Technische Universität München

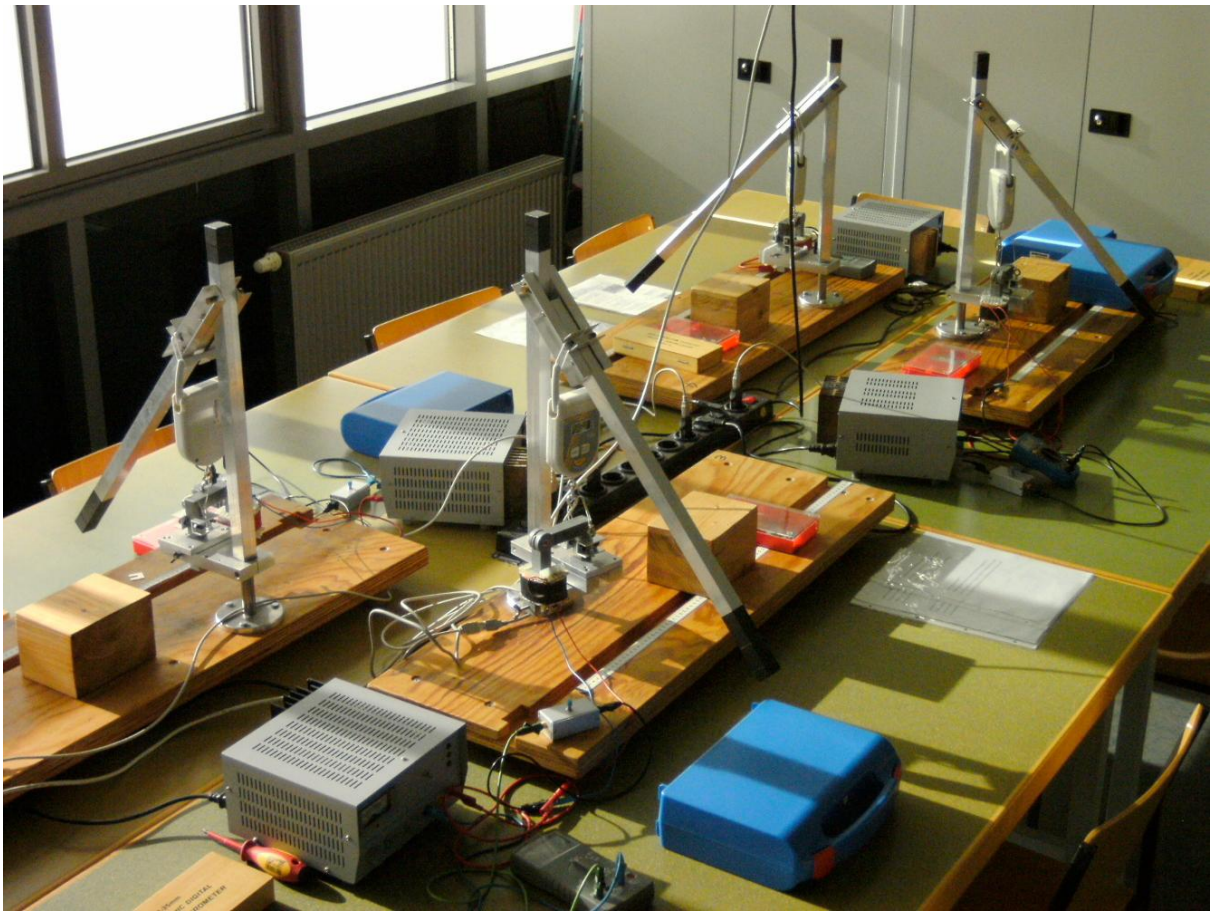
TUM School of Education

gefördert durch die Deutsche Telekom Stiftung

TUM Science Labs

Magnetismus – Magnetfelder und Ferromagnetismus

Versuch im Physikalischen Praktikum des Maschinenwesens-Gebäude



Schüler-Skript und Versuchsanleitung

Bearbeitet von: Sheila Sabock und Dr. Werner Lorbeer

Stand: 25.09.2013

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 3
1.1 Vorbereitung, Vorwissen, Vorüberlegungen 3
1.2 Der Ursprung magnetischer Felder 4
1.2.1 Das Dipolfeld eines Stabmagneten 4
1.2.2 Das Feld um einen stromführenden Leiter 4
1.2.3 Ferromagnetische Materialien für Dauermagneten 5
1.3 Messung von Magnetfeldern 5
2 Versuchsaufbau 6
3 Versuchsdurchführung 6
3.1 Magnetfeld der Erregerspule 7
3.1.1 Messung des Fernfeldes einer Erregerspule 7
3.1.2 Versuchsauswertung – funktionale Darstellung des Feldverlaufs 8
3.2 Magnetfeld im Luftspalt des Eisenjochs 8
3.2.1 Messung des Magnetfelds im Luftspalt eines Eisenjoches 8
3.2.2 Auswertung Magnetfeld und magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs 8
3.3 Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite 9
3.3.1 Versuch zum Zusammenhang von magnetischer Kraft und Abstand 9
3.3.2 Auswertung Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite 9

1 Einführung

Vorüberlegungen

1.1 Vorbereitung, Vorwissen, Vorüberlegungen

Magnetismus wird in ganz unterschiedlichen Zusammenhängen beobachtet und er hat nicht nur eine Ursache.

Welche magnetischen Phänomene sollen hier angegangen werden?

- Magnetismus, hervorgerufen von elektrischem Strom
