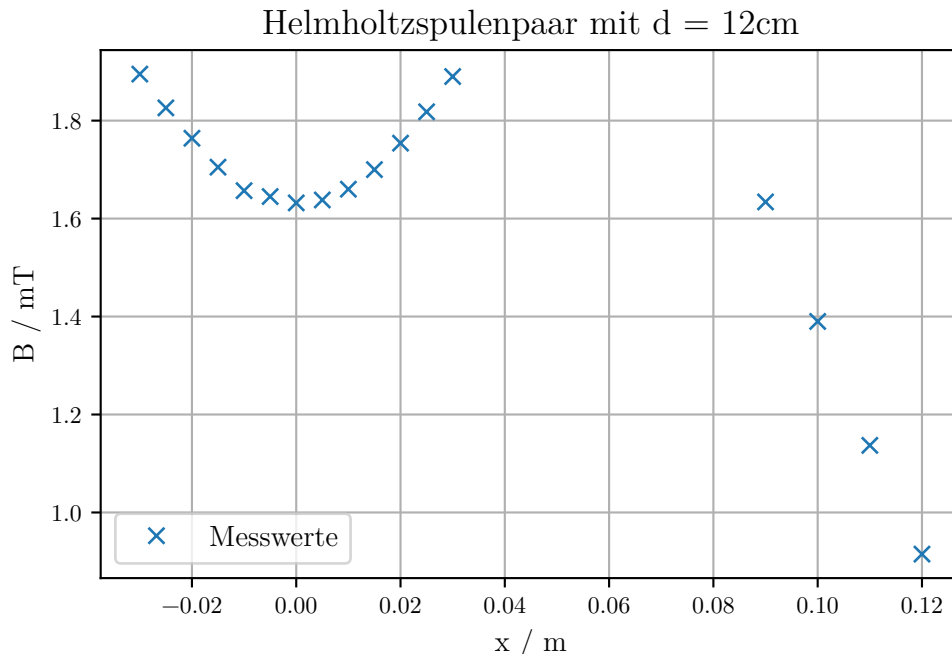


Abbildung 4: Magnetfeld des Helmholtzspulenpaars bei $d = 12\text{cm}$.

Tabelle 3: Messdaten Helmholtzspulenpaar $d_2 = 0.14\text{m}$

x/m	B/mT
-0.030	1.608
-0.025	1.520
-0.020	1.448
-0.015	1.394
-0.010	1.346
-0.005	1.322
0.000	1.312
0.005	1.316
0.010	1.314
0.015	1.375
0.020	1.437
0.025	1.505
0.030	1.572
0.100	1.596
0.110	1.332
0.120	1.091
0.130	0.875

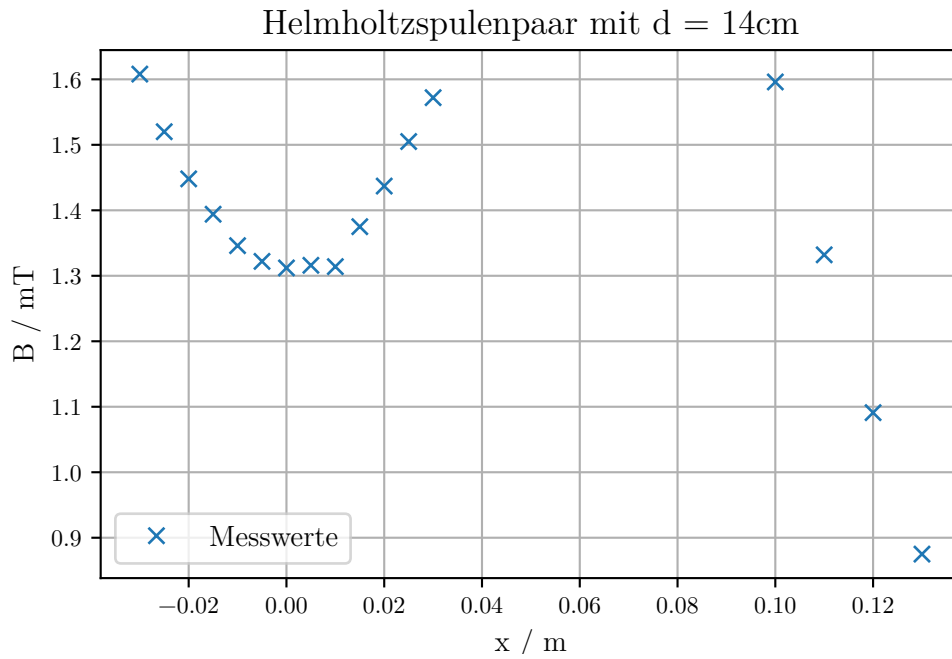


Abbildung 5: Magnetfeld des Helmholtzspulenpaars bei $d = 14\text{cm}$.

