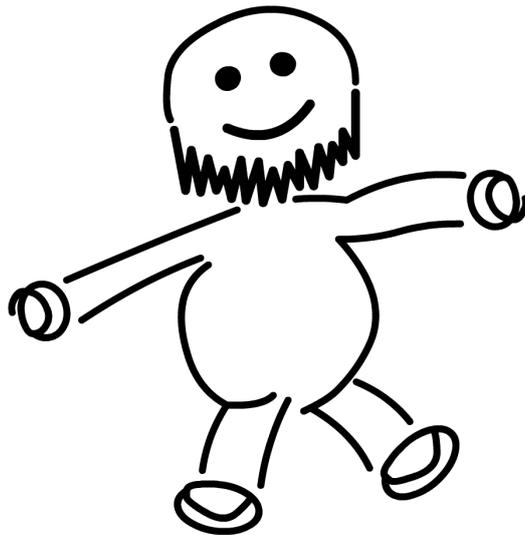


Physikalisches Praktikum für das Hauptfach Physik

Versuch 14

Magnetfeld von Spulen

Wintersemester 2005 / 2006



Name:	Daniel Scholz
Mitarbeiter:	Hauke Rohmeyer
E-Mail:	physik@mehr-davon.de
Gruppe:	B9
Assistent:	Tobias Liese
Durchgeführt am:	26. September 2005
Protokoll abgeben:	28. September 2005
Protokoll verbessert:	—

Testiert: _____

1 Einleitung

In diesem Versuch werden wir die Magnetfelder von unterschiedlichen Spulen mit zwei Messverfahren ausmessen und diese beiden Verfahren auf ihre Tauglichkeit untersuchen. Dabei betrachten wir eine lange und eine kurze Spule sowie ein Helmholtzspulenpaar.

Für die Messverfahren nutzen wir eine Hallsonde und eine Induktionsspule.

2 Theorie

2.1 Magnetfelder

Jede bewegte Ladung erzeugt ein Magnetfeld, welches von dieser ausgeht. Eine große Bündelung solcher bewegter Ladungen kann man in einer Spule erreichen, in der sehr viele Windungen eng aneinander liegen. Maße für die Stärke dieses Magnetfeldes sind die *magnetische Erregung*¹ \vec{H} und die *Kraftflussdichte* \vec{B} , die durch

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

miteinander in Beziehung stehen. μ_0 ist hierbei die *Influenzkonstante* und μ_r ist eine materialspezifische Permeabilitätskonstante des Stoffes, der in die Spule eingebracht wird. Befindet sich in der und um die Spule nur Luft, so kann $\mu_r \approx 1$ angenommen werden, dies wird im gesamten Versuch der Fall sein.

Der magnetische Fluss

Der magnetische Fluss Φ ist gegeben durch eine Fläche A , die von der Kraftflussdichte \vec{B} durchdrungen wird:

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}.$$

Da jedes Magnetfeld quellenfrei ist, sind die Magnetfeldlinien immer geschlossen und besitzen keinen Anfangs- oder Endpunkt. Somit ergibt sich nach dem Gaußschen Satz

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

Daraus folgt, dass das Integral über einen geschlossenen Weg c im Gegensatz zum elektrischen Feld nicht gleich Null ist. Es gilt das Ampèresche Gesetz

$$\int_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I,$$

¹ In älteren Büchern heißt diese Größe auch oft magnetische Feldstärke, derzeit verwendet man jedoch die Bezeichnung der Erregung.

wobei I die Stromstärke in dem Leiter ist, der von der geschlossenen Kurve c eingeschlossen wird. Aus dieser Gleichung ergeben sich einige Formeln zum Beschreiben von magnetischen Feldern:

(1) Das Feld außerhalb eines geraden Stromleiters ergibt sich zu

$$\vec{B}(r) = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi r},$$

wobei r der Abstand zum Leiter ist.

(2) Im Inneren einer Spule der Länge L mit N Windungen, in der das Feld als homogen angesehen wird, lautet die Kraftflussdichte

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \frac{IN}{L}.$$

(3) Reiht man mehrere Spulen aneinander, so verhalten sie sich wie eine einzige Spule mit den addierten Windungszahlen und Längen der einzelnen Spulen.

Induktionsgesetz

Bei einem zeitlich veränderten Fluss wird eine Spannung induziert, die der Ursache entgegenwirkt, die also beim Abschalten einer Spannungsquelle noch eine kurze Zeit den Stromfluss aufrecht hält. Dies ist das **Induktionsgesetz**, welches sich mathematisch zu

$$U_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A}$$

ergibt.