- Magnetismus, hervorgerufen durch die quantenmagnetischen Eigenschaft von bestimmten Atomen in Festkörpern. Das sind dann Dauermagneten oder magnetisierbare Materialien in denen Eisen, Kobalt, Nickel oder Gadolinium enthalten ist.

Vorüberlegungen:

- Die Erde hat ein natürliches Magnetfeld. Wo liegen derzeit die Magnetpole? Welche Magnetfeldstärke wird in München für das Horizontalfeld bzw. das Vertikalfeld gemessen? Internetrecherche Stichwort „Magnetfeldstärke München“ Entnimm einer Zeichnung, welchen Winkel das Magnetfeld in München mit der Erdoberfläche bildet.
- Die einfachsten Feldtypen sind das Dipolfeld eines Stabmagneten (oder einer Magnetnadel) und das ringförmige Feld um einen geraden Leiter. Beide Feldtypen sollen qualitativ gezeichnet werden (Abbildung 2). Zeichne an einigen Punkten den Magnetfeldvektor ein.
- Handversuche mit einem kräftigen Eisennagel und einem Permanentmagneten (den Handversuch kann man auch in den TUM Science Labs machen):
    - Der Eisennagel wird durch überstreichen mit einem Permanentmagneten magnetisiert. Dann versuchen wir, mit dem Nagel Büroklammern zu angeln. Wie viele kann man untereinander hängen?
    - Bringe den Permanentmagneten mit dem Nagel in Kontakt bringen und den Versuch wiederholen. Ändert sich etwas?
- Das magnetische Feld einer langgestreckten Spule ist in ihrem Inneren homogen längs der Spule ausgerichtet und außen stark streuend (vgl. Abbildung 2). Die Spule wird in Ost-West-Richtung aufgebaut und eine Magnetnadel in der Mitte der Spule platziert. Dann schaltet man den Spulenstrom ein. Was ist zu beobachten? Wie kann man die Stärke des Spulenfeldes mit dem Erdmagnetfeld vergleichen?

Theoretisches Konzept

1.2 Der Ursprung magnetischer Felder

Magnetische Felder haben zwei wohl zu unterscheidende Ursachen.

