

# IE2

Modul Elektrizitätslehre

## Magnetfeld und Permeabilität des Vakuums

In diesem Experiment wird das magnetische Feld einer Spule ausgemessen. Aus den gewonnenen Daten kann die Permeabilität des Vakuums  $\mu_0$  bestimmt werden.

Dieser Versuch dient als elementare Einführung in die Grundlagen der Magnetostatik.



## Versuch IE2 - Magnetfeld und Permeabilität des Vakuums

In diesem Experiment wird das magnetische Feld einer Spule ausgemessen. Aus den gewonnenen Daten kann die Permeabilität des Vakuums  $\mu_0$  bestimmt werden.

Dieser Versuch dient als elementare Einführung in die Grundlagen der Magnetostatik.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Elektrische Felder werden durch elektrische Ladungen erzeugt. Was erzeugt jedoch magnetische Felder?
- Was sind die Gemeinsamkeiten und was die Unterschiede von elektrischen- und magnetischen Feldlinien?
- Warum gilt das Superpositions-Prinzip für elektrische und magnetischer Felder? (Hinweise: Es handelt sich um ein mathematisches Argument)
- Skizziere das magnetische Feld/magnetische Flussdichte eines Strom durchflossenen Leiters.
- Mit welchem physikalischen Gesetz kann man den Verlauf dieses Feldes bzw. dieser Flussdichte berechnen.
- Was versteht man unter der Permeabilität des Vakuums, und wie ist diese definiert?
- Wie lautet der Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte  $B$  und magnetischer Feldstärke  $H$  und welche Rolle spielt dabei die Permeabilität  $\mu$
- Was versteht man unter der magnetischen Suszeptibilität und wie hängt diese mit der Permeabilität zusammen?
- Was versteht man unter den Begriffen Ferromagnet, Diamagnet und Paramagnet und wie hängen diese Begriffe mit der Permeabilität zusammen.
- Was passiert wenn man einen Para- Dia- oder Ferromagneten in eine Spule einführt, wie sie in diesem Experiment verwendet wird. Wie verändert sich die magnetische Flussdichte?
- In welcher Beziehung zu einander stehen Ferro- und Paramagneten?
- Was versteht man unter dem Begriff Hysterese? Skizziere exemplarisch die Hysteresekurve eines Ferromagneten und beschrifte die vier charakteristischen Punkte dieser Kurve mit den entsprechenden Fachtermini.

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 Grundlagen der Magnetostatik

Im Allgemeinen werden magnetische Felder durch bewegte Ladungen erzeugt. Fließt ein stationärer Strom durch einen elektrischen Leiter, so erzeugt dieser ein stationäres magnetisches Feld, welches im Vakuum durch die sogenannte MAGNETISCHE FLUSSDICHTE  $\vec{B}$  charakterisiert ist. Betrachtet man hingegen magnetische Felder in Materie, so wird die charakterisierende Größe als MAGNETISCHE FELDESTÄRKE  $\vec{H}$  bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen ist durch die sogenannte PERMEABILITÄT gegeben, es gilt:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{B}}{\mu_r \mu_0} \quad (1.1)$$

Hierbei ist  $\mu_0$  die Permeabilität des Vakuums und wird auch als magnetische Feldkonstante bezeichnet.  $\mu_r$  ist die Permeabilitätszahl und im Gegensatz zu  $\mu_0$  handelt es sich nicht um eine Naturkonstante, sondern um eine Materialkonstante, welche gegebenenfalls von weiteren

Parameter wie etwa der Temperatur abhängen kann. Für verschiedene Materialien kann  $\mu_r$  sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Dies ist von essentieller Bedeutung für die Klassifizierung von magnetischen Materialien in Para-, Dia- und Ferromagneten. In diesem Versuch wird die magnetische Flussdichte einer Spule vermessen um anschliessend die Permeabilität des Vakuums zu bestimmen. Die magnetische Flussdichte hat die SI-Einheit Tesla:

$$[B] = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \quad (1.2)$$

Die Permeabilität des Vakuums ist definiert als:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \quad (1.3)$$

## 1.2.2 Das Gesetz von Biot-Savart

Im Experiment wird das Feld einer Kupferspule vermessen. Was erwartet man jedoch von theoretischer Seite von diesem Feld? In der Tat kann man das Feld bzw. die magnetische Flussdichte einer Spule berechnen. Im Allgemeinen kann die magnetische Flussdichte eines Strom durchflossenen Leiters beliebiger Geometrie mit dem GESETZ VON BIOT-SAVART berechnet werden. Im Falle eines konstanten, stationären Stroms lautet es:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1.4)$$

