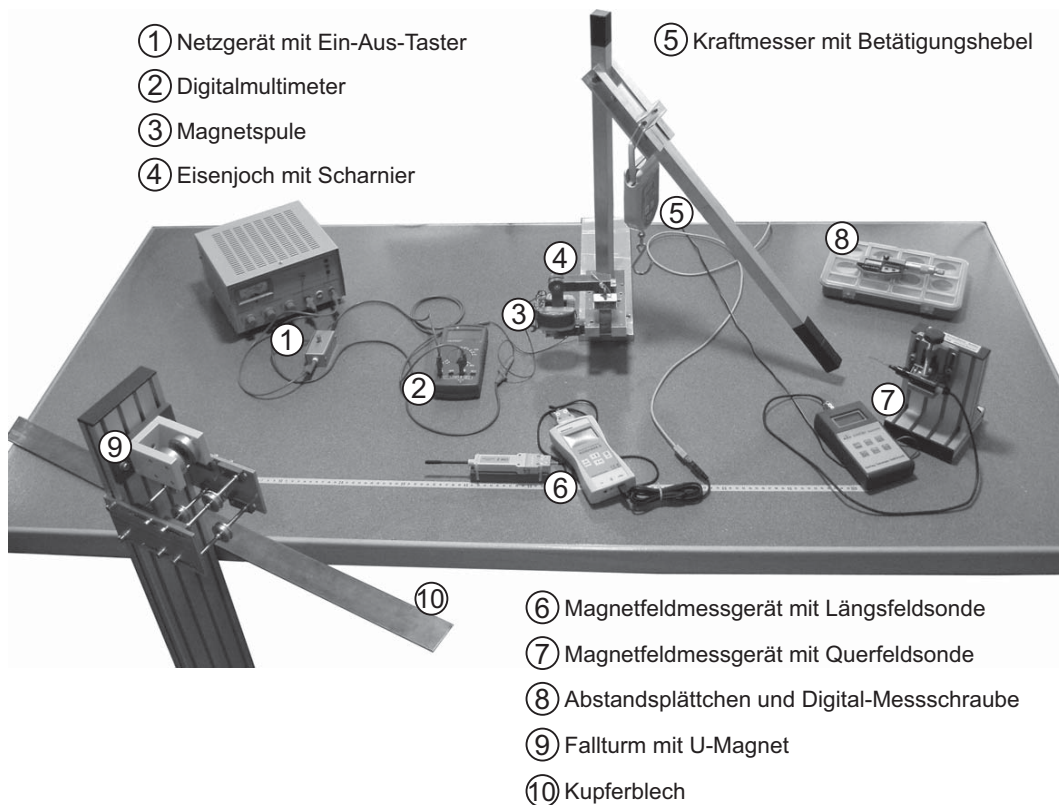


7 Magnetisches Feld und magnetische Kräfte

Magnetismus ist eine fundamentale Eigenschaft der Materie. So besitzen bereits die elementaren Teilchen wie z.B. das Elektron magnetische Momente. In der makroskopischen Welt kennen wir Magnetismus zum einen vom Magnetfeld der Erde, zum anderen aber auch von einer Vielzahl von technischen Anwendungen. Für diese ist unter anderem auch die magnetische Kraftwirkung relevant (z.B. bei Elektromotoren). Daher werden Sie im Rahmen dieses Versuchs neben der Messung von Magnetfeldern auch die damit verbundene Kraftwirkung kennen lernen.



7.1 Grundlagen

7.1.1 H- und B-Felder

Im Zusammenhang mit der Berechnung von Magnetfeldern wird üblicherweise mit \vec{H} - und \vec{B} -Feldern gearbeitet, wobei \vec{H} als magnetische Feldstärke¹ bezeichnet wird und \vec{B}

¹Die Bezeichnung von \vec{H} als magnetische Feldstärke hat einen historischen Hintergrund und ist eher unglücklich gewählt. In neueren Lehrbüchern wird z.T. im Gegensatz dazu das \vec{B} -Feld als magnetische Feldstärke und das \vec{H} -Feld als magnetische Erregung bezeichnet, was zutreffender ist.

als magnetische Flussdichte. Diese eventuell missverständliche Unterscheidung hat folgenden Hintergrund:

Das Feld, das eine physikalische Wirkung hervorruft und das dementsprechend als einziges messbar ist, ist stets die magnetische Flussdichte \vec{B} . Alle Formeln, die einen physikalischen Effekt durch das Magnetfeld beschreiben² beinhalten daher immer nur die Größe \vec{B} . Die Einführung des \vec{H} -Feldes ist nicht zwingend erforderlich, auch dann nicht, wenn magnetisierbare Materie im Spiel ist. So ergibt sich in diesem Fall das resultierende Gesamt- \vec{B} -Feld durch Überlagerung aller Teil- \vec{B} -Felder die z.B. durch einen makroskopischen Stromfluss und durch ausgerichtete (atomare) magnetische Momente erzeugt werden. Letztere kann man ebenfalls als (mikroskopische) Kreisströme auffassen. Falls es sich bei der magnetisierbaren Materie um einen makroskopische Körper handelt (z.B. einen Eisenkern in einer Spule), welcher ja eine sehr große Anzahl an atomaren magnetischen Momenten beinhaltet, ist jedoch die Betrachtung der mikroskopischen Verhältnisse oftmals nicht von Interesse. Man geht dann zu einer makroskopischen Betrachtung über, d.h. man betrachtet die Materie als homogenes Medium, welches, charakterisiert durch eine Materialkonstante, magnetisierbar ist. Es macht dann auch durchaus Sinn, zwischen einem von außen angelegten Magnetfeld (z.B. durch eine stromdurchflossene Spule) und einem durch Magnetisierung erzeugten Magnetfeld (z.B. in einem Eisenkern) zu unterscheiden. Man kann dann für das äußere, magnetisierenden Feld das \vec{H} -Feld einführen und bezeichnet das resultierende Gesamtfeld (das dann auch tatsächlich in Erscheinung tritt) als \vec{B} -Feld. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden auch wir diese Unterscheidung zwischen \vec{H} und \vec{B} verwenden.

Zunächst betrachten wir den einfachen Fall des materiefreien Raums (Vakuum). Da es dann keine Magnetisierung gibt sollte nach dem oben gesagten das \vec{B} -Feld und das \vec{H} -Feld den gleichen Wert haben. Dies ist, bis auf einen konstanten Umrechnungsfaktor, auch der Fall. Dieser Umrechnungsfaktor ist die *Induktionskonstante* μ_0 :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{im Vakuum}) \quad \text{mit} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}. \quad (7.1)$$

Beim Vorhandensein von Materie führt das \vec{H} -Feld zur Magnetisierung $\vec{M} = \chi \vec{H}$ und das \vec{B} Feld ergibt sich aus der Summe von magnetisierendem Feld und Magnetisierung:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0 \mu \vec{H} \quad \text{wobei} \quad \mu = 1 + \chi \quad (7.2)$$

Die Materialkonstante χ wird *magnetische Suszeptibilität* genannt und gibt an, mit welcher Magnetisierung ein Material auf ein äußeres Feld reagiert. Der Wert von χ kann dabei nicht nur positiv sondern auch negativ sein. μ ist die *Permeabilitätskonstante*. Abgesehen von ferromagnetischen Materialien (oder anderen exotischeren Materialien wie Supraleitern) liegt der Betrag der Suszeptibilität (je nach Material) in einem Bereich von ca. 10^{-6} bis 10^{-4} (bei Gasen auch noch deutlich darunter), d.h. die Permeabilität ist in sehr guter Näherung 1. Für magnetische Betrachtungen ist also der materiefreie Zustand bereits in sehr guter Näherung realisiert, wenn keine ferromagnetischen Stoffe anwesend sind. Hier kann einfach die Beziehung 7.1 für den materiefreien Fall verwendet werden. Von den verschiedenen Magnetisierungsmechanismen ist vor allem der bereits oben erwähnte *Ferromagnetismus* von Bedeutung. Beim Ferromagnetismus tritt eine sehr hohe (Anfangs-)Permeabilität auf (bei dem im Versuch verwendeten Eisenjoch ist $\mu \approx 1500$), was zu einer sehr großen Feldverstärkung führt. Derartige Materialien spielen in vielen technischen Anwendungen (Transformatoren, Elektromotoren, elektrische Generatoren,

²z.B. Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter, Lorentzkraft oder auch das Induktionsgesetz

...) eine zentrale Rolle. Allerdings ist beim Ferromagnetismus aufgrund der sich abspielenden mikroskopischen Vorgänge das magnetische Verhalten komplizierter. Die magnetische Suszeptibilität χ und damit auch die Permeabilität μ sind keine Konstanten des Materials sondern hängen ab vom magnetisierenden Feld \vec{H} und auch von der magnetischen Vorbehandlung des Materials. Das magnetische Verhalten erkennt man, wenn man die Magnetisierung M in Abhängigkeit der anliegenden Feldstärke H in ein Diagramm einzeichnet³. Es ergibt sich eine Hystereseschleife, die beim (Um-)Magnetisieren umlaufen wird (siehe Bild 7.1). Man erkennt, dass ab einem bestimmten, magnetisierenden H -Feld