2.2 Magnetfelder einer Kreisschleife

Um das Magnetfeld einer stromtragenden geschlossenen Leiterschleife c mit dem Linienstrom I zu berechnen, nutzt man häufig das **Biot-Savartsche Gesetz**

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_c \frac{\vec{e}_t \times (\vec{r} - \vec{r}_0)}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^3} dl.$$

Es soll nun das Magnetfeld auf der Symmetrieachse [hier die z Achse] eines stromdurchflossenen Ringes vom Radius R mit dem Linienstrom I berechnet werden.

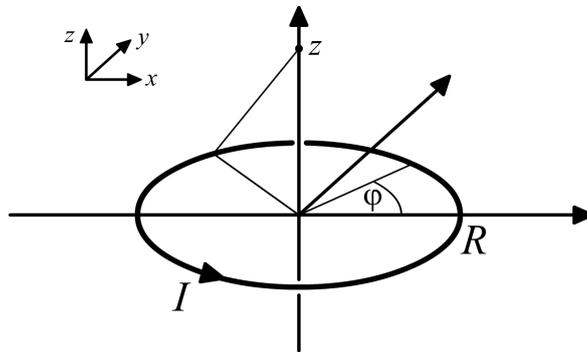


Abbildung 1: Stromdurchflossener Ring

In Zylinderkoordinaten gilt nun $dl = R d\varphi$ sowie

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix}, \quad \vec{r}_0 = \begin{pmatrix} R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_t = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix},$$

damit ergibt sich sofort

$$\vec{e}_t \times (\vec{r} - \vec{r}_0) = \begin{pmatrix} z \cos \varphi \\ z \sin \varphi \\ R \end{pmatrix},$$

$$|\vec{r} - \vec{r}_0|^3 = (R^2 + z^2)^{3/2}.$$

Es folgt nun

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz \cos \varphi}{(R^2 + z^2)^{3/2}} d\varphi = 0,$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz \sin \varphi}{(R^2 + z^2)^{3/2}} d\varphi = 0,$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} d\varphi = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

2.3 Magnetfelder einer Spule

Aus dem Ergebnis einer Kreisschleife soll nun das Magnetfeld einer Spule der Länge L mit N Windungen berechnet werden.

Unter der Annahme, die Spule sei homogen gewickelt, lässt sich eine Größe n einführen, die die Windungsdichte beschreibt:

$$n := \frac{N}{L}.$$

Betrachtet wir nun die Überlagerung von infinitesimal dünnen gestapelten Ringen, die jeweils den Strom dI führen, so erhalten wir die differentielle Stromdichte

$$\frac{dI}{dz} = nI \quad \Leftrightarrow \quad dI = nI dz.$$

Es gilt dann also

$$B_z = \frac{\mu_0}{2} R^2 \int \frac{dI}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2)$$

und um die Stärke des Gesamtmagnetfeldes zu bestimmen, ist über die Gesamtlänge der Spule zu integrieren. Dazu wird das Magnetfeld an der Stelle a auf der z Achse betrachtet, wobei a den Abstand von dem Spulenende beschreibt. Man erhält dann unter Verwendung der Gleichung (2) das Integral

$$\begin{aligned} B_z(a) &= \frac{\mu_0}{2} nIR^2 \int_{L-a}^a \frac{dz}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \\ &= \frac{\mu_0 IN}{2L} \cdot \left(\frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} + \frac{L-a}{\sqrt{R^2 + (L-a)^2}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Ohne die Influenzkonstante μ_0 ergibt sich nun durch $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ gerade

$$H_z(a) = \frac{IN}{2L} \cdot \left(\frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} + \frac{L-a}{\sqrt{R^2 + (L-a)^2}} \right). \quad (4)$$

Zwei Spezialfälle dieser Formel sind nun die folgenden:

- (1) Im Mittelpunkt der Spule, also bei $a = L/2$, ergibt sich für $L \gg R$ die bekannte Näherung

$$H_{Mitte} = \frac{IN}{L}.$$

- (2) Am Rande der Spule, also bei $a = 0$, ergibt sich ebenfalls für $L \gg R$ der Ausdruck

$$H_{Rand} = \frac{IN}{2L}.$$

2.4 Die Hallsonde

Die Hallsonde ist ein sehr einfaches Gerät um die Stärke eines Magnetfeldes zu bestimmen.