Dabei bezeichne  $I$  den Strom,  $d\vec{s}$  ist ein infinitesimales Wegelement, welches entlang der Richtung des Stromes zeigt, und  $\vec{r}$  ist die Ortskoordinate im Bezug auf einen frei wählbaren Ursprung (wird oft auch als Aufpunkt bezeichnet). Analytische Lösungen des Biot-Savart Gesetzes erhält man in der Regel nur bei sehr symmetrischen Leitergeometrien. Ist eine analytische Lösung nicht möglich, so muss die Lösung numerisch, d.h. mit Hilfe des Computers erfolgen. Im Fall einer langen, geraden Spule mit konstanter Windungszahl, erhält man folgende analytische Lösung

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{L} \quad (1.5)$$

wobei  $N$  die Anzahl der Windungen der Spule bezeichnet, und  $L$  die Länge derselbigen<sup>1</sup>. Wohlgemerkt gilt diese Formel für den Innenraum der betrachteten Spule. Im Inneren der Spule ist die magnetische Flussdichte somit homogen. In der Tat kann man solche Spulen verwenden, um relativ homogen Felder zu erzeugen. Es gibt jedoch noch bessere Geometrien um homogene magnetische Felder zu realisieren, z.B. die Helmholtz-Spule, welche in einem anderen Versuch des Praktikums zur Anwendung kommt.

Gemäss dieser theoretischen Vorhersagen ist also die resultierende magnetische Flussdichte proportional zum Strom  $I$ , welcher durch die Spule fliesst. Wohingegen die magnetische Flussdichte umgekehrt proportional zur Länge der Spule ist. Somit erwartet man für kürzere Spulen eine grössere Flussdichte, jedoch wird die verwendete Näherung bei der Herleitung obiger Formel für kürzere Spulen schlechter und es ist somit anzunehmen, dass für kurze Spulen die Formel 1.5 nicht mehr gültig ist. Dies sieht man auch daran, dass für unendliche, kleine Längen  $L$  die magnetische Flussdichte gemäss dieser Formel gegen unendlich divergiert.

Des weiteren ist obiger Formel auch zu entnehmen, dass die magnetische Flussdichte direkt proportional zur Anzahl der Windungen der Spule ist. Diese drei von dieser Formel vorhergesagten Abhängigkeiten werden im folgenden Experiment zu überprüfen sein.

---

<sup>1</sup>Die Berechnung dieser Formel setzt mathematische Kenntnisse voraus, welche im ersten Semester noch nicht vorhanden sind. Daher sei an dieser Stelle auf die Vorlesungen in Physik 2 bzw. Elektrodynamik verwiesen

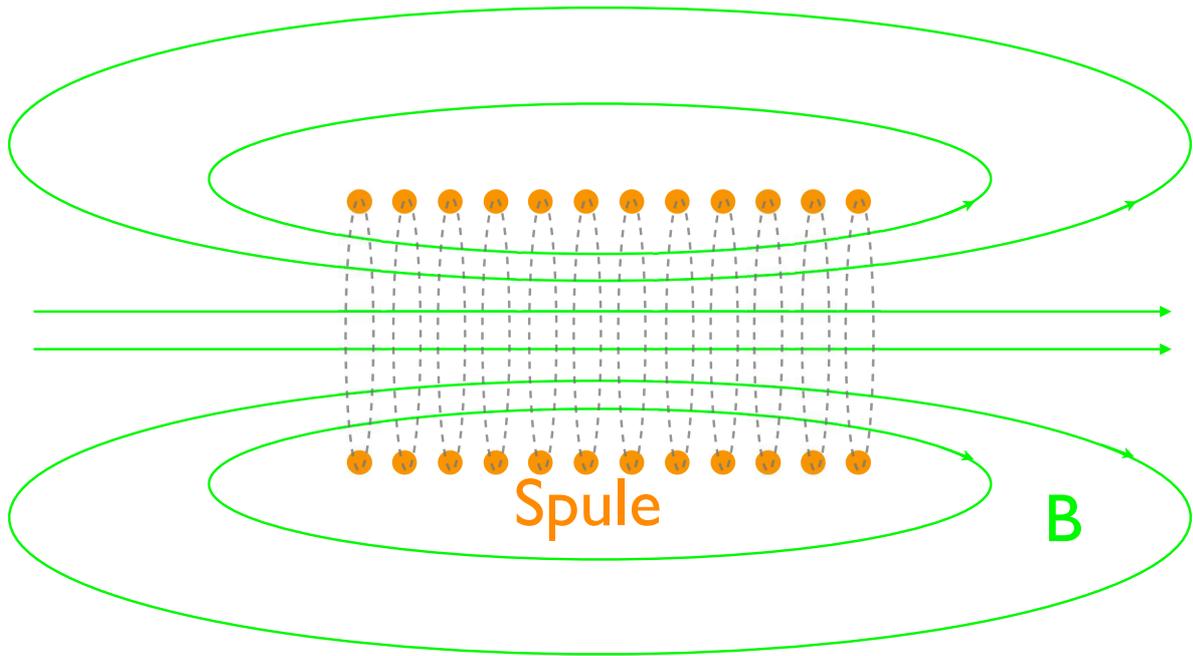


Abbildung 1.1: Diese Abbildung zeigt schematisch den Verlauf der magnetischen Flussdichte  $B$  für eine gerade Spule. Aufgrund des beschränkten Platzes sind einige Feldlinien nicht geschlossen dargestellt, obwohl alle Feldlinien geschlossen sein sollten.

### 1.3 Experiment

In diesem Experiment wird die magnetische Flussdichte einer geraden Kupferspule mit konstanter Windungszahl vermessen. Der Versuch wird im demontierten Zustand bereitstehen und die Praktikanten sollen die Apparatur gemäss dieser Anleitung aufbauen und justieren. Da bei diesem Versuch relativ hohe Stromstärken (bis zu 20A) zum Einsatz kommen, sind die Praktikanten hier besonders zu verantwortungsbewusstem Handeln angehalten. Grobes Fehlverhalten und die Gefährdung anderer Praktikanten bzw. Gefährdung seiner selbst kann zum Ausschluss aus dem Praktikum führen!

#### 1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Spule	1
Hochstromnetzgerät	1
Teslameter	1
Axiale B-Sonde	1
Verbindungskabel, 6-polig	1
Sockel, Ständer der Spule	1

#### 1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

Zu Beginn des Versuch muss zunächst die Spule an das Hochstromnetzgerät angeschlossen werden, dazu werden zwei Kabel benötigt. Anschliessend muss die B-Sonde auf dem entsprechenden Sockel befestigt und mit dem zugehörigen Teslameter verbunden werden. Zum Anschluss dient hier das 6-polige Kabel, welches am Versuchsaufbau bereit liegt. Da es sich um eine axiale B-Sonde handelt, muss diese möglichst parallel zur Symmetrieachse der Spule

ausgerichtet werden.

Nun können sowohl das Netzgerät, als auch das Teslameter eingeschaltet werden. Es ist darauf zu achten, dass das Teslameter mT anzeigt. Gegebenenfalls muss der Messbereich umgeschaltet werden. Sollte das Teslameter bereits etwas anzeigen, obwohl noch kein Strom durch die Spule fließt, kann das Teslameter manuell auf 0 gestellt werden. Dieser Vorgang muss zwischen den einzelnen Messreihen eventuell wiederholt werden, überprüfe daher immer vor jeder Messreihe, ob das Gerät solch einen Offset anzeigt. Bevor mit der eigentlichen Messung

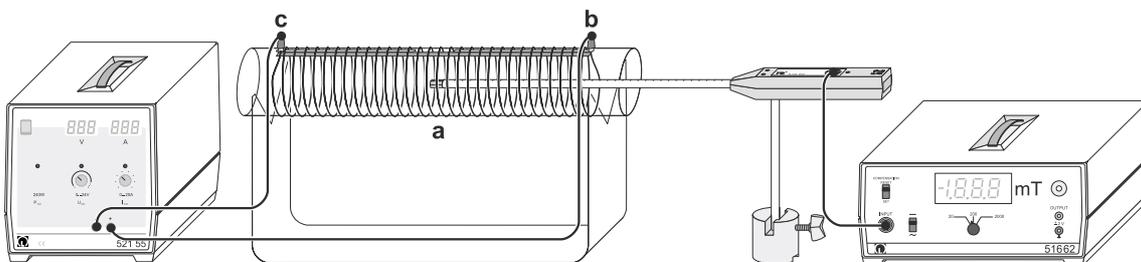


Abbildung 1.2: Diese Abbildung zeigt den Versuchsaufbau. In der Mitte ist die Spule zu sehen, samt der Anschlüsse a und b, sowie das Netzgerät (links). Auf der rechten Seite ist die B-Sonden und das zugehörige Teslameter zu erkennen, mit welchem die eigentlichen Messungen vorzunehmen sind. (Quelle: LD-Didaktik)

begonnen werden darf, ist der Versuchsaufbau dem entsprechenden Assistenten vorzuführen.

### 1.3.3 Versuchsdurchführung

- **Messung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Stromstärke I:** Richte für diese Messung die B-Sonde so aus, dass exakt in der Mitte der Spule gemessen wird. Stelle das Teslameter auf den Messbereich 20 mT. Variiere nun die Stromstärke in Schritten von 0.5 A, es sind jedoch mindestens 40 Messwerte aufzunehmen. Diese Messung ist für drei verschiedene Spulenlängen durchzuführen, z.B. a) 7 cm, b) 15 cm und c) 26 cm. Um die Länge der Spule zu variieren, muss das Netzgerät jeweils auf 0 gestellt und von der Spule getrennt werden! Die Windungszahl der Spule ist für alle drei Messreihen  $N = 30$ .  
Es kann bis maximal 20 A gemessen werden. Sollte die Stromstärke bereits bei einem kleineren Wert stagnieren, so ist eventuell die interne Strombegrenzung des Geräts eingeschaltet. In diesem Fall ist der zuständige Assistent zu konsultieren um diese zu entfernen. Nach dem eine Messreihe beendet ist, sollte erneut der Offset des Teslameters überprüft werden. Schätze sowohl für B als auch für I einen Fehler ab.
- **Messung von B als Funktion der Länge L:** Die Länge der Spule kann von 7 cm bis 27,5 cm variiert werden. Nimm bei maximaler Stromstärke und in der Mitte positionierter B-Sonde mindestens 10 Messwerte von B als Funktion der Länge L auf. Zwischen den einzelnen Messungen sollte immer wieder der Offset des Teslameters überprüft werden. Schätze sowohl für B als auch für L einen Fehler ab.
- Bei konstantem Strom und konstanter Spulenlänge kann nun die B-Sonde langsam aus dem Zentrum der Spule zum Rand der Spule hin verrückt werden. Beschreibe Deine

Beobachtungen und notiere die gemessenen Flussdichten  $B$  als Funktion dieser Auslenkung auf einem Blatt Papier. (Es sind min. 15 Messwerte aufzunehmen)

### 1.3.4 Aufgaben zur Auswertung

- **B als Funktion von I:** Stelle Deine Messungen in einen  $B(I)$  Graphen dar. Die abgeschätzten Fehler sind als Fehlerbalken an die Daten anzufügen. Fitte eine benutzerdefinierte Gerade an diesen Datensatz. Die Steigung dieser Geraden ist proportional zu  $\mu_0$ , und weil alle weiteren auftretenden Grössen bekannt sind, lässt sich  $\mu_0$  direkt als Parameter des Fits bestimmen. Führe anschliessend eine Fehlerfortpflanzung durch. Vergleiche die so gewonnenen Werte für  $\mu_0$  mit einander. Wie erklärst Du Dir eventuell auftretende Unterschiede? Welches Ergebnis ist Deiner Meinung nach präziser? Vergleiche beide Werte auch mit dem oben angegebenen Literaturwert von  $\mu_0$
- **B als Funktion von L:** Erneut ist ein  $B(L)$  Graph samt Fehlerbalken zu erstellen. Gemäss Gleichung 1.5 sollte  $B \approx 1/L$  gelten, daher ist nun die Funktion  $f(x) = a/x$  an die Daten zu fitten, wobei  $a$  ein konstanter Faktor ist. Dieser konstante Faktor kann mit Hilfe von Gleichung 1.5 berechnet werden. Vergleiche den theoretischen Wert mit dem Ergebnis des Fits Deiner Daten. Treten Abweichungen auf? Falls ja, in welchem Bereich und warum?  
Alternativ kann die so genannte Windungsdichte  $n = N/L$  definiert werden. Berechne die Windungsdichte für Deine Messdaten und trage nun  $B(n)$  in einem Graphen auf. Erneut ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Bestimme aus dieser Geraden erneut die Permeabilität des Vakuums.
- **B als Funktion der Position der B-Sonde:** Diskutiere Deine Ergebnisse, vor allem im Bezug auf die Erwartungen von theoretischer Seite. Stellst Du Abweichungen von der Modellvorstellung fest? Versuche anhand Deiner Daten den Verlauf der Betrages der magnetischen Flussdichte entlang der Spulenachse darzustellen.

## Literatur

- Demtröder Band 2 - *Elektrizität und Optik*, 6. Auflage: Abschnitt 3.2 und 3.5
- *Gerthsen Physik*, 22. Auflage oder neuer: Abschnitt 7.3.1+7.3.2 sowie Abschnitt 7.5.1-7.5.4 (Für die Beantwortung der Fragen zur Vorbereitung)