Wenn man Strom durch einen Leiter schickt, dann entsteht rund um den Leiter sofort ein magnetisches Feld. Es besteht aus konzentrischen Ringen, die sich konzentrisch um den Leiter anordnen. Die Feldrichtung ergibt sich aus der „rechten Hand Regel“.

Völlig anderen Ursprung hat das magnetische Feld eines Festkörpers, wie beispielsweise des natürlich vorkommenden Magneteisensteins. Jedes darin enthaltene Eisen- Nickel- oder Kobalt Atom ist bereits ein magnetischer Dipol. Das magnetische Moment ist eine elementare Quanteneigenschaft dieser Atome, speziell der Elektronen in ihren Atomhüllen. Richtet man die vielen atomaren magnetischen Dipole durch ein äußeres Feld in eine Richtung aus, so wird das äußere Feld durch die atomaren Felder verstärkt. Gelingt es durch spezielle Materialmischungen, die Ausrichtung nach Entfernung des äußeren Feldes festzuhalten, so entsteht ein „Permanentmagnet“.

Abbildung 1 Magneteisenstein

1.2.1 Das Dipolfeld eines Stabmagneten

Die Abbildung 2 zeigt das magnetische Feld in der Umgebung eines Stabmagneten. Es wurde sichtbar gemacht, indem man feine Eisenspäne aufgestreut hat und diese sich in der charakteristischen Dipolfeldform anordneten. Das magnetische Dipolfeld eines ferromagnetischen Atoms darf man sich auf das Atomare verkleinert genau so vorstellen.

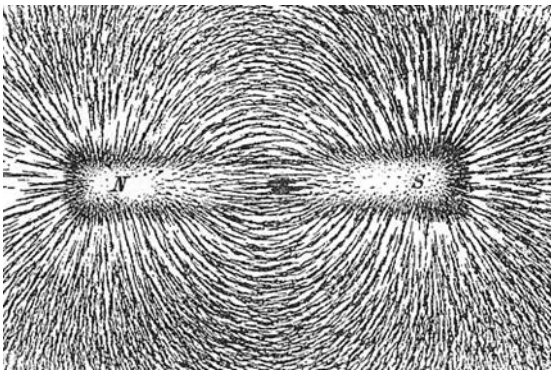


Abbildung 2 Dipolfeld eines Stabmagneten

Wir beobachten einen Nord- und einen Südpol und vereinbaren als Magnetfeldrichtung vom Nordpol zum Südpol.

Die Erde hat ebenfalls ein Magnetfeld, das im Moment eine Dipolform hat. Der magnetische Südpol liegt in der erdgeschichtlichen Jetztzeit nahe dem geographischen Nordpol. Aber im Laufe der Erdgeschichte ändert sich die Feldform und die Pole wandern über die ganze Erdoberfläche, was sogar zu einer Umpolung des Erdmagnetfeldes führen wird.

1.2.2 Das Feld um einen stromführenden Leiter

Bis zur Entdeckung von Oerstedt waren der Magnetismus und die Elektrizität zwei scheinbar voneinander völlig unabhängige Wissensgebiete. Im Jahre 1819 beobachtete Oerstedt die Ablenkung einer Kompassnadel auf seinem Experimentiertisch, als er Strom durch einen Draht schickte.

Oerstedt beobachtete, dass sich die Magnetnadel senkrecht zum stromführenden Leiter ausrichtete und

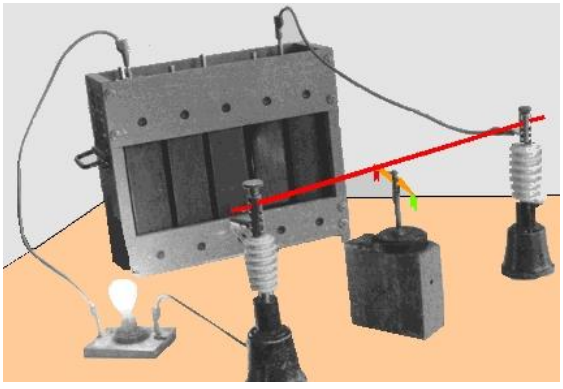


Abbildung 3 Oerstedtversuch Magnetfeld eines Leiters

dass sich die Ausrichtung der Nadel umkehrte, wenn die Stromrichtung umgekehrt wurde.