Tabelle 4: Messdaten Helmholtzspulenpaar $d_3 = 0.16\text{m}$

x/m	B/mT
-0.030	1.300
-0.025	1.225
-0.020	1.160
-0.015	1.112
-0.010	1.074
-0.005	1.054
0.000	1.044
0.005	1.049
0.010	1.073
0.015	1.106
0.020	1.156
0.025	1.210
0.030	1.300
0.110	1.546
0.120	1.295
0.130	1.060
0.140	0.852

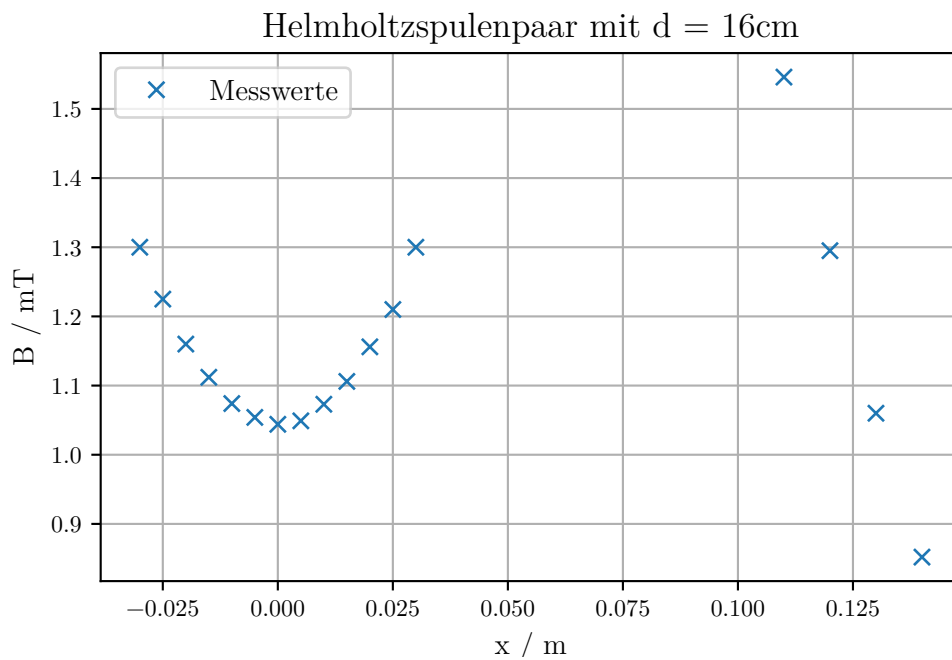


Abbildung 6: Magnetfeld des Helmholtzspulenpaars bei $d = 16\text{cm}$.

Tabelle 5: Vergleich der Messwerte mit der Theorie

d_i	$B_{\text{errech}}(0) / \text{mT}$	$B_{\text{gemessen}}(0) / \text{mT}$	Δ_{Abw}
i = 1	1.585	1.632	2.97
i = 2	1.247	1.312	5.21
i = 3	0.985	1.044	5.99

Tabelle 6: Messwerte der Hysterese

I / A	B / mT	I / A	B / mT	I / A	B / mT
0	0.0	0	-86.0	0	-134.3
1	64.9	-1	-118.0	1	75.5
2	230.7	-2	-307.8	2	258.7
3	351.5	-3	-434.8	3	388.6
4	435.2	-4	-525.4	4	480.8
5	496.8	-5	-579.9	5	543.1
6	542.9	-6	-588.3	6	586.9
7	582.1	-7	-625.0	7	626.7
8	613.8	-8	-657.2	8	659.0
9	641.5	-9	-684.9	9	686.4
10	666.6	-10	-714.1	10	711.8
9	653.3	-9	-696.9	-	-
8	638.7	-8	-679.2	-	-
7	617.8	-7	-661.4	-	-
6	596.0	-6	-637.9	-	-
5	565.7	-5	-610.0	-	-
4	529.6	-4	-576.0	-	-
3	484.4	-3	-535.2	-	-
2	420.7	-2	-471.4	-	-
1	300.0	-1	-345.3	-	-

