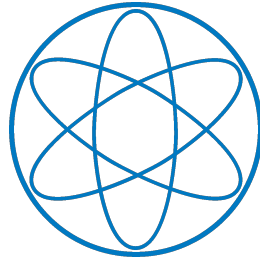


# Anfängerpraktikum Teil 2

## (Thermodynamik und Elektrodynamik)

### Magnetismus



Kurs 3, Gruppe 4, Team 11:

Michael Labenbacher

Marius Straßner

Fakultät für Physik

Technische Universität München

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Verwendete Methoden</b>	<b>1</b>
<b>3. Experimentelles Vorgehen</b>	<b>2</b>
<b>4. Messergebnisse</b>	<b>2</b>
<b>5. Auswertung</b>	<b>4</b>
5.1. Betrachtung als effektive Spule . . . . .	4
5.2. Bestimmung von $\mu_r$ . . . . .	5
5.3. Magnetfeldprofil bei transversaler Konfiguration . . . . .	6
<b>6. Diskussion</b>	<b>6</b>
 <b>Anhang</b>	 <b>8</b>
<b>A. Fehlerrechnung und Messwerttabellen</b>	<b>8</b>
<b>B. Literaturverzeichnis</b>	<b>12</b>

Freitag 10. August, 2018

## 1. Einleitung

In den folgenden Versuchsreihen wird das Magnetfeld einer Spule in Abhängigkeit vom Abstand analysiert. Dabei werden die Auswirkungen einer Stromvariation, eines in der Spule befindlichen Kernmaterials und der Ausrichtung der Spule betrachtet. Angemerkt sei hier, dass Messergebnisse und Fehlerrechnungen dem Anhang zu entnehmen sind.

## 2. Verwendete Methoden

Nach [1] lässt sich das Magnetfeld  $\vec{B}$  einer stromdurchflossenen, kurzen Zylinderspule mit kreisförmigem Querschnitt mit Hilfe des Biot-Savart-Gesetzes entlang der Symmetrieachse (x) mit

$$\vec{B}_{\text{kurz}}(x) = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \frac{2\pi R^2 IN}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \cdot \vec{e}_x \quad (2.1)$$

bestimmen. Dabei ist  $N$  die Windungszahl,  $R$  der Radius der Spule,  $x$  der Abstand vom Spulenmittelpunkt,  $\mu_0$  die Permeabilität von Vakuum (Luft) und  $\mu_r$  die relative Permeabilität des Kernmaterials in der Spule. Die Gleichung gilt nur, wenn das Magnetfeld auf der Spulenachse gemessen wird und Ausdehnungen der Spule vernachlässigt werden.

Um die tatsächliche Länge  $l$  der Zylinderspule zu berücksichtigen, kann bei konstanter Windungsdichte  $N/l$  über die Länge integriert werden und man erhält

$$\vec{B}_{\text{lang}}(x) = \frac{\mu_0 \mu_r IN}{2l} \left[ \frac{x + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{x - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2}} \right] \cdot \vec{e}_x \quad (2.2)$$

Analog könnte man im Anschluss noch über den Radius integrieren, um dessen Ausdehnung zu berücksichtigen, was für diesen Versuch keine Relevanz hat. Für eine sehr lange Spule kann als grobe Näherung

$$B_{\text{lang,innen}}(x) = \frac{\mu_0 \mu_r IN}{l} \quad (2.3)$$

im Zwischenraum betrachtet werden. Wie oben verwendet wurde gilt für eine gefüllte Spule, die Addition vom Magnetfeld  $\vec{B}_0$  ohne Kern mit dem Magnetfeld durch die Magnetisierung  $\vec{M}$ :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} \quad (2.4)$$

Das Magnetfeld wird mit einer Hallsonde bestimmt. Hauptbestandteil ist ein kleines Metallplättchen, durch das ein Strom  $I_H$  fließt. Wird das Plättchen von einem Magnetfeld  $\vec{B}$  durchsetzt, so wirkt im ruhendem Bezugssystem die Lorentzkraft  $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$  auf bewegte, geladene

Teilchen  $q = -e$ . Die dadurch stattfindende Ladungstrennung erzeugt ein elektrisches Feld  $E_H$ . Sind Lorentzkraft und die Kraft  $\vec{F}_E = q\vec{E}_E$ , verursacht durch das elektrische Feld, im Gleichgewicht, so kann die Hall-Spannung

$$U_H = \frac{I_H B_{\perp}}{nde}, \quad (2.5)$$

mit  $d$  die Höhe und  $n$  die Ladungsträgerdichte des Plättchens, gemessen werden. Damit kann das auf das Plättchen senkrecht wirkende Magnetfeld bestimmt werden.

### 3. Experimentelles Vorgehen

Für die ersten drei Teile der Versuchsreihe wird die Spule mit  $N = 1\,200$  Windungen so montiert, dass ihre Öffnung parallel zur Schiene zeigt<sup>1</sup>. Auf der Schiene wird eine bewegliche Magnetfeldsonde montiert so dass, der longitudinale Anteil des Spulenmagnetfelds erfasst werden kann. Die zu untersuchende Spule wird über ein digitales Strommessgerät (Votcraft VC130) und einen Schalter an eine Spannungsquelle (Votcraft VLP-1302A) angeschlossen.