Magnetismus wird am einfachsten durch Kräfte nachgewiesen, die eine Magnetnadel aus ihrer natürlichen Nord-Süd-Ausrichtung ablenken. Die Kraft wird nicht durch direkten Kontakt von Körpern ausgeübt, sondern wirkt auch ohne materiellen Kontakt in die Ferne. Deshalb führt man einen theoretischen Begriff ein, den des Magnetfeldes – analog zum Gravitationsfeld.

Wenn man einen Draht zu einer Schleife windet, so entsteht bei Strom ein Feld senkrecht zur Schleife. N Schleifen bilden eine Längsspule, in deren Innerem sich ein homogenes Feld ausbildet und deren Feld außerhalb ein Dipolfeld ist. Außerhalb nimmt die Feldstärke rasch ab. Diese Abnahme wird im Versuch 3.2 gemessen.

1.2.3 Ferromagnetische Materialien für Dauermagneten

Eisen, Kobalt und Nickel sind Beispiele für Atome, die in speziellen Legierungen oder natürlichen Festkörpern vorkommen und diese zu Permanentmagneten machen können. Die Atome schließen sich in Festkörpern spontan zu magnetischen Bezirken zusammen. Sind diese sog. Weissschen Bezirke völlig ungeordnet, so ist der Festkörper dann nach außen hin nicht magnetisch. Wenn aber die magnetischen Bezirke durch anlegen äußerer Magnetfelder geordnet werden, so vergrößern sich die in die Richtung des äußeren Feldes weisenden Bezirke und der Körper wird zum „Magneten“. Das von außen her wirkende Magnetfeld wird also durch die Ausrichtung der Weissschen Bezirke verstärkt. Es kommt also zum erregenden Feld eine Magnetisierung dazu. Das magnetisierende Feld kann dadurch um ein 1000-faches verstärkt werden. Beide Felder überlagern sich zu einem resultierenden Feld des Festkörpers. Im Experiment 3.2 werden wir die Feldverstärkung durch die Magnetisierung eines Eisenkerns in der Spule untersuchen.

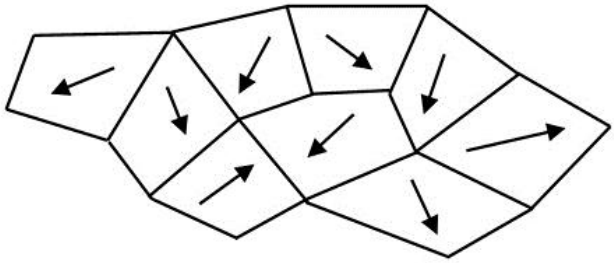


Abbildung 4 Weissdche Bezirke spontaner Magnetisierung

Mit dem Modell der dynamischen Weissschen Bezirke wird verständlich, wieso man Permanentmagneten durch Erhitzen oder durch heftige Erschütterungen „entmagnetisieren“ kann

Maßeinheiten für Magnetfelder

1.3 Messung von Magnetfeldern

Wo die Magnetfeldlinien am dichtesten sind, herrscht das stärkste Feld. Aber wie stark ist es?

Der Übergang zur messenden experimentellen Physik erfolgt durch die Einführung einer Messgröße.

Die Maßeinheit des Magnetfelds ist die „magnetische Flussdichte“, die mit B bezeichnet wird und die Einheit $[B] = 1\ Tesla$ hat.