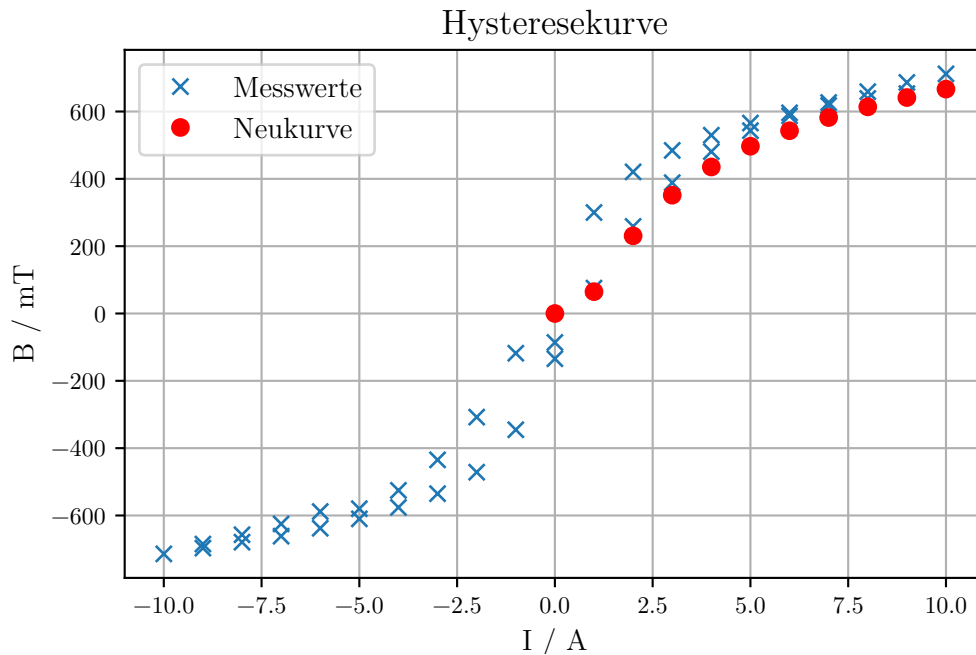


Abbildung 7: Hysteresekurve der Toroidspule mit Eisenkern.

5 Diskussion

Die Messwerte des Versuchs sind größtenteils von der Theorie hervorgesagt, jedoch gab es durchaus Abweichungen. Im folgenden werden die Ursachen und die Abweichungen diskutiert. Bei der Messung der langen Spule sieht man, dass sich eine Art Supremum andeutet. Dies ist auch zu erwarten, da das Magnetfeld innerhalb theoretisch homogen sein sollte. Aufgrund der Messung erkennt man nur eine Tendenz, denn es wurden nicht ausreichend Messwerte innerhalb der Spule gemessen. Das theoretische Supremum sollte bei $B_{LS} = 2.31T$ liegen. Das bedeutet, es ergibt sich eine Differenz mit dem zu letzt gemessenen Wert von ungefähr 5.63%.

Bei dem Helmholtzspulenpaar kann man die durch die Theorie hervorgesagte Homogenität im Bereich der Mitte gut beobachten. Schaut man sich die Abbildungen an, ist eine klare Tendenz zur Homogenität zu erkennen. Vergrößert man nun den Abstand, geht die Ausdehnung der Homogenität verloren. Vergleicht man die Parabeln von d_1 und d_3 , erkennt man deutlich die Reduzierung dieser Breiten. Beispielsweise gleicht d_3 fast schon einer Parabel. Das liegt daran, dass das Verhältnis von Radien der Spulen zu Abstand immer suboptimaler wird.

Bei der Ringspule wurden die Erwartungen beobachtet. Es zeichnet sich eine Neukurve ab

und es lässt sich eine deutliche Hysteresekurve beobachten. Allerdings sind die Ergebnisse für die Koerzitivkraft und die Remanenz doch deutlich unterschiedlich nach der Umpolung. Erwarten würde man, dass $B_{r,1} \approx B_{r,2}$ und $H_{c,1} \approx H_{c,2}$. Jedoch lässt sich dies nicht beobachten. Man beobachtet eine Abweichung von $\Delta B = 56.16\%$ und $\Delta H = 40\%$. Außerdem sollte die Neukurve zwischen den anderen Kurven liegen, sie liegt jedoch leicht unterhalb beider Kurven.

Literatur

- [1] 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/>.
- [2] *Versuchsanleitung „Spulen und Magnetfelder“*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2021.