Für die erste Messreihe wurde eine Stromstärke  $I = (1.00 \pm 0.13)$  A angelegt und das Spulenmagnetfeld (Rohdaten) sowie das überlagerte Magnetfeld (Untergrund, auf Grund von externen Einflüssen (Erde)) in verschiedenen Abständen gemessen. Dies wird für die zweite Datenreihe analog mit  $I = (0.50 \pm 0.11)$  A wiederholt. Anschließend wird für die dritte Messreihe die Prozedur bei einer Stromstärke von  $I = (1.00 \pm 0.13)$  A und mit einem Kernmaterial durchgeführt. Für die letzte Datenerfassung wird die Spulenfüllung wieder entfernt und die Spulenöffnung senkrecht zur Schiene positioniert. Mit einer transversalen Magnetfeldsonde wird bei dieser Konfiguration die Messung analog wiederholt.

In allen vier Messreihen wird jeweils der Abstand des Schlittens am angebrachten Lineal abgelesen und das Magnetfeld vor dem Einschalten des Stromflusses (Untergrund), mit Strom (Rohdaten) und nach dem Ausschalten (Untergrund) mit jeweiliger Ungenauigkeit erfasst. Durch Differenzbildung von den Rohdaten und Mittelwert der Untergrundmessungen erhält man das von der Spule erzeugte Magnetfeld. Des Weiteren wurden alle Abstände zur Umrechnung der gemessenen Position am Lineal zur Spulenmitte mit einem Messschieber in beiden Konfigurationen erfasst.

### 4. Messergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen im Intervall von  $-10$  mm bis  $100$  mm sind in der Abbildung 4.1 gegenübergestellt. Graphisch nicht dargestellte Messungen bei  $x/r > 100$  mm sind aus Gründen der besseren Darstellbarkeit dem Messprotokoll zu entnehmen und die Längenmessung der Spule ergab  $l = (70.45 \pm 0.12)$  mm.

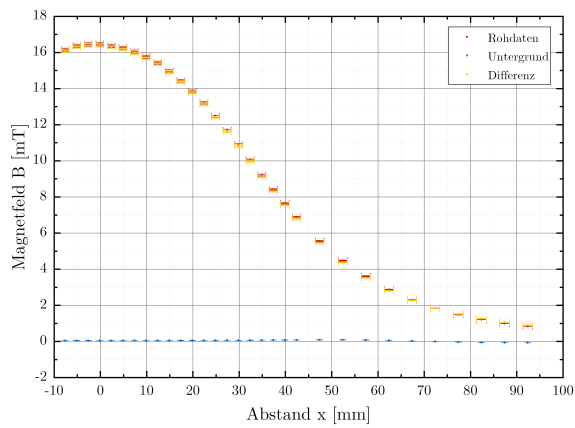
---

<sup>1</sup>In [1] findet sich ein Bild vom Versuchsaufbau.

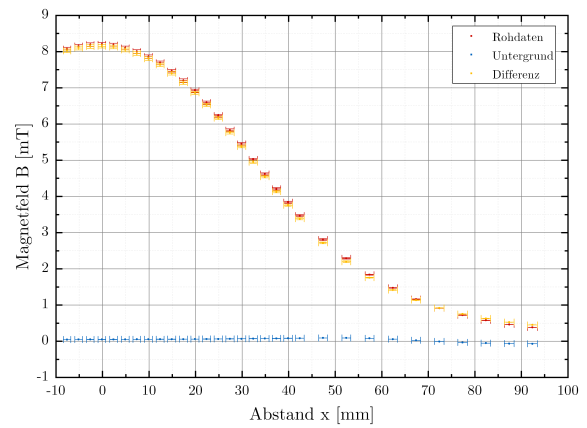
In Abbildung 4.1.a und b lässt sich erkennen, dass bei Verdopplung des Stromflusses das Magnetfeld dazu proportional zunimmt, was mit der Formel (2.2) in Einklang steht. Die stark vereinfachte Annahme eines konstanten Magnetfeldes in einer relativ langen Spule passt mit den Messungen zusammen, falls man sich nur im Inneren Nahe des Nullpunktes befindet. Bei den Rändern  $l/2 = (35.23 \pm 0.06)$  mm hingegen ist das Magnetfeld auf ca. die Hälfte des Maximalwertes abgesunken.

Vergleicht man Abbildung 4.1.a und c im äußeren Bereich, so stellt man bei Verwendung des Kerns eine Verstärkung des Magnetfeldes fest, was darauf hin deutet, dass entweder ein para- oder ferromagnetisches (ferri-, etc.) Material eingesetzt wurde. Näheres in Abschnitt 5.2.