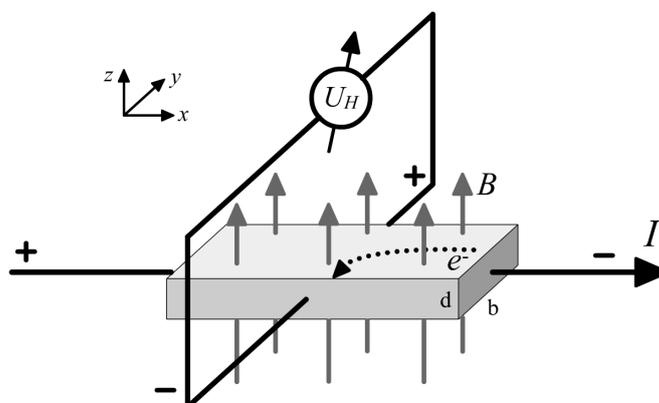


Abbildung 2: Beispiel einer Hallsonde

Sie besteht aus einem quaderförmigen Halbleiter, durch den ein Strom fließt. Wirkt nun senkrecht darauf ein magnetisches Feld, so werden die Elektronen durch die auf sie wirkende Lorentzkraft senkrecht zur Fließrichtung abgelenkt. Es findet also eine Ladungstrennung auf dem Quader statt, wodurch ein elektrisches Feld in y Richtung entsteht. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, wird an den Seiten der Sonde die Spannung U_H , die **Hallspannung**, abgegriffen. Je stärker nun die magnetische Flussdichte ist, umso mehr werden die Elektronen abgelenkt und desto größer ist auch die Hallspannung. Damit die Sonde auch die komplette magnetische Feldstärke misst und nicht nur Komponenten davon, muss man sie möglichst senkrecht vom magnetischen Feld durchdringen lassen.

Rechnerisch bedeutet dies nun: In einem Zeitraum Δt bewegen sich

$$\Delta N = nAv\Delta t$$

Ladungsträger durch die Querschnittsfläche A des Quaders, dabei ist n die Anzahl freier Elektronen und v die Geschwindigkeit der Elektronen in x Richtung. Daraus ergibt sich die Stromstärke durch die Fläche A zu

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qnvA.$$

Wenn nun die Lorentzkraft eines Magnetfeldes die Elektronen verschiebt, tut sie das so lange, bis das entstehende elektrische Feld die Lorentzkraft kompensiert und die Elektronen wieder geradlinig durch die Sonde fließen. In y Richtung kann dann die Hallspannung abgegriffen werden, nämlich

$$U_H = E_y \cdot b = v \cdot B \cdot b,$$

dabei ist E_y das elektrische Feld in y Richtung und b ist die materialspezifische Beweglichkeit der Ladungsträger.

Man erkennt nun, dass die Spannung proportional zur magnetischen Flussdichte ist und somit kann man mit einer geeichten Hallsonde die Stärke des B Feldes bestimmen.

2.5 Eichung eines Galvanometers

Ein ballistisches Galvanometer ist ein Messinstrument, mit dem auch sehr kleine Ströme gemessen werden können. Da dieses Gerät meist nur dazu verwendet wird um festzustellen, ob ein Strom fließt oder nicht, müssen wir das Galvanometer zunächst eichen.

Wird durch ein ballistisches Galvanometer ein kurzer Stromstoß geschickt, so führt es einen Stoßausschlag aus. Die Drehspule des Galvanometers schwingt aus ihrer Ruhelage zu einem Umkehrpunkt und kehrt dann schwingend oder je nach Dämpfung auch kriechend in die Gleichgewichtslage zurück. Der Umkehrpunkt ist hierbei ein Maß für die geflossene Ladung:

$$Q = \int I dt.$$

Der Ausschlag φ des Zeigers ist dabei proportional zu Q , es gibt also eine Konstante m mit

$$\varphi = m \cdot Q.$$

Um nun die Konstante m zu finden, braucht es einer Eichung durch verschiedene Stromstöße konstanter Länge. Die Stromstärke, die dabei durch das Galvanometer fließt, wird durch die folgenden Schaltung angedeutet:

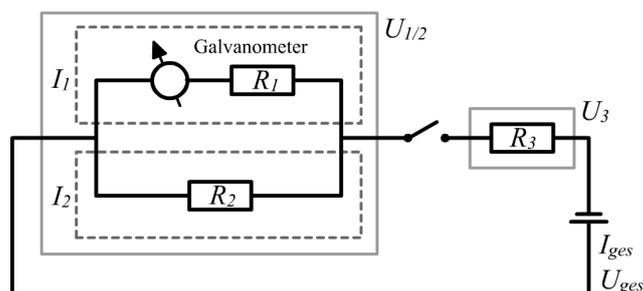


Abbildung 3: Schaltskizze zur Stromstärke des Galvanometers

Zunächst lässt sich der Gesamtwiderstand berechnen, es gilt

$$R_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} + R_3$$

und in unserem Versuch ist $R_1 = 1\text{ k}\Omega$, $R_2 = 1\ \Omega$ und $R_3 = 1\text{ k}\Omega$ [siehe dazu auch Abbildung 4 zum Versuchsaufbau]. Weiter verwenden wir die Gesamtspannung $U_{ges} = 2\text{ V}$, dadurch lässt sich nun die Gesamtstromstärke berechnen:

$$I_{ges} = \frac{U_{ges}}{R_{ges}} \approx 1.998 \cdot 10^{-3}\text{ A}.$$

Durch diese Größen erhalten wir nun den Strom I_1 , der durch das Galvanometer fließt:

$$I_1 = I_{ges} \cdot \left(\frac{R_1 + R_2 + R_{ges}}{R_2} \right) \approx 1.996 \cdot 10^{-6}\text{ A},$$

dabei wurde der Widerstand des Galvanometers in der Hoffnung unberücksichtigt gelassen, dass er sich als klein gegenüber $1\text{ k}\Omega$ herausstellt.