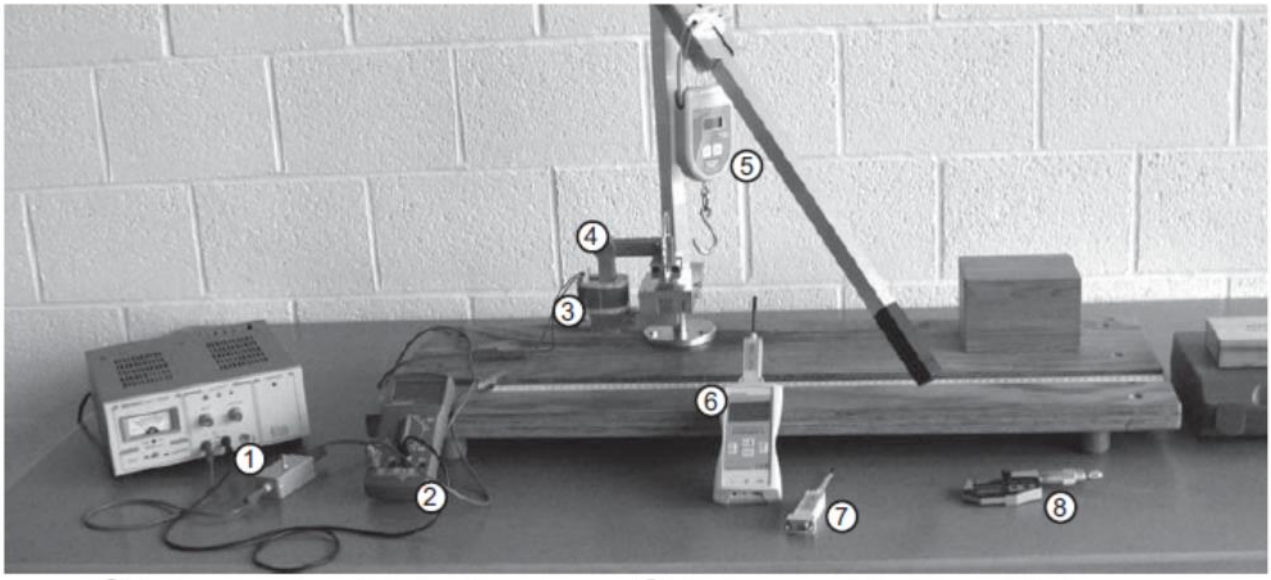
Das Messgerät zur Messung der magnetischen Flussdichte ist die Hallsonde . Mit der Sonde können die Messbereiche Tesla T, Millitesla mT und Mikrotesla µT durch Wahl auf dem Display erfasst werden.

Tabelle 1 Beispiele für Magnetfelder, gemessen in Tesla

$31\ \mu T$	Erdmagnetfeld am Äquator
$1\ T\ -\ 1{,}5\ T$	Flussdichte für typische Magneten
$1{,}61\ T$	maximale magnetische Flussdichte eines NdFeB-Magneten (Neodym-Eisen-Bor) derzeit stärkster Dauermagnet NdFeb-Magnet
$91{,}4\ T$	Die stärkste stetige magnetische Flussdichte, welche durch eine 200 kg Kupferspule erzeugt wurde. (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf)
$1.013\ T$	maximale physische magnetische Flussdichte eines Neutronensterns

2 Versuchsaufbau

Man sollte, ehe man loslegt, die Teile des Versuchsaufbaus identifizieren. Dabei soll die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** behilflich sein. Erst einschalten und Knebel drehen, wenn der Zweck des Gerätes bekannt ist. Bei der Inbetriebnahme eines Experiments geht man immer vorsichtig mit niedrigen Strömen voran und steigert unter Beobachtung der anderen Messinstrumente



① Labornetzgerät und Ein-Aus-Taster
② Multimeter
③ Magnetspule
④ Eisenjoch
⑤ Kraftmesser mit Betätigungshebel
⑥ Magnetfeldmessgerät (mit Längsfeldsonde)
⑦ Querfeldsonde
⑧ Mikrometer-Messschraube

Abbildung 5 Versuchsaufbau

die Stromstärke.