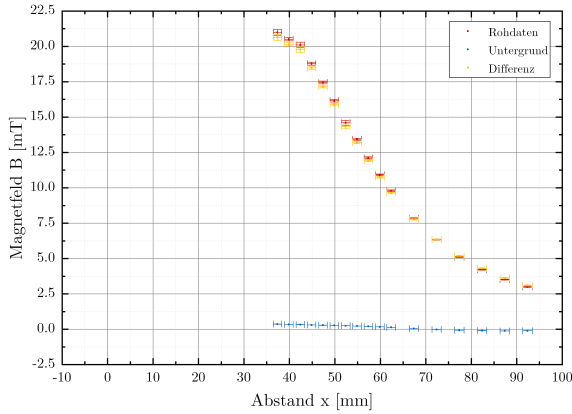
Die Magnetfeldstärke bei transversaler Konfiguration (4.1.d) scheint näherungsweise die Hälfte des bei longitudinal gemessenen Wertes (4.1.a) zu sein und die Abfallgeschwindigkeit bei großen Abständen ähnelt. Weiteres diesbezüglich wird in Abschnitt 5.3 diskutiert.



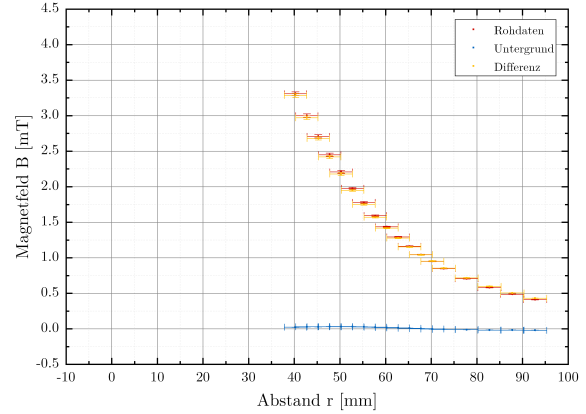
**a.** longitudinale Konfiguration, ohne Kernmaterial,  $I = (1.00 \pm 0.13)$  A, 1. Messreihe



**b.** longitudinale Konfiguration, ohne Kernmaterial,  $I = (0.50 \pm 0.11)$  A, 2. Messreihe



**c.** longitudinale Konfiguration, mit Kernmaterial,  $I = (1.00 \pm 0.13)$  A, 3. Messreihe



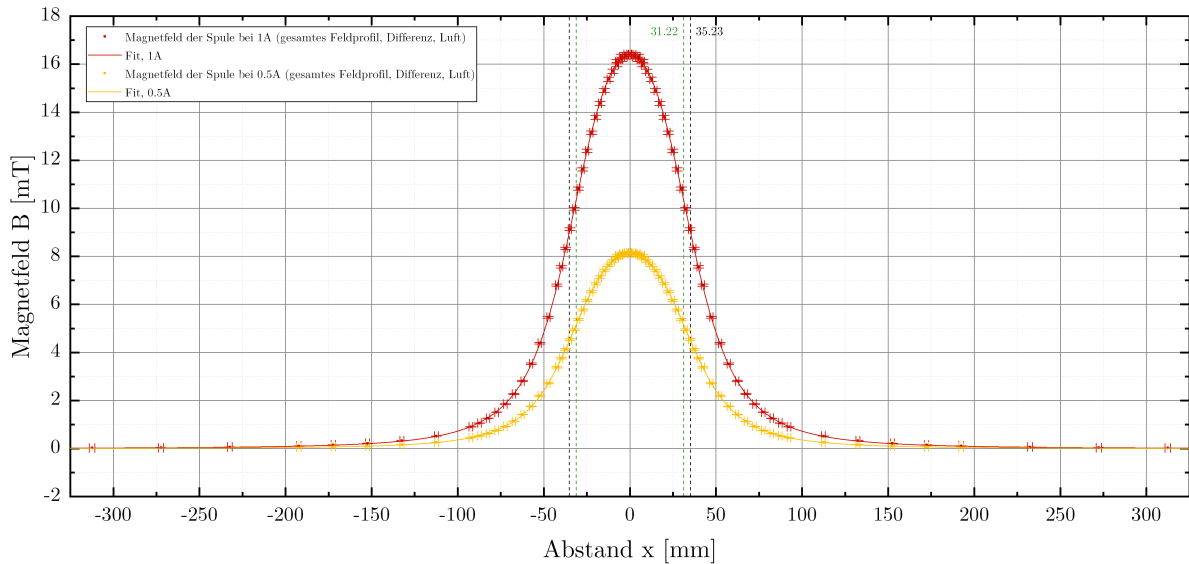
**d.** transversale Konfiguration, ohne Kernmaterial,  $I = (1.00 \pm 0.13)$  A, 4. Messreihe

**Abbildung 4.1.:** Gemessene Magnetfeldstärken  $B$  in Abhängigkeit des Abstandes  $x$  bzw.  $r$  zur Spulenmitte bei unterschiedlichen Stromstärken  $I$ , Ausrichtungen und Füllungen. Die Fehlerbalken veranschaulichen die Unsicherheiten der Magnetfeld- und Abstandsmessung, sowie der Fortpflanzung auf den Abstand zur Spulenmitte.