Die in dem Zeitintervall Δt durch das Galvanometer geflossene Ladung Q kann nun einfach durch

$$Q = I_1 \cdot \Delta t$$

berechnet werden. Durch lineare Regression verschiedener Messwerte kann nun die Konstante m bestimmt werden.

2.6 Messung des Magnetfeldes mit einer Induktionsspule

Man kann Magnetfelder statt mit einer Hallsonde auch mit Hilfe einer kleinen Induktionsspule ausmessen. Diese hält man parallel zu dem zu messenden Feld und erzeugt durch Ein- oder Ausschalten des Feldes einen Spannungstoß in der Induktionsspule.

Nach dem Induktionsgesetz lässt sich nun ein direkter Zusammenhang zwischen Galvanometerausschlag φ und dem magnetsichen Fluss Φ herstellen:

$$\begin{aligned} \varphi &= m \int_{t_0}^{t_1} I \, dt = \frac{m}{R} \int_{t_0}^{t_1} U \, dt \\ &= \frac{mN_{ind}}{R} \int_{t_0}^{t_1} \dot{\Phi} \, dt = \frac{mN_{ind}}{R} (\Phi(t_1) - \Phi(t_0)), \end{aligned}$$

dabei ist m die Eichungskonstante des Galvanometers, N_{ind} die Anzahl der Windungen der Induktionsspule und $R = R_1 = 1\text{ k}\Omega$ der Widerstand im Galvanometerteilkreis. Für $\Phi(t_0) = 0$ und $\Phi(t_1) = \Phi$ ergibt sich also

$$\Phi = \frac{\varphi R}{mN_{ind}}.$$

Da ein homogenes Magnetfeld B untersucht wird, welches stets dieselbe Querschnittsfläche A_{ind} der Induktionsspule durchsetzt, gilt für die Stärke des Magnetfeldes durch $\Phi = B \cdot A_{ind}$ gerade

$$B = \frac{\Phi}{A_{ind}} = \frac{\varphi R}{A_{ind} m N_{ind}} = \frac{4\varphi R}{\pi D_{ind}^2 m N_{ind}}, \quad (5)$$

dabei ist D_{ind} der Durchmesser der Induktionsspule.

2.7 Bestimmung der Influenzkonstanten μ_0

Aus der Messung mit einer Hallsonde

Verwendet man eine Hallsonde, um die magnetische Erregung H einer Spule zu untersuchen, so kann die Influenzkonstante μ_0 durch

$$\mu_0 = \frac{B}{H}$$

bestimmt werden, dabei ist B das theoretisch erwartete Magnetfeld der Spule aus (3).

Aus der Messung mit einer Induktionsspule

Verwendet man eine Induktionsspule und dazu Formel (5), um das Magnetfeld B einer Spule zu untersuchen, so kann die Influenzkonstante μ_0 wieder durch

$$\mu_0 = \frac{B}{H}$$

bestimmt werden, dabei ist H die theoretisch erwartete magnetische Erregung einer Spule aus (4).

3 Versuchsdurchführung

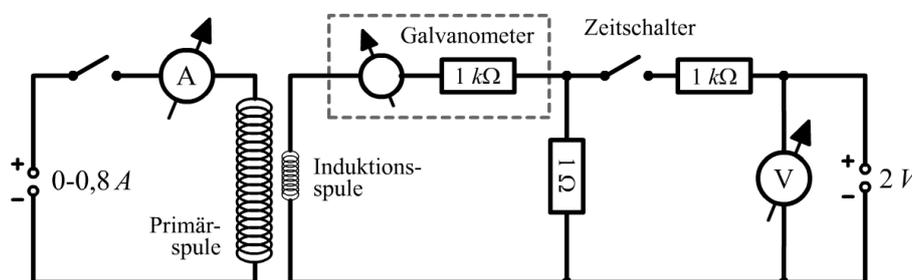


Abbildung 4: Schaltskizze zum Versuchsaufbau

Zunächst muss das Galvanometer geeicht werden. Dazu wird die Induktionsspule in die Mitte der Primärspule gebracht und über einen Zeitschalter verschiedene kurze Stromstöße konstanter und bekannter Länge durch das Galvanometer geschickt, um dabei den Zeigerausschlag zu messen.