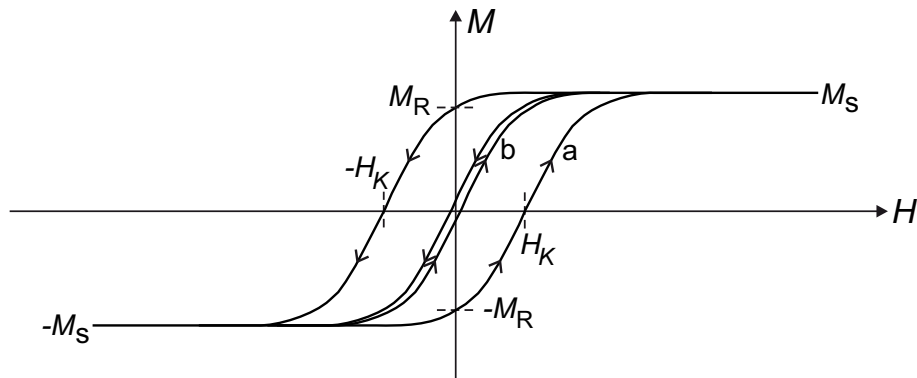


Abbildung 7.1: Die Hysteresekurven $M(H)$ eines harten (Kurve a, breite Schleife) und eines weichen (Kurve b, schmale Schleife) Ferromagneten. Für den harten Ferromagneten sind für beide (entgegengesetzte) Magnetisierungsrichtungen jeweils die Sättigungsmagnetisierung M_S , die remanente Magnetisierung M_R und die Koerzitivfeldstärke H_K markiert.

eine Sättigung der Magnetisierung eintritt. Außerdem bleibt nach Abschalten des H -Feldes (also für $H = 0$) eine mehr oder weniger große Restmagnetisierung (Remanenz) zurück. Um die Magnetisierung wieder auf Null zu bringen, muss ein entsprechendes H -Feld in Gegenrichtung (Koerzitivfeldstärke) angelegt werden. Durch die Materialzusammensetzung des Ferromagneten kann die Koerzitivfeldstärke in weiten Grenzen (bis über 7 Größenordnungen) verändert werden. Harte Ferromagneten besitzen eine große Koerzitivfeldstärke und werden als Dauermagneten verwendet. Gleichzeitig ist hier natürlich eine möglichst große Remanenz wünschenswert. Weiche Ferromagneten weisen eine kleine Koerzitivfeldstärke auf und sind leicht (mit geringem Energieaufwand) ummagnetisierbar. Solche Materialien finden z.B. als Transformator-Kerne Verwendung. Auch das Eisenjoch im Versuch ist ein weicher Ferromagnet.

7.1.2 Magnetfeld einer Spule

Magnetfelder können durch elektrische Ströme erzeugt werden. Um höhere Feldstärken zu erhalten, wird der Leiter dazu meist zu einer Spule gewickelt. Bei dem in diesem Abschnitt betrachteten Fall, dass die Spule keinen magnetisch aktiven Kern besitzt (wenn die Spule z.B. nur von Luft umgeben ist), kann das komplette Magnetfeld im ganzen Raum sehr genau mit Hilfe des Biot-Savart-Gesetzes berechnet werden. Wir beschränken uns hier aber auf das Magnetfeld entlang der Spulenachse, und zwar im Innenbereich der Spule und im Außenbereich bei genügend großem Abstand zur Spule.

³Oft ist auch $B(H)$ dargestellt. Wegen $\mu_0 M \gg \mu_0 H$ (also $B \approx \mu_0 M$) sind hier die $M(H)$ und die $B(H)$ Kurven aber praktisch nicht unterscheidbar.

1. Innenbereich:

Im Innenbereich einer langen Spule ist das Magnetfeld homogen und hat folgenden Wert:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} \quad (7.3)$$

mit I =Spulenstrom, N =Windungszahl und l =Spulenlänge. Für die im Versuch verwendete Spule ist dies jedoch keine gute Näherung mehr, da die Voraussetzung einer langen Spule nicht erfüllt ist. Für eine (kurze) Spule mit kreisförmigem Querschnitt (Radius r) erhält man stattdessen:

$$H = \frac{I \cdot N}{\sqrt{4r^2 + l^2}} \quad (7.4)$$

Die Daten unserer Versuchsspule sind: $N = 1560$, $l = 3,5$ cm, mittlere Querschnittsfläche (rechteckig) $A = 21$ cm². Um für die Versuchsspule mit rechteckförmiger Querschnittsfläche die obige Formel (näherungsweise) anwenden zu können, rechnen wir die Fläche A in den Radius r eines Kreises um, der den gleichen Flächeninhalt besitzt:

$$\pi r^2 = A \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{21 \text{ cm}^2}{\pi}} = 2,59 \text{ cm} \quad (7.5)$$

Für einen Strom $I = 1,0$ A erhalten wir gemäß Formel 7.4 im Innenbereich unserer Spule:

$$H = 2,50 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad \text{bzw.} \quad B = \mu_0 H = 3,14 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ T} \quad (7.6)$$

Die Einheit der magnetischen Flussdichte B ist das Tesla T ($1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$).