## 5. Auswertung

### 5.1. Betrachtung als effektive Spule

Aus den Daten der ersten Messreihen wurde durch Spiegelung der Daten um den Ursprung ein komplettes Feldprofil 5.1 der Spule, unter Annahme einer homogenen, gleichverteilten Wicklung, erzeugt. Mit der Formel (2.2), der Windungszahl und der relativen Permeabilität von Luft  $\mu_{r_{\text{Luft}}} \approx 1$  konnte eine dazu effektive Spule mit Länge  $l_{\text{eff}}$ , Radius  $R_{\text{eff}}$  und Stromstärke  $I_{\text{eff}}$  ermittelt werden. Durch Einsetzen im Nullpunkt ergibt sich die maximale Feldstärke  $B_{\text{max}0}$ . Die Unsicherheiten ergeben sich hier direkt aus dem Fit und für  $B_{\text{max}0}$  durch quadratische Fortpflanzung. Wiederholt man dies für die zweite Messreihe, so erhält man die Werte in Tabelle 5.1.



**Abbildung 5.1.:** longitudinales Feldprofil der Spule für die ersten zwei Versuchsreihen. Der Fit wurde mit Gleichung (2.2) durchgeführt (Parameterwerte im Text). Die schwarzen senkrechten Linien markieren die tatsächliche Länge der Spule, die grünen die der effektiven kreisrunden Spule nach gewichteter Mittlung.

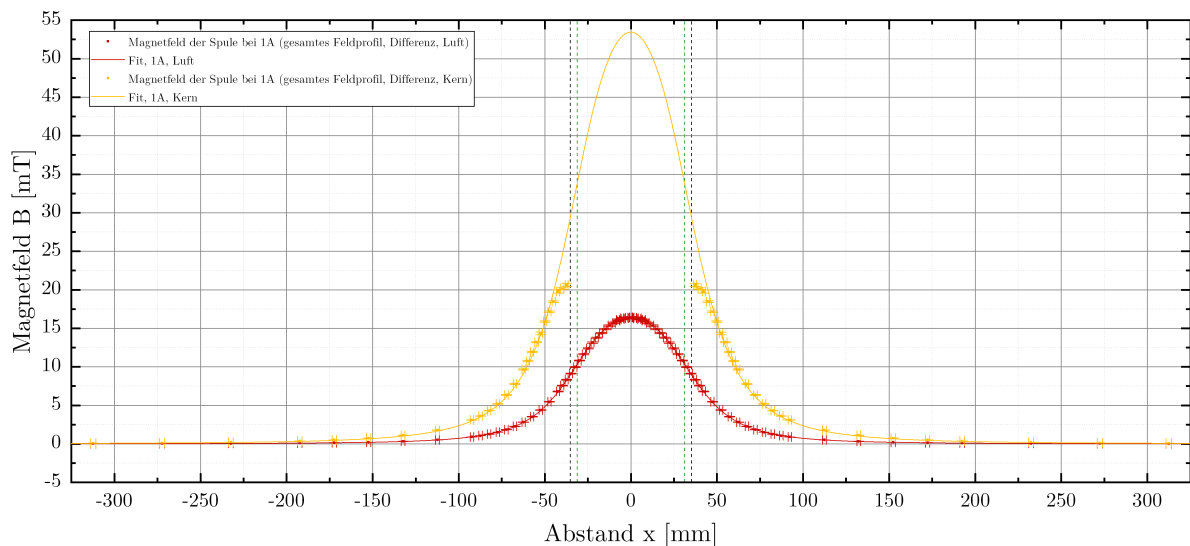
Eine gewichtete Mittlung führt auf eine Spule mit den Abmessungen  $R_{\text{eff}} = (31.72 \pm 0.05)$  mm und  $l_{\text{eff}} = (62.44 \pm 0.19)$  mm. Diese effektive, infinitesimal dünne, kreisförmige Spule der Länge  $l_{\text{eff}}$  würde somit das selbe Magnetfeld erzeugen, wie die zu untersuchende Spule.

**Tabelle 5.1.:** Parameterwerte für die effektive Spule

Versuchsreihe	$l_{\text{eff}}$ mm	$R_{\text{eff}}$ mm	$I_{\text{eff}}$ A	$B_{\text{max}_0}$ mT
1	$62.10 \pm 0.28$	$31.35 \pm 0.08$	$0.9595 \pm 0.0011$	$16.40 \pm 0.03$
2	$62.73 \pm 0.26$	$31.21 \pm 0.07$	$0.4772 \pm 0.0005$	$8.131 \pm 0.018$