Anschließend wird der Primärkreis unter Strom gesetzt [0.5 A] und die sich einstellenden Ausschläge beim Ein- und Ausschalten des Sekundärkreises bestimmt. Die Stromstärke wird hierbei auf kleine Ampèrebereiche begrenzt, da sich sonst sehr hohe Induktionsspannungen am Schalter aufbauen, die zum Funkenschlag führen können. Diese Messung wird bei einer Schrittweite von 2 cm auf der gesamten Längsachse der Spule durchgeführt.

Danach wird diese Messung für unterschiedliche Stromstärken zwischen 0.1 und 0.8 A wiederholt, dabei befindet sich die Induktionsspule jedoch nur in der Mitte der Spule. Es wird dabei nun die lange und die kurze Luftspule verwendet. Aus diesen Messungen soll später jeweils die Influenzkonstante μ_0 bestimmt werden.

Mit Hilfe der Hallsonde werden die Magnetfelder der langen und kurzen Spulen sowie der Helmholtzspule in Abhängigkeit der Position auf der Längsachse gemessen. Die Schrittweite beträgt hierbei 1 cm und die Stromstärke ist wieder 0.5 A.

Es darf nicht vergessen werden, dass alle nötigen Spulendaten für die Auswertung notiert werden müssen.

4 Auswertung

4.1 Eichung des Galvanometers

Wie schon unter 2.5 beschrieben, können wir durch

$$Q = 1.996 \cdot 10^{-6} A \cdot \Delta t$$

die geflossene Ladung berechnen, die in den festen Zeitintervallen Δt geflossen ist. Die jeweiligen Ausschläge konnten somit gegen diese Ladung aufgetragen werden, um aus einer linearen Regression die Eichkonstante m zu erhalten.

Wir erzielten das Ergebnis

$$m = 18245200 \pm 135985 \frac{C}{Skt}$$

[dabei wurde auf eine Auftragung der Werte verzichtet, da dieser Auswertungsteil zum wiederholten Male durchgeführt wurde und es nichts Spannendes zu beobachten gibt].

4.2 Lange Luftspule

Durch die Eichkonstante m können wir nun nach der in 2.6 hergeleiteten Gleichung

$$B = \frac{\varphi R}{A_{ind} m N_{ind}} = \frac{4\varphi R}{\pi D_{ind}^2 m N_{ind}} \quad (6)$$

aus den Messungen mit der Induktionsspule die Kraftflussdichte B für jede Position im Inneren der Spule bestimmen. Es gilt dabei $R = 1 k\Omega$, $N_{ind} = 369$ und $D_{ind} = 5.9 cm$.

Neben der Induktionsspule haben wir das Magnetfeld der langen Spule auch mit der Hallsonde ausgemessen. Die Werte wurden in der Einheit G für Gauß angezeigt und sind durch $T = 10^{-4} \cdot G$ in Tesla umzurechnen. Außerdem hatte die Hallsonde einen Offset von $4.9 G$, dieser Wert war also von unseren Messdaten zu subtrahieren.

Wie das theoretische Magnetfeld aussehen sollte, zeigt Gleichung (3). Die Homogenität im Inneren der Spule kann durch

$$B_{Mitte} = \frac{\mu_0 I N}{L}$$

angenähert werden. Wir verwendeten eine Stromstärke I von $0.5 A$, die Spule hatte $N = 829$ Windungen und eine Länge L von $44.9 cm$. Alle berechneten Werte sind nun in der folgenden Abbildung zu sehen:

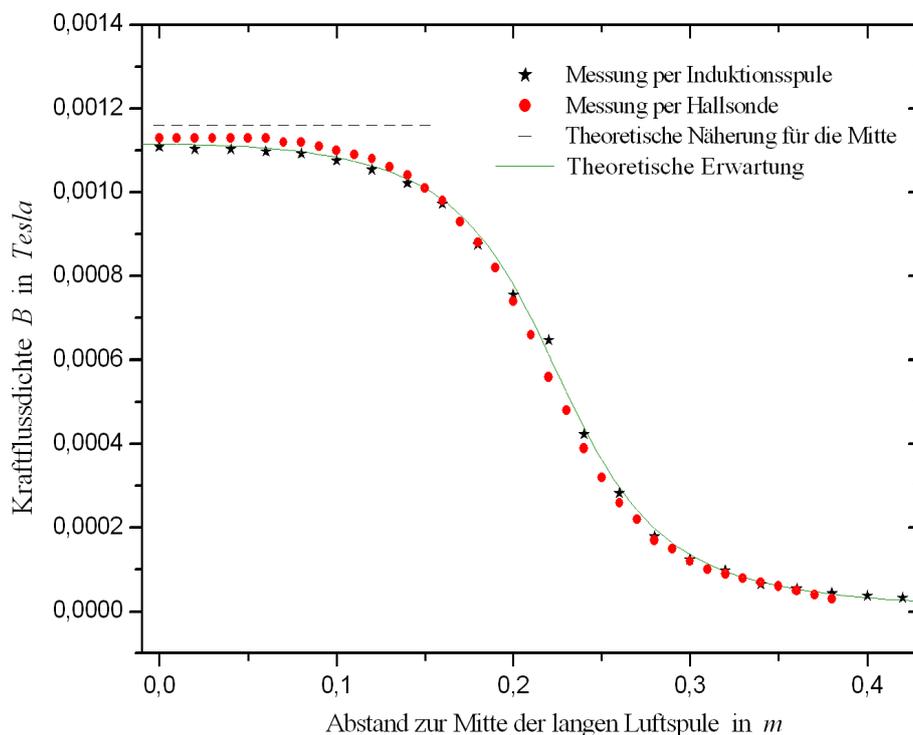


Abbildung 5: Das Magnetfeld der langen Luftspule entlang der Längsachse.

Beide Messungen, also die Messung mit der Induktionsspule sowie die Messung mit der Hallsonde, entsprechen sehr gut der theoretischen Erwartung. Es sind maximale Abweichungen von 5% zu erkennen, was ein deutlich besseres Ergebnis ist, als wir vermutet hätten. Auch die erwartete Homogenität im Inneren der Spule wurde jeweils fast erreicht. Dadurch kann nun auch keine Aussage darüber getroffen werden, welche Messmethode als zuverlässiger erscheint, beide scheinen bei uns sehr gut verlaufen zu sein.

Aus allen Messungen können wir nun auch die Influenzkonstante μ_0 berechnen, dazu müssen wir für jede Position das berechnete B Feld durch das theoretische H Feld teilen [siehe Kapitel 2.7]. Für beide Messmethoden haben wir jeweils den Mittelwert mit Standardabweichung berechnet:

Messmethode	Influenzkonstante μ_0
Induktionsspule	$(1.2367 \pm 0.0479) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Hallsonde	$(1.2048 \pm 0.0841) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$

4.3 Kurze Luftspule

Neben der langen Spule haben wir auch noch eine vergleichsweise kurze Luftspule mit recht großem Radius betrachtet. Hier verwendeten wir nur die Hallsonde, um das Magnetfeld auf der Längsachse zu bestimmen. Die

theoretische Feldstärke wurde wieder in (2.3) hergeleitet und die Gleichung zur Homogenität im Inneren der Spule ist analog zur langen Spule. Wir verwendeten wieder eine Stromstärke von 0.5 A , die Spule hatte $N = 499$ Windungen, eine Länge L von 27 cm und einen Radius R von 10 cm . Die berechneten Werte sind in der folgenden Abbildung zu sehen:

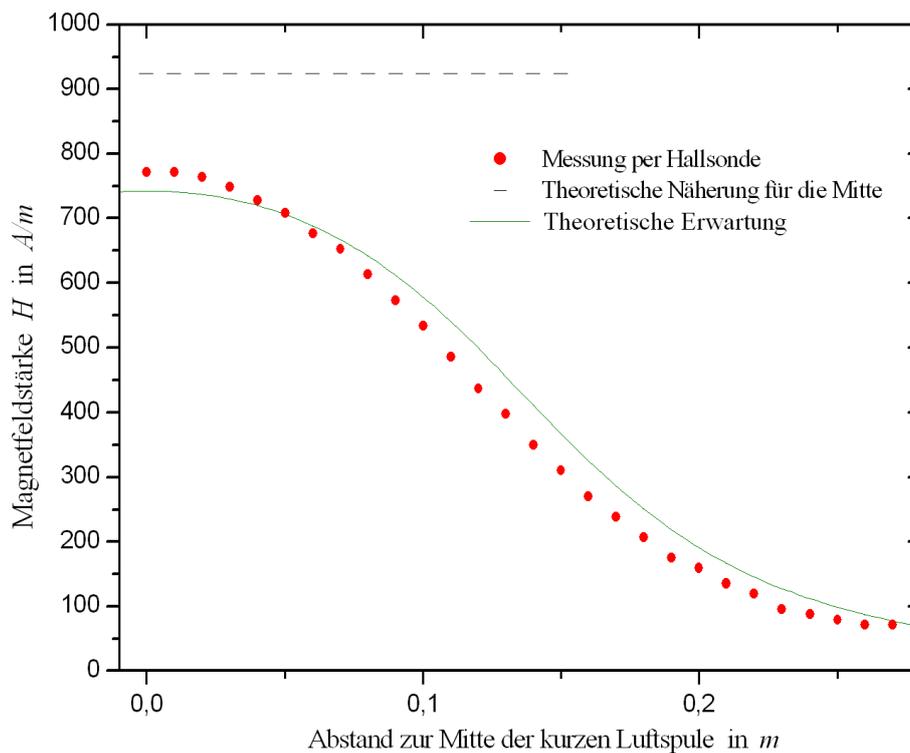


Abbildung 6: Die Feldstärke der kurzen Luftspule entlang der Längsachse.