2. Außenbereich:

Bei genügend großem Abstand zur Spule (d.h. der Abstand ist deutlich größer als die Spulenabmessung) kann ihre Wirkung durch einen punktförmigen magnetischen Dipol (im Zentrum der Spule) beschrieben werden. Bei einer Spule mit N Windungen gilt für das magnetische Dipolmoment \vec{m} :

$$\vec{m} = I \cdot N \cdot \vec{A} \quad (7.7)$$

wobei der Vektor \vec{A} als Betrag den Flächeninhalt einer Windung hat und senkrecht auf der Windungsfläche steht. Im Falle hinreichenden Abstandes s zum Spulenzentrum ergibt sich dann entlang der Spulenachse (= Achse des Dipolmomentes) für das Magnetfeld $\vec{H}(s)$:

$$\vec{H}(s) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\vec{m}}{s^3} \quad (7.8)$$

Für den Betrag der Flussdichte $B(s)$ erhält man dann für unsere Spule (bei einem Strom $I = 1,0$ A):

$$B(s) = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot A \cdot N}{2\pi} \cdot \frac{1}{s^3} = 6,55 \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \left(\frac{\text{m}}{s}\right)^3 \quad (7.9)$$

(Hinweis zum letzten Ausdruck: Setzt man den Abstand s mit Einheit ein, so fällt das m (Meter) weg und es bleibt die korrekte Einheit T übrig.)

7.1.3 Magnetfeld im Eisenjoch einer Spule

Die magnetische Flussdichte kann gegenüber der leeren Spule drastisch gesteigert werden, indem ein möglichst geschlossenes Joch aus ferromagnetischem Material verwendet wird. Um allerdings das Magnetfeld in irgendeiner Form außerhalb des Jochs nutzen zu können, muss dieses einen entsprechenden Luftspalt aufweisen.

Grundsätzlich wird die genaue Berechnung des Magnetfeldes durch ein Joch (das zudem bestimmte geometrische Randbedingungen mitbringt) wesentlich schwieriger. Für praktische Anordnungen ist dies nur noch mit numerischen Methoden möglich. Um die Flussdichte im Joch trotzdem abschätzen zu können, kann folgender Formalismus angewandt werden:

N Spulenwindungen, die vom Strom der Stärke I durchflossen werden, erzeugen eine magnetische Spannung $U_m = I \cdot N$. Die Einheit der magnetischen Spannung ist das Ampere A. Der gesamte magnetische Kreis (in unserem Fall Eisenjoch und Luftspalt) besitzt einen magnetischen Widerstand R_m . Bei der Berechnung von R_m können jeweils Bereiche mit gleicher Permeabilität μ zusammengefasst werden. Das Eisenjoch allein mit der Länge l_{Eisen} und der Querschnittsfläche A_{Eisen} erzeugt folgenden Teilwiderstand:

$$R_{m,\text{Eisen}} = \frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}} \cdot \mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}} \quad (7.10)$$

Ein Luftspalt der Länge l_{Luft} ruft folgenden Teilwiderstand hervor:

$$R_{m,\text{Luft}} = \frac{l_{\text{Luft}}}{\mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}} \quad (7.11)$$

Voraussetzung für die letzte Beziehung ist, dass der Luftspalt klein ist verglichen mit den Querabmessungen des Joches. In diesem Fall ist die laterale Verbreiterung des Feldverlaufs (Streifeld) im Luftspalt vernachlässigbar und die Querschnittsfläche des Luftspalts ist näherungsweise gleich derjenigen des Eisenjoches.

Eisenjoch und Luftspalt werden in Reihe vom magnetischen Fluss durchsetzt, die Teilwiderstände addieren sich zum Gesamtwiderstand:

$$R_m = R_{m,\text{Eisen}} + R_{m,\text{Luft}} = \frac{1}{\mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}} \cdot \left(\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + l_{\text{Luft}} \right) \quad (7.12)$$

Der Quotient aus magnetischer Spannung und magnetischem Widerstand liefert (in Analogie zum Ohmschen Gesetz beim elektrischen Stromfluss) den magnetischen Fluss ϕ_m :

$$\phi_m = \frac{U_m}{R_m} = \frac{I \cdot N \cdot \mu_0 \cdot A_{\text{Eisen}}}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + l_{\text{Luft}}} \quad (7.13)$$

(Der magnetische Fluss mit der Einheit Weber ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$) ist das Integral der magnetischen Flussdichte B über die Fläche, die von der Flussdichte durchsetzt wird.)

Unter der Annahme, dass sich der magnetische Fluss homogen über die Querschnittsfläche des Joches verteilt, erhält man dann für die Flussdichte sowohl im Joch wie auch im Luftspalt⁴:

$$B = \frac{\phi_m}{A_{\text{Eisen}}} = \frac{I \cdot N \cdot \mu_0}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + l_{\text{Luft}}} = \frac{I \cdot N \cdot \mu_0}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + d_0 + d} \quad (7.14)$$

Das hier verwendete Eisenjoch hat eine Länge von $l_{\text{Eisen}} = 34 \text{ cm}$. Der Luftspalt kann weiter unterteilt werden in einen unvermeidbaren, konstruktionsbedingten (Luft-)Spalt d_0 am Scharnier sowie an den Lötstellen des Joches und in den einstellbaren Arbeits-Luftspalt d .