## 5.2. Bestimmung von $\mu_r$

Durch die Betrachtung einer effektiven Spule und mit dem effektiven Strom bei der 1. Versuchsreihe in Tabelle 5.1 kann die Permeabilitätszahl  $\mu_r$  mit der 3. Messreihe für longitudinale Konfiguration mit Kern bestimmt werden. Dafür wird mit den Messdaten ein Fit mit dem einzigen freien Parameter  $\mu_r$  durchgeführt. Dies liefert  $\mu_r = 3.27 \pm 0.04$  und somit  $B_{\text{max}_{\text{Kern}}} = (53.5 \pm 0.7) \text{ mT}$  (im Toleranzbereich des dreifachen von  $B_{\text{max}_0}$ ). Mit Gleichung (2.4) folgt eine Magnetisierung  $M = \frac{1}{\mu_0} (B_{\text{max}_{\text{Kern}}} - B_{\text{max}_0}) = (29.5 \pm 0.6) \text{ kA/m}$ . Dabei wurde angenommen, dass in diesem Versuch exakt der selbe Strom fließt und die Unsicherheiten sind mit den Fitdaten und quadratischer Fortpflanzung berechnet worden.

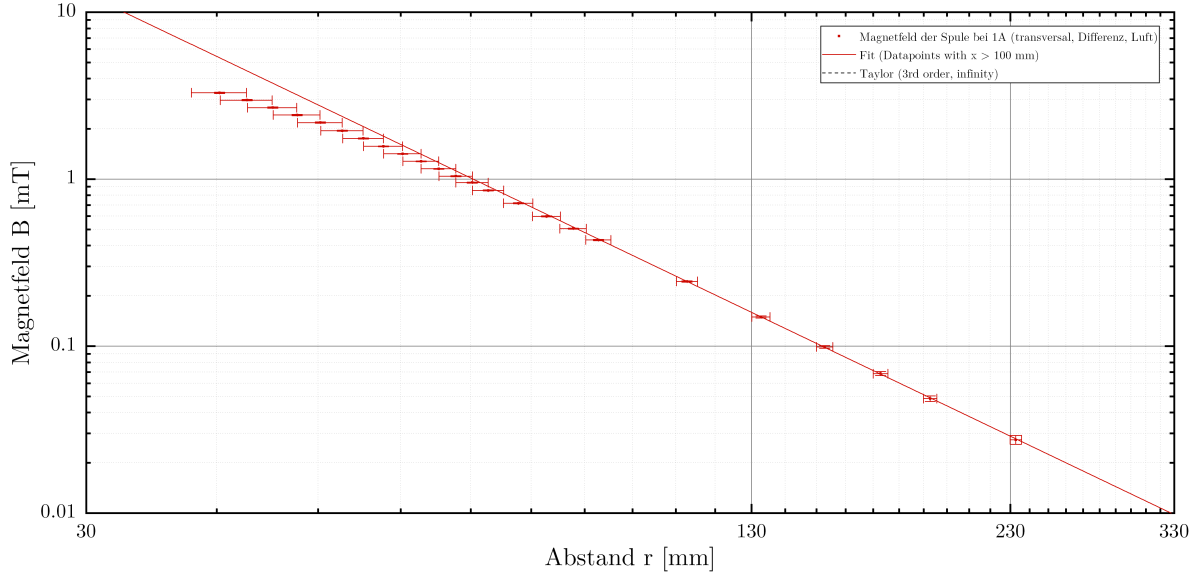


**Abbildung 5.2.:** longitudinales Feldprofil der Spule für die erste und dritte Versuchsreihen bei gleicher Stromstärke. Der rote Fit und die Hilfslinien werden in Abbildung 5.1 erläutert und der gelbe Fit wurde mit freiem Parameter  $\mu_r$  durchgeführt. (Parameterwerte im Text)

Mit dieser Permeabilität, von der äußeren Betrachtung und der geschätzten Masse würde man vom Material her auf Eisen oder ähnliches tippen, jedoch kann ohne weiteres keine genaue Aussage über das Material getätigt werden. Bei der Aufnahme des Magnetfeldes mit Kern fällt auf, dass das Magnetfeld bei ca. 20 mT nicht dem theoretischen Verlauf folgt. Dies kann größtenteils dadurch erklärt werden, dass bei der theoretischen Betrachtung eine kreisförmige Spule angenommen und vorausgesetzt wird, dass man sich exakt auf der Symmetrieachse befindet.

### 5.3. Magnetfeldprofil bei transversaler Konfiguration

Aus der vierten Messreihe ergibt sich der transversale Feldverlauf in Abhängigkeit des Abstandes vom Spulenmittelpunkt, dargestellt in Abbildung 5.3. In der doppel-logarithmischen Darstellung lässt sich ein annähernd linearer Verlauf, für relativ große Abstände erkennen und ein Fit mit  $B = (ar^b) \text{ m}^{-b}$  und den Datenpunkten mit  $r > 100 \text{ mm}$  liefert  $a = (0.355 \pm 0.008) \mu\text{T}$  und  $b = -2.993 \pm 0.011$ .