Diesmal weicht die gemessene Feldstärke etwas mehr von der theoretischen Kurve ab, vor allem fällt die gemessene Stärke zum Spulenäußeren schneller ab. Die erwartete Homogenität liegt deutlich über der gemessenen aber auch der theoretisch erwarteten Homogenität. Dies ist dadurch zu erklären, dass für die Gleichung der Homogenität ein Radius R der Spule angenommen wurde, der sehr viel größer im Vergleich zur Länge L ist [siehe Kapitel 2.3]. Dies war hier nicht der Fall, somit verwundert uns auch dieses Ergebnis keineswegs.

Analog zur langen Spule lässt sich nun auch die Influenzkonstante μ_0 berechnen, wir erhielten das folgende Ergebnis:

$$\mu_0 = (1.1276 \pm 0.1125) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am.}$$

4.4 Helmholtzspulen und Homogenität

Neben den beiden Luftspulen haben wir noch ein Helmholtzspulenpaar mit der Hallsonde ausgemessen. Die homogene Feldstärke zwischen den beiden Spulen kann durch die Gleichung

$$H = I \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \cdot \frac{N}{R},$$

angenähert werden, dabei ist $I = 0.5 \text{ A}$ die verwendete Stromstärke, $N = 507$ die Windungszahl der Helmholtzspulen und $R = 6.6 \text{ cm}$ deren Radius [zur Gleichung siehe Versuch 13: Die spezifische Elektronenladung]. Die Feldstärke der Helmholtzspule und die erwartete Homogenität wurde nun im Vergleich zu den beiden Luftspulen aufgetragen:

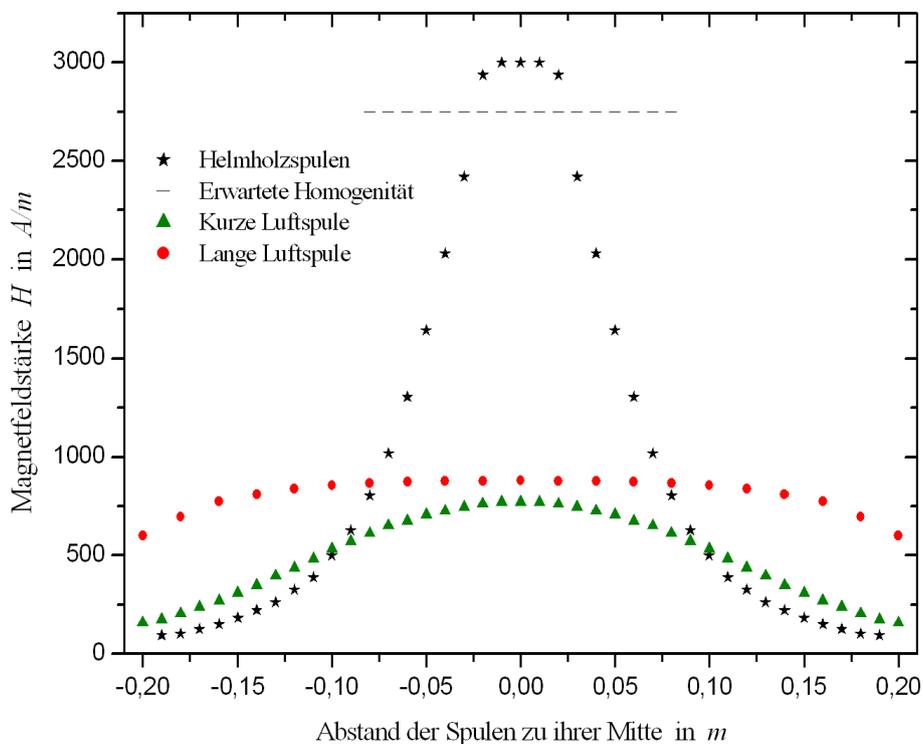


Abbildung 7: Die Feldstärke aller untersuchten Spulen entlang der Längsachse.

Es ist zu beobachten, dass die Feldstärke zwischen dem Helmholtzspulenpaar sehr viel größer als die der Luftspulen ist, jedoch fällt die Stärke außerhalb der Spulen sehr viel stärker ab. Genau zwischen dem Spulenpaar ist das Feld auch sehr schön homogen, allerdings liegt der gemessene Wert 9.2% über dem theoretisch erwarteten Wert.