⁴Das B -Feld ist ein quellenfreies Feld, d.h. es gibt keine magnetischen Monopole. (Im Gegensatz zu elektrischen Monopolen, den elektrischen Ladungen.) Dies bedeutet, dass der magnetische Fluss ohne Änderung vom Eisen in den Luftspalt übertritt.

7.1.4 Magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs

Durch Magnetfelder werden Kräfte ausgeübt. Ursache der Magnetfelder sind, wie bereits beschrieben, elektrische Ströme. Diese Ströme können makroskopische Ströme im gewickelten Draht einer Spule oder ausgerichtete atomare Dipolmomente sein. Ob die Kräfte zwischen den fließenden Strömen anziehend oder abstoßend sind, hängt von den Flussrichtungen zueinander ab. Parallele Ströme ziehen sich an, antiparallele Ströme (d.h. die elektrischen Leiter liegen parallel zueinander, aber die Ströme darin laufen entgegengesetzt) stoßen sich ab. So ziehen sich z.B. bei einer stromdurchflossenen Spule die einzelnen Windungen entlang der Spulenchse gegenseitig an. Nimmt man zwei Dauermagneten und nähert diese in der Weise, dass in benachbarten Teilen die mikroskopischen Kreisströme in gleicher Orientierung fließen, so ziehen sich die beiden Magneten an. Vor allem im Zusammenhang mit Dauermagneten wird häufig die Nomenklatur des magnetischen Nord- bzw. Südpols gebraucht. Die magnetischen Pole (die nicht der Ursprung von Feldlinien sind) geben lediglich an, wie die Feldlinien bzw. die erzeugenden Ströme im Randgebiet des Magneten (oder auch der Spule) orientiert sind. Hier gilt die Regel, dass sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige Pole anziehen.

Auch bei dem im vorigen Kapitel bereits behandelten Eisenjoch tritt eine magnetische Kraft auf. Im Luftspalt wirkt dabei eine anziehende Kraft auf die beiden Spaltflächen. Um diese Kraft zu berechnen bietet sich hier eine Betrachtung an, die den Energieinhalt des Magnetfeldes im Luftspalt (Volumen V) zu Hilfe nimmt. Für die magnetische Feldenergie gilt:

$$E_m = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2 \cdot V = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2 \cdot A_{\text{Eisen}} \cdot d \quad (7.15)$$

mit der Querschnittsfläche des Eisenjoches A_{Eisen} und der Arbeits-Luftspaltbreite d . Die Kraft ergibt sich aus der Änderung dieser Energie mit der Spaltbreite d :

$$F_m = \left| -\frac{\partial E_m}{\partial d} \right| = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2 \cdot A_{\text{Eisen}} \quad (7.16)$$

Die magnetische Kraft F_m ergibt sich also direkt aus der Flussdichte B und der vom Feld durchsetzten Fläche A_{Eisen} .

Verwendet man nun noch den Ausdruck 7.14 für B , so kann die Kraft durch die Parameter der Erregerspule und des Joches beschrieben werden:

$$F_m = \frac{1}{2\mu_0} \cdot A_{\text{Eisen}} \cdot \left(\frac{I \cdot N \cdot \mu_0}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + d_0 + d} \right)^2 = \frac{A_{\text{Eisen}} \cdot \mu_0}{2} \cdot \left(\frac{I \cdot N}{\frac{l_{\text{Eisen}}}{\mu_{\text{Eisen}}} + d_0 + d} \right)^2 \quad (7.17)$$

7.1.5 Wirbelströme

Wir wollen nun noch ein interessantes, für technische Anwendungen⁵ nicht unwichtiges Phänomen betrachten, bei welchem ebenfalls magnetische Kräfte auftreten. Physikalisch müssen wir dazu eine Erweiterung zulassen, nämlich dass wir zeitlich veränderliche Magnetfelder bzw. sich bewegende Körper betrachten⁶. Als Folge davon treten Effekte der elektromagnetischen Induktion auf.