**Abbildung 5.3.:** transverse Feldkomponente der Spule aus der vierten Versuchsreihen (doppel-logarithmisch). Der Fit wurde mit Datenpunkten mit  $r > 100 \text{ mm}$  durchgeführt und für  $r \rightarrow \infty$  lässt sich eine  $r^{-3}$ -Abhängigkeit erkennen.

Eine Taylorapproximation der allgemeinen Formel [2] bei transversaler Konfiguration für eine kreisförmige, endliche Zylinderspule bis zur 3.Ordnung um  $r_0 = \infty$  zeigt, dass sich für große Abstände theoretisch eine  $r^{-3}$ -Abhängigkeit bei transversaler Konfiguration betragsmäßig nach

$$B_{\text{trans}} = \frac{\mu_0 R^2 I N}{4} r^{-3}$$

ergibt. Übersetzung der vorliegenden Spule in die effektive in Abschnitt 5.1 ergibt theoretisch erwartet  $B = (0.3538 \pm 0.0012) \mu\text{T/m}^3 \cdot r^{-3}$  für  $r \gg R_{\text{eff}}$ . Dies liegt im Toleranzbereich der gefitteten Geraden.

Ein Vergleich mit der longitudinalen Konfiguration ohne Kern entlang der Symmetrieachse zeigt, dass bei großen Abständen die Magnetfeldstärke betragsmäßig nach Taylorapproximation mit Gleichung (2.2) um  $x_0 = \infty$

$$B_{\text{long}} = \frac{\mu_0 R^2 I N}{2} x^{-3}$$

ergibt, was dem doppelten bei der transversalen Feldkonfiguration entspricht.

## 6. Diskussion

### longitudinale Konfiguration ohne Kern

Die Fits und die sich daraus ergebenden Parameterwerte können als sehr genau betrachtet werden. Dies liegt daran, dass im Bereich wo das Feld stark variiert (Spuleneintritt) Datenpunkte erfasst werden konnten. Dies ist auch für die sich ergebende Unsicherheit der maximalen Feldstärke von Bedeutung und der sichtbar passende Fit mit der Theoriekurve bestätigt dies. Deutlich erkennbar war die Proportionalität zwischen Strom-  $I$  und Feldstärke  $B$ .

Nicht berücksichtigte Fehler in diesem Versuch sind Abweichungen der Homogenität der Wicklung, Zuleitungen und sich ergebende Randeffekte. Statistische Abweichungen wurden durch die große Anzahl an Messungen großteils kompensiert, jedoch ist die Berücksichtigung von systematischen Abweichungen mit Fits nicht ideal. Traten bei der Längenbestimmung systematische Fehler auf, so induziert dies eine nicht berücksichtigte Dehnung des Feldprofils. Der Einfluss auf die max. Feldstärke ist dabei gering, jedoch ändern sich dadurch die Abmessungen der effektiven Spule. Deshalb wäre es vorteilhaft systematische Abweichungen diesbezüglich weitgehendst zu eliminieren. Dies gilt für beide Stromstärken.

### longitudinale Konfiguration mit Kern

Für Messfehler gelten die gleichen Verhältnisse wie zuvor. Durch das Kernmaterial mit  $\mu_r \neq 1$  veränderte sich die Geometrie des Magnetfeldes und da Messungen im Inneren nicht möglich sind erschwert dies die Auswertung der Daten. Bei kleiner Variationen der Fitparameter änderte sich die maximale Amplitude relativ stark, was die Unsicherheit von  $\mu_r$  erhöht. Des Weiteren hätte man die Messungen für diesen Versuch gleich anschließend zur Konfiguration ohne Kern mit  $I \approx 1$  A durchführen müssen und nicht dazwischen die Messreihe mit dem halben Strom, da bei der Bestimmung der Permeabilität angenommen werden muss, dass der Strom in diesen beiden Messreihen gleich groß ist. Dies erhöht die Unsicherheit die sich aus dem Fit ergibt.

### transversale Konfiguration ohne Kern

Messfehler analog zu vorher. Wesentlicher Unterschied zur longitudinalen Konfiguration ist die Magnetfeldrichtung, womit das Plättchen des Hall-Sensors gedreht werden muss, was durch Verwendung einer passenden Sonde realisiert wurde. Auffallend ist, dass der Abfall der Magnetfeldstärke im Außenbereich gleich dem bei der longitudinalen Konfiguration ist, sofern man sich weit weg von der Spule befindet. In der Nähe der Spule nimmt die Steigung ab und weitere Effekte, wie z. B. Unsymmetrie der Spulenwicklung, Kreisförmigkeit der Spule und die verwendete Wickeltechnik müssen betrachtet werden.



## A. Fehlerrechnung und Messwerttabellen

### Messdaten

Die Messwerte der vier Versuchsreihen finden sich in Tabelle A.1 und A.2. Dabei ist  $s$  der mit dem Lineal gemessene Abstand am Schlitten,  $B_I$  das Magnetfeld der Spule bei fließendem Strom (Rohdaten) und  $B_U$  (umfasst alle Störfelder, Untergrund) die Magnetfeldstärke vor bzw. nach dem die Spule eingeschaltet wurde.

**Tabelle A.1.:** Messdaten für die ersten beiden Versuchsreihen

1. Versuchsreihe				2. Versuchsreihe			
$s$ mm	$B_I$ mT	$B_{U_{\text{vor}}}$ $\mu\text{T}$	$B_{U_{\text{nach}}}$ $\mu\text{T}$	$s$ mm	$B_I$ mT	$B_{U_{\text{vor}}}$ $\mu\text{T}$	$B_{U_{\text{nach}}}$ $\mu\text{T}$
0	16.15	46	47	0	8.07	48	48
2.5	16.37	50	50	2.5	8.15	50	50
5.0	16.45	50	51	5.0	8.19	51	50
7.5	16.46	51	51	7.5	8.20	51	51
10.0	16.36	51	51	10.0	8.18	52	52
12.5	16.26	53	53	12.5	8.10	53	53
15.0	16.04	54	54	15.0	8.00	54	54
17.5	15.76	55	55	17.5	7.86	54	55
20.0	15.43	55	56	20.0	7.69	56	55
22.5	14.96	57	58	22.5	7.46	58	57
25.0	14.43	59	60	25.0	7.20	59	59
27.5	13.85	60	61	27.5	6.92	60	61
30.0	13.21	62	62	30.0	6.59	62	63
32.5	12.46	64	64	32.5	6.23	64	64
35.0	11.69	67	67	35.0	5.83	67	67
37.5	10.89	69	69	37.5	5.45	69	70
40.0	10.05	72	71	40.0	5.02	72	71
42.5	9.21	75	75	42.5	4.62	76	75
45.0	8.41	79	78	45.0	4.21	79	78
47.5	7.65	82	82	47.5	3.84	82	83
50.0	6.89	84	85	50.0	3.47	85	85
55.0	5.56	91	91	55.0	2.81	91	92
60.0	4.48	91	91	60.0	2.29	92	91
65.0	3.61	80	81	65.0	1.837	81	80
70.0	2.87	58	57	70.0	1.475	59	59
75.0	2.30	26	27	75.0	1.164	28	27
80.0	1.843	-7	-6	80.0	0.915	-6	-5
85.0	1.482	-32	-32	85.0	0.722	-32	-32
90.0	1.211	-52	-52	90.0	0.578	-52	-51
95.0	0.998	-64	-64	95.0	0.465	-63	-64

1. Versuchsreihe				2. Versuchsreihe			
$s$ mm	$B_I$ mT	$B_{U_{vor}}$ $\mu$ T	$B_{U_{nach}}$ $\mu$ T	$s$ mm	$B_I$ mT	$B_{U_{vor}}$ $\mu$ T	$B_{U_{nach}}$ $\mu$ T
100.0	0.839	-69	-70	100.0	0.383	-68	-69
120.0	0.483	-38	-38	120.0	0.221	-37	-38
140.0	0.355	27	27	140.0	0.190	28	27
160.0	0.277	59	59	160.0	0.167	60	59
180.0	0.226	73	74	180.0	0.150	75	74
200.0	0.185	74	73	200.0	0.129	74	75
240.0	0.101	38	38				
280.0	0.067	28	28				
320.0	0.065	39	39				

**Tabelle A.2.:** Messdaten für die Messreihen drei und vier

3. Versuchsreihe				4. Versuchsreihe			
$s$ mm	$B_I$ mT	$B_{U_{vor}}$ $\mu$ T	$B_{U_{nach}}$ $\mu$ T	$s$ mm	$B_I$ mT	$B_{U_{vor}}$ $\mu$ T	$B_{U_{nach}}$ $\mu$ T
45.0	21.00	360	375	47.5	3.31	23	24
47.5	20.50	346	346	50.0	3.00	30	28
50.0	20.10	326	331	52.5	2.71	29	29
52.5	18.78	304	306	55.0	2.45	31	30
55.0	17.45	286	288	57.5	2.21	31	31
57.5	16.16	271	270	60.0	1.979	30	30
60.0	14.60	250	251	62.5	1.780	28	28
62.5	13.43	229	231	65.0	1.595	24	24
65.0	12.12	203	201	67.5	1.437	19	19
67.5	10.92	171	171	70.0	1.293	14	14
70.0	9.79	135	135	72.5	1.162	9	9
75.0	7.83	56	55	75.0	1.045	3	4
80.0	6.34	-14	-13	77.5	0.951	-3	-2
85.0	5.11	-68	-67	80.0	0.849	-6	-7
90.0	4.21	-97	-96	85.0	0.706	-11	-11
95.0	3.51	-111	-111	90.0	0.581	-17	-17
100.0	2.99	-108	-109	95.0	0.488	-18	-17
120.0	1.742	-35	-35	100.0	0.412	-20	-20
140.0	1.167	46	47	120.0	0.228	-16	-16
160.0	0.826	78	78	140.0	0.145	-5	-4
180.0	0.609	88	88	160.0	0.102	3	3
200.0	0.462	85	84	180.0	0.079	11	10
240.0	0.258	44	42	200.0	0.066	17	18
280.0	0.164	31	31	240.0	0.037	9	10
320.0	0.129	41	41				