Aus den gemessenen Werten im Bereich der Homogenität und aus den theoretischen Werten kann nun wieder μ_0 bestimmt werden. Wir berechneten

den folgenden Mittelwert mit Standardabweichung:

$$\mu_0 = (1.2980 \pm 0.1287) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am.}$$

4.5 Bestimmung der Influenzkonstanten μ_0

Es soll nun die Influenzkonstante μ_0 aus der Messung mit unterschiedlichen Stromstärken bestimmt werden.

Dazu kann jeweils wieder aus Gleichung (6) das gemessene Magnetfeld B bestimmt und mit der erwarteten magnetischen Erregung

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

verglichen werden [siehe wieder 2.7]. Dabei ist N die Windungszahl und L die Länge der jeweiligen Spule und I ist die verwendete Stromstärke.

Für beide verwendeten Spulen haben wir den Mittelwert mit Standardabweichung berechnet:

Spule	Influenzkonstante μ_0
Lange Spule	$(1.1982 \pm 0.0203) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Kurze Spule	$(1.0693 \pm 0.1281) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$

5 Diskussion

Teilweise wurden Vergleiche und Beobachtungen schon in der Auswertung beschrieben, sodass hier nur noch einige allgemeinen Fehlerquellen erwähnt werden sollen.

Für die Messungen mit der Induktionsspule haben wir sehr alte Steckwiderstände verwendet. Die eingestellten Werte dieser Widerstände wichen teilweise leicht von den Werten ab, die wir jeweils mit dem Multimeter gemessen hatten. In unserer Auswertung haben wir trotzdem mit den theoretischen Werten gerechnet.

Zwei weitere mögliche Fehlerquellen sind die Skala des Galvanometers und die Abstand des Helmholtzspulenpaares. Die Skala war für einige Messungen zu klein, sodass wir bei Messungen mit großen Galvanometerauslägen die Skala durch ein Lineal erweitern mussten und somit war der Wert schlechter einzuschätzen. Der Abstand des Helmholtzspulenpaares war auch nicht angegeben, sondern musste gemessen werden. Dazu verwendeten wir den Abstand von den Mitten der jeweiligen Wicklungen.

Vergleich der Werte für die Influenzkonstante μ_0

Die folgende Tabelle zeigt noch einmal alle berechneten Werte für die Influenzkonstante μ_0 :

Spule [Messmethode]	Influenzkonstante μ_0
Lange Spule [Induktionsspule]	$(1.2367 \pm 0.0479) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Lange Spule [Hallsonde]	$(1.2048 \pm 0.0841) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Lange Spule [Stromstärke]	$(1.1982 \pm 0.0203) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Kurze Spule [Stromstärke]	$(1.0693 \pm 0.1281) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Kurze Spule [Hallsonde]	$(1.1276 \pm 0.1125) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$
Helmholtzspule [Hallsonde]	$(1.2980 \pm 0.1287) \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$

Der Literaturwert liegt bei²

$$\mu_0 = 1.2566371 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am.}$$

Den genauesten Wert lieferte somit die lange Luftspule bei der Messung mit der Induktionsspule. Hier liegt der berechnete Wert sehr nah am exakten Literaturwert und auch die Standardabweichung ist mit am kleinsten. Bis auf die Messung mit unterschiedlichen Stromstärken sind jedoch auch alle anderen Werte gute Ergebnisse, der wahre Wert liegt hier überall im Fehlerbalken.

Eigene Kommentare

[Versuch etwas monoton, dafür war die Auswertung der Hammer. Mit den vorbereiteten Formeln hat das ganze keine vier Stunden gedauert. ... Naja, dann noch mal 40 Minuten für die dumme zusätzliche Berechnung von μ_0 . Absoluter Rekord für mich bisher, Hauke kennt das ja schon :). Antwort auf Haukes Kommentar: Ich finde den Versuch nicht überflüssig, auch mal ein kurzer Versuch sollte dabei sein, wir können ja nix dafür, dass wir die schweren Versuche schon hinter uns haben. Außerdem messen wir in Versuch 16 das Magnetfeld auf einer ganz anderen Achse aus.]_{Daniel}

[Ich habe noch nie für eine Auswertung weniger als vier Stunden gebraucht und habe keine Ahnung, wovon Daniel spricht. Der Versuch war allerdings wirklich ein wenig langweilig. Die verwendeten Messmethoden waren uns schon alle gekannt und das Magnetfeld von Spulen wird auch in Versuch 16 noch einmal ausgemessen. Diesen Versuch finde ich überflüssig. Man sollte besser einen anderen mit reinnehmen.]_{Hauke}

² Nach D. Meschede (2001): "Gerthsen Physik", 21. Auflage, Springer Verlag Berlin.