3 Versuchsdurchführung

In der Wissenschaft ist das Erstellen eines detaillierten Versuchsprotokolls sehr wichtig, denn es macht den Ablauf Ihrer Arbeit für eine spätere Auswertung nachvollziehbar.

Es gilt also mitzuschreiben und ein geordnetes Protokoll mit Versuchsanordnung und Messdaten zu erstellen. Der Ehrgeiz muss sein, alles am Experiment in jedem Detail zu verstehen.

Deshalb skizziert und fotografiert man zunächst den Versuchsaufbau, z.B. eine Schaltung und fertigt eine Schaltskizze an.

Last but not least: Die Messungen müssen sich wiederholen lassen. Die Messwerte müssen stimmen! Das ist ein wesentlicher Kern der experimentellen Wissenschaft.

Hinweise zu den Messgeräten

- Mit den Magnetfeldmessgeräten geht man sorgfältig um. Es gibt zwei Sonden. Die Querfeldsonde (rechteckig) verwendet man, wenn das Feld die Sonde senkrecht durchsetzt. Die Axialsonde (rund) verwendet man, wenn die Sonde parallel zum Feld eingesetzt werden muss. Vor allem die Querfeldsonde mit der flachen Spitze darf nicht gequetscht werden. Wähle immer durch umschalten am Gerät den angemessenen Messbereich, die Messungen sind ansonsten völlig falsch!
- Höhere Stromstärken (über $\mathbf{0,5}\ \boldsymbol{A}$) sollten nicht zu lange durch die Spule fließen, da diese sonst zu heiß werden kann. Ab und zu muss die Spulentemperatur überprüft werden.

3.1 Magnetfeld der Erregerspule

Versuch Messung eines Magnetfeldes

3.1.1 Messung des Fernfeldes einer Erregerspule

Zunächst soll die magnetische Flussdichte B einer stromdurchflossenen Spule ohne Eisenkern (Luftspule) entlang der Spulenachse vermessen werden. Montiere dazu die Erregerspule vom Eisenjoch ab und platziere sie in die hierfür vorgesehene Aussparung vorne links im Versuchsbrett. Die Spulenachse soll dabei parallel zum aufgeklebten Maßband liegen. Verkabele die Spule mit dem Labornetzgerät und schleife das Multimeter als Strommessgerät in die Zuleitung ein. Schalte außerdem das Strom-Ein-Aus-Tastkästchen in Serie zur Spule. Damit kann der Strom ohne Veränderung der Netzgeräteeinstellung und ohne Ausstecken ein- bzw. ausgeschaltet werden. Stelle nun den Spulenstrom auf $I = 1{,}0\ A$ ein. Stecke auf das Magnetfeldmessgerät die Längsfeldsonde (mit dem kleinen schwarzen Zylinder) und schalte das Gerät ein.

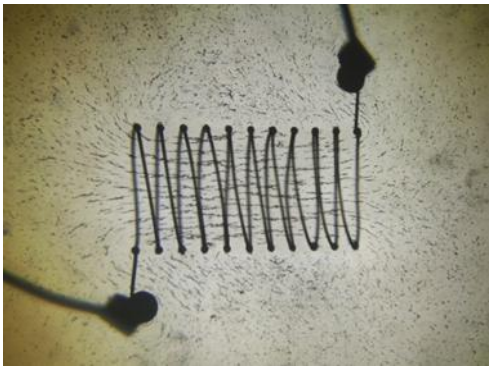


Abbildung 6 Homogenes Feld und Streufeld einer Spule

Messe nun die magnetische Flussdichte B entlang der Spulenachse, beginnend im Spulenzentrum $s = 0\ cm$ bis zu einem Abstand von ca. $0{,}5\ m$.

Der Messbereich muss günstig eingestellt sein! Das Magnetfeld nimmt sehr stark ab, weshalb mit wachsendem Abstand ein Bereichswechsel nötig wird!