## Fehlerrechnung

Für die Umrechnung der gemessenen Länge  $s$  am Lineal zum Abstand zur Spulenmitte  $x$  wurden folgende Längen erfasst:

- longitudinale Konfiguration:
  1.  $l = (76.45 \pm 0.13)$  mm ... Gesamtlänge der Spule außen
  2.  $l_1 = (24.35 \pm 0.07)$  mm ... Abstand von der Spule bis zum Anfang des Lineals
  3.  $l_2 = (70.5 \pm 0.6)$  mm ... Abstand von der vorderen Position des Wagens bis zur Spitze des Sensors
  4.  $l_3 = (0.3 \pm 0.1)$  mm ... Abstand von der Spitze des Sensors bis zum Hall-Plättchen (Datenblattangabe mit systematischer Unsicherheit)

Die systematischen Unsicherheiten von  $l$ ,  $l_1$  und  $l_2$  ergeben sich aus einer geschätzten Genauigkeit des Messschiebers von  $0.1\% \cdot \text{„Messwert“}$ . Statistische Unsicherheiten von  $l$  und  $l_1$  durch die Ableseungenauigkeit von  $0.05$  mm und bei  $l_2$  wurden quadratisch fortgepflanzt noch zusätzlich  $0.5$  mm mitberücksichtigt, auf Grund von diversen Schwankungen vor und zurück der Hall-Sonde während des Versuches. Die Umrechnung erfolgt jeweils mit:

$$x = s + \frac{l}{2} + l_1 - l_2 + l_3$$

- transversale Konfiguration:
  1.  $l_4 = (42.00 \pm 0.09)$  mm ... Innendurchmesser der Spule
  2.  $l_5 = (32.6 \pm 2.0)$  mm ... Abstand von der inneren Kante der Spule bis zum Anfang des Lineals
  3.  $l_6 = (62.5 \pm 0.6)$  mm ... Abstand von der vorderen Position des Wagens bis zur Spitze des Sensors
  4.  $l_7 = (1.7 \pm 0.1)$  mm ... Abstand von der Spitze des Sensors bis zum Hall-Plättchen (Datenblattangabe mit systematischer Unsicherheit)

Die systematischen Unsicherheiten von  $l_4$ ,  $l_5$  und  $l_6$  ergeben sich aus einer geschätzten Genauigkeit des Messschiebers von  $0.1\% \cdot \text{„Messwert“}$ . Bei den Längenmessungen wurde statistisch je  $0.05$  mm durch die Ableseungenauigkeit berücksichtigt und bei  $l_6$  wurden quadratisch fortgepflanzt noch zusätzlich  $0.5$  mm mitberücksichtigt, auf Grund von diversen Schwankungen vor und zurück der Hall-Sonde während des Versuches. Die Messung der Länge  $l_5$  gestaltete sich schwieriger, da man den Messschieber nicht exakt anlegen konnte, weshalb noch  $2$  mm statistisch mitberücksichtigt werden. Die Umrechnung erfolgt mit:

$$r = s + \frac{l_5}{2} + l_6 - l_7 + l_8$$

Getrennte quadratische bzw. lineare Fortpflanzung führt durch anschließende Addition auf den Gesamtfehler  $\Delta x/r$ , wobei noch für  $s$  eine Ableseungenauigkeit am Skalenstrich des Lineals von  $0.25$  mm und eine Herstellergenauigkeit von  $0.25\% \cdot \text{„Messwert“}$  dazu kommt.

Bei der Messungen des Stromes entstanden statistische Abweichungen durch die Auflösung von 0.01 A und des pseudostatistischen Anteils von 0.1 A und systematische Fehler durch die Genauigkeitsangabe von  $2.5\% \cdot \text{„Messwert“}$ . Während der einzelnen Versuche wurde angenommen, dass die Stromstärke konstant blieb, was soweit es die Auflösung des Messgeräts erlaubt eine Aussage dazu zu treffen, vorlag.

Bei der Magnetfeldmessung wurde jeweils statistisch die Auflösung mit 1 digit berücksichtigt und der systematische Anteil des Magnetometers und der Magnetfeldsonde beträgt  $0.5\% \cdot \text{„Messwert“}$ . Bei der Untergrundmessung wurde statt den Messwerten bei der syst. Abweichung der Mittelwert verwendet, was auf Grund der geringen Differenz zulässig ist.

## B. Literaturverzeichnis

- [1] *Magnetismus (MAG)*. 2015. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap2/MAG.pdf> (besucht am 11. August 2018) (siehe S. 1–2).
- [2] Karl F. Müller. *Berechnung der Induktivität von Spulen*. Bd. 17. Springer, 1926. DOI: 10.1007/BF01655986 (siehe S. 6).