Konkret betrachten wir einen ausgedehnten, elektrisch leitfähigen Körper (ohne spezielle magnetische Eigenschaften), der sich durch ein inhomogenes Magnetfeld bewegt. Dadurch werden in diesem Körper elektrische Ströme induziert. Da der Strom in keine spezielle Geometrie gezwungen wird (wie z.B. bei einer Drahtschleife) sucht sich dieser sozusagen

⁵z.B. Wirbelstrombremse in Fahrzeugen, Heizung durch Wirbelströme bei Induktionskochfeldern

⁶Wir verlassen somit die Disziplin der bisher betrachteten *Magnetostatik*.

selbst seinen Weg, allerdings in Form von geschlossenen Strompfaden. Diese Form des Stromflusses wird als *Wirbelströme* bezeichnet. Diese Wirbelströme erzeugen nun ihrerseits ein Magnetfeld. Dabei tritt zwischen dem äußeren Feld und den Wirbelströmen eine Kraftwirkung auf, welche der Bewegung des Körpers entgegenwirkt. Die Entstehung der induzierten Wirbelströme und auch deren Orientierung kann man der Lenzschen Regel entnehmen, welche man kurzgefasst folgendermaßen formulieren kann:

Die induzierten Ströme fließen so, dass sie der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirken.

Eine quantitative Behandlung der Wirbelströme und der verursachten Kraftwirkung ist kompliziert und soll hier nicht betrachtet werden.

7.1.6 Messung von Magnetfeldern

Viele Geräte zur Vermessung von Magnetfeldern verwenden den sog. Hall-Effekt. Damit ist eine präzise Messung über viele Größenordnungen der Stärke des Magnetfeldes bei kompakten Sondengeometrien möglich. Der dem Hall-Effekt zu Grunde liegende physikalische Prozess ist die Kraftwirkung auf einen sich bewegenden Ladungsträger (Geschwindigkeit \vec{v} , Ladung q) im Magnetfeld, die sog. Lorentz-Kraft:

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7.18)$$

Diese Kraft steht senkrecht zur Richtung der Geschwindigkeit und senkrecht zum Magnetfeld, sie verschwindet, wenn sich die Ladung in Richtung des Magnetfeldes bewegt. Als Hall-Sonde wird ein dünnes Plättchen eines geeigneten Materials (hohe Ladungsträgerbeweglichkeit, z.B. Halbleitermaterial) verwendet, welches in einer Richtung von einer definierten elektrischen Stromstärke I_{Hall} durchflossen wird. Liegt nun senkrecht zur

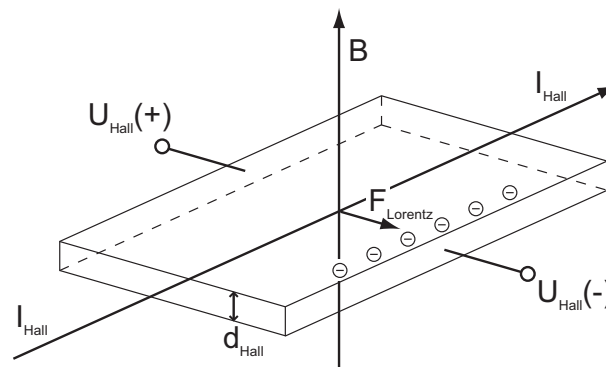


Abbildung 7.2: Funktionsweise einer Hallsonde

Plättchenfläche ein Magnetfeld \vec{B} (siehe Abbildung 7.2), so werden die Ladungsträger auf eine Seite abgelenkt und es entsteht eine Hallspannung U_{Hall} senkrecht zur Flussrichtung des Stroms:

$$U_{\text{Hall}} = \frac{I_{\text{Hall}} \cdot B}{n \cdot e \cdot d_{\text{Hall}}} \quad (7.19)$$

mit n = Ladungsträgerdichte, e = Elementarladung und d_{Hall} = Plättchendicke der Hall-Sonde. Durch Auswertung der Hall-Spannung kann (nach entsprechender Eichung des Geräts) die Flussdichte B ermittelt werden. Während der Messung ist auf die Richtung von \vec{B} relativ zum Hall-Plättchen zu achten. Im vorliegenden Versuch werden kommerzielle Hall-Magnetfeld-Messgeräte verwendet, die auf dem Display bereits den Magnetfeld-Wert in T bzw. mT ausgeben.

7.2 Versuchsdurchführung

7.2.1 Hinweise zu den (Mess-)Geräten

- Gehen Sie bitte sorgfältig mit den Magnetfeldmessgeräten um. Die Hallsonden sind sehr empfindlich (und auch teuer). Vor allem die Querfeldsonde mit der flachen Spitze darf nicht gequetscht werden.
- Betätigen Sie die Mikrometer-Messschraube (v.a. beim Hineinschrauben bzw. beim Antasten am Objekt) nur an der Ratsche. Dadurch wird beim Messen das Anzugs-Drehmoment definiert und die Messung wird genauer bzw. reproduzierbar. Außerdem ist die Messschraube dann vor Überlastung geschützt.
- Höhere Stromstärken (über 0,5 A) sollten nicht zu lange durch die Spule fließen, da diese sonst zu heiß werden kann. Überprüfen Sie bitte ab und zu die Spulentemperatur.

7.2.2 Messung des Feldes der Erregerspule

Zunächst soll das B-Feld einer stromdurchflossenen Spule ohne magnetisch aktiven Kern entlang der Spulenachse vermessen werden.