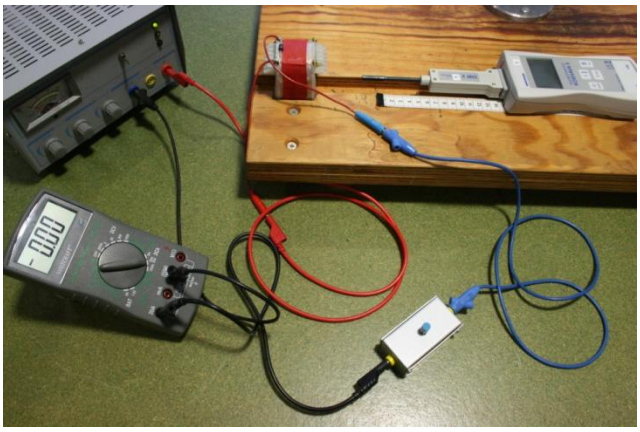


Abbildung 7 Versuchsaufbau Streufeldmessung

Achtung: Wie kann man den Einfluss störender Magnetfelder, beispielsweise des Erdmagnetfelds, beseitigen? Man führt an jeder Position eine Differenzmessung durch, indem man von der magnetischen Flussdichte B_1 gemessen mit Strom die magnetische Flussdichte B_0 ohne Spulenstrom

abzieht. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei großen Abständen absolut unerlässlich um brauchbare Messwerte zu erhalten. Trage die gemessenen $B(s)$-Werte in eine Tabelle ein.

3.1.2 Versuchsauswertung – funktionale Darstellung des Feldverlaufs

Die Messwerte für die Entfernung s und die magnetische Flussdichte B überträgt man in eine Tabelle und lässt sich daraus am Computer eine $s - B - Graphik$ erstellen. Die Kurve fällt sehr schnell ab. Wenn man beide Messwertreihen logarithmierst, dann sollten die Messwerte des Streufeldes etwa auf einer Geraden liegen. Passt es?

Versuch Messung eines ferromagnetisch verstärkten Feldes

3.2 Magnetfeld im Luftspalt des Eisenjochs

Bei diesem Versuch wird nun ein ferromagnetischer Spulenkern, ein Eisenjoch, verwendet. Das von der Spule erzeugte Feld wird durch die Magnetisierung des Eisenjochs verstärkt. Wir werden im Vergleich zum vorigen Versuch wesentlich erhöhte Feldstärken messen können.

3.2.1 Messung des Magnetfelds im Luftspalt eines Eisenjoches

Baue zunächst die Erregerspule ins Eisenjoch ein. Um einen definierten Arbeitsluftspalt zu erhalten werden die beiden unterschiedlich dicken Abstandsplättchen mit der Aussparung für die Querfeld-Hallsonde verwendet. Die Plättchendicke wird mit der Messschraube gemessen.

Dann wird das Eisenjoch mit eingelegtem Plättchen geschlossen, so dass die Spaltflächen parallel zueinander liegen. Dies kann über die Höheneinstellung (Flügelschraube links) erreicht werden. Dann steckt man die Querfeldsonde (flache rechteckige Sonde) auf das Messgerät auf und führt die Sonde in die Aussparung des Abstandsplättchens ein. Außerdem soll der Haken des Kraftmessers in die Schlaufe des beweglichen Joch-Oberteils eingehängt werden. Dann wird der Kraftmesser eingeschaltet und so eingestellt, dass der höchste Kraftwert höchste Kraftwert für einige Sekunden gespeichert und angezeigt.

Hinweis: Der Hebel mit dem Kraftmesser darf nicht zu schnell oder ruckartig betätigt werden.

Achtung: Nach jeder Kraftmessung (also bei hochgeklapptem Joch-Oberteil) muss der Spulenstrom ausgeschaltet werden, da sonst beim Zurückklappen aufgrund der magnetischen Anziehungskraft das