1. Montieren Sie dazu die Erregerspule vom Eisenjoch ab (linke Flügelmutter lösen und das Gelenkteil des Joches nach oben herausziehen) und legen Sie die Spule an den Anfang des Maßbandes, sodass die Spulenachse in Richtung des Maßbandes zeigt. Verkabeln Sie (falls nicht schon geschehen) die Spule mit dem Labornetzgerät (wegen der Freilaufdiode muss dabei die Polarität der Spule beachtet werden) und schleifen Sie das Multimeter als Strommessgerät in die Zuleitung ein. Schalten Sie außerdem das Strom-Ein-Aus-Tastkästchen in Serie zur Spule. Damit kann der Strom ohne Veränderung der Netzgeräteinstellung und ohne Ausstecken ein- bzw. ausgeschaltet werden.
2. Stellen Sie nun den Spulenstrom auf $I = 1,0\text{ A}$ ein (Taster muss dabei gedrückt sein). Schalten Sie das Magnetfeldmessgerät mit der Längsfeldsonde ein. Wenn Sie das Messgerät auf **Autorange** (siehe Bedienungsanleitung) stellen, wechselt dieses automatisch in den jeweils günstigsten Messbereich.
3. Messen Sie nun das Magnetfeld entlang der Spulenachse, beginnend im Spulenzentrum ($s = 0$) bis hin zu einem Abstand von ca. 0,5 m. (Bei der Wahl der Mess-Abstände können Sie sich an der Abstands-Achse des doppeltlogarithmischen Zeichenpapiers orientieren.) Führen Sie dabei an jeder Position eine Differenzmessung durch, indem Sie vom Magnetfeldwert für einen Strom von 1,0 A den Magnetfeldwert ohne Spulenstrom abziehen. (Achtung: Vorzeichen der Werte muss beachtet werden.) Dadurch erhalten Sie das von der Spule erzeugte Netto-Feld, andere Felder (z.B. das Erdmagnetfeld) fallen dann automatisch heraus. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei großen Abständen absolut unerlässlich um brauchbare Messwerte zu erhalten. Tragen Sie Ihre gemessenen $B(s)$ -Werte in das doppeltlogarithmische Zeichenpapier im Anhang ein.
4. In Kapitel 7.1.2 wurde das Feld im Spuleninneren sowie im (entfernteren) Außenbereich berechnet. Tragen Sie beide Rechenergebnisse in das Diagramm ein und vergleichen Sie dazu Ihre Messwerte. (Hinweis: Um den $1/s^3$ -Feldverlauf im Außenbereich einzuzeichnen genügen zwei Werte, z.B. bei $s = 5\text{ cm}$ und $s = 50\text{ cm}$.)

7.2.3 Messung des Feldes und der Kraft im Luftspalt des Eisenjoches

Bei diesem Versuch wird nun ein ferromagnetischer Spulenkern verwendet. Die Felder (und auch die wirkenden Kräfte) werden dadurch im Vergleich zum vorigen Versuch wesentlich erhöht.

1. Bauen Sie zunächst die Erregerspule ins Eisenjoch ein. Messen Sie mit der Messschraube die Dicke des Aluminiumplättchens, das die seitliche Aussparung besitzt. Schließen Sie mit eingelegtem Plättchen das Eisenjoch, so dass die beiden Querschnittsflächen des Jochs über die ganze Fläche auf dem Plättchen plan aufliegen. Dies können Sie über die Höheneinstellung (Flügelschraube links) erreichen. Führen Sie vorsichtig die Spitze der Quersfeldsonde in die Aussparung des Abstandsplättchens ein.
2. Messen Sie nun für verschiedene Spulenströme von $I = 0,0\text{ A}$ bis $I = 1,0\text{ A}$ in Schritten von $0,1\text{ A}$ die magnetische Flussdichte B im Luftspalt.
3. Entfernen Sie die Quersfeldsonde wieder. Hängen Sie nun stattdessen den Haken des Kraftmessers in die Schlaufe des beweglichen Joch-Oberteils ein. Schalten Sie den Kraftmesser ein und stellen Sie (falls nicht schon der Fall) die Betriebsweise auf **Peak-Hold** (siehe ausliegende Bedienungsanleitung). Dadurch wird immer der höchste Kraftwert für einige Sekunden gespeichert und angezeigt. Messen Sie nun für dieselben Spulenströme von vorhin die Kraft, mit der sich die Spaltflächen des Joches gegenseitig anziehen. Betätigen Sie den Hebel mit dem Kraftmesser nicht zu schnell oder ruckartig.
4. Tragen Sie Ihre Messergebnisse für die Flussdichte B und die Kraft F_m in die entsprechenden beiden Diagramme im Anhang ein. Gemäß Formel 7.16 sollte zwischen Magnetfeld B und Kraft F_m , die hier unabhängig voneinander gemessen wurden, ein einfacher Zusammenhang bestehen. Berechnen Sie nach dieser Formel für jeden gemessenen B -Wert die Kraft F_m und tragen Sie die so erhaltenen Werte zusätzlich zu den direkt gemessenen Kraftwerten an den entsprechenden Stellen im Kraft-Diagramm ein. (Hinweis zur Rechnung: Die Querschnittsfläche des Joches beträgt $A_{\text{Eisen}} = 4,0\text{ cm}^2$.) Sind die jeweiligen Kraft-Wertepaare konsistent?

7.2.4 Messung der Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite

In diesem Versuchsteil soll auf die Messung des Magnetfeldes verzichtet werden. Stattdessen messen wir nur die Anziehungskraft im Joch, wobei die Breite des Arbeits-Luftspaltes über einen größeren Bereich variiert werden soll.

1. Stellen Sie den Spulenstrom auf einen Wert von $I = 0,5\text{ A}$ ein. Dieser Strom wird im Folgenden konstant gehalten. (Bei höheren Stromstärken wird die Kraft bei kleinen Spaltbreiten zu groß.) Messen Sie nun für Spaltbreiten von ca. $0,01\text{ mm}$ bis 5 mm die Anziehungskraft im Joch. Verwenden Sie dazu die beim Versuch ausliegenden Folien- bzw. Blechstücke (bzw. Kombinationen davon) als Abstandshalter. Die Dicke soll jeweils mit der Mikrometer-Messschraube ermittelt werden. Achten Sie darauf, dass die Spaltflächen jeweils parallel zueinander aufliegen. Eventuell muss dies mehrfach nachjustiert werden. Verwenden Sie ausreichend viele Werte für die Abstände, damit ein systematischer Verlauf erkennbar wird (orientieren Sie sich wieder an der Abstands-Achse des doppeltlogarithmischen Zeichenpapiers).

2. Tragen Sie Ihre Messwerte in das doppeltlogarithmische Zeichenpapier am Ende des Anhangs ein. Können Sie das gemessene Verhalten mit Hilfe der Näherungsformel 7.17 erklären? (Keine Rechnung erforderlich)

7.2.5 Kraftwirkung aufgrund von Wirbelströmen

Für diesen Versuch verwenden wir den Fallturm mit dem U-Magneten und ein Kupferblech.

Achtung: Der U-Magnet, der aus einem Eisenjoch und zwei aufgesetzten Neodym-Dauermagneten besteht, erzeugt innerhalb der Polschuhe ein sehr starkes Magnetfeld. Halten Sie daher keine magnetempfindlichen Gegenstände in diesen Bereich, insbesondere keine Scheckkarten, Handys und auch Armbanduhr. Sie können sich von der Kraftwirkung des Magneten überzeugen indem Sie z.B. ein 5-Cent-Stück in seine Nähe bringen.

1. Messen Sie zunächst mit der Querfeldsonde die magnetische Flussdichte im Zentrum zwischen den Polschuhen. Ist dieser Wert größer oder kleiner als das stärkste Feld, das Sie im Spalt des Eisenjochs mit Spule bei Aufgabe 7.2.3 erzeugt haben? Nehmen Sie nun das Kupferblech und halten Sie es in den Polschuhspalt. Da das Blech "nichtmagnetisch"⁷ ist wirkt im statischen Fall auch keine spürbare Kraft.
2. Lassen Sie nun das Kupferblech durch die Polschuhe fallen. Was beobachten Sie? Versuchen Sie, das Blech wieder schnell nach oben herauszuziehen. Sie sollten dabei die bremsende Wirkung deutlich spüren können. Beim Hin- und Herbewegen fühlt es sich an als würde sich das Blech in einem zähen Medium befinden.
3. Nun soll die magnetische Wirkung der Wirbelströme genauer untersucht werden. Messen Sie dazu das Feld an der Oberfläche eines Polschuhs direkt am Eintritt (in Fallrichtung des Blechs gesehen) ohne fallendes Blech. Messen Sie dann das Feld, während das Kupferblech neben der Sonde durch den Spalt fällt. Versuchen Sie, die Position der Sonde während beider Messungen möglichst konstant zu halten. Wird das B -Feld durch die Wirbelströme größer oder kleiner? Wie groß ist die Änderung (in Prozent)? Wiederholen Sie diese Messung und Auswertung am Austritt der Polschuhe.
4. Überlegen Sie sich, wie die Kreisströme im fallenden Blech (relativ zum Magnetfeld des U-Magneten) fließen⁸ und machen Sie dazu eine Skizze in Ihr Protokollheft. Erklären Sie anhand der Skizze die bremsende Kraftwirkung.

⁷Genaugenommen ist Kupfer diamagnetisch mit einer Suszeptibilität $\chi = -9,6 \cdot 10^{-6}$.

⁸Stellen Sie sich dazu vor, dass Sie als Beobachter mit dem Blech durch den Magneten fallen und denken Sie dabei an die Lenzsche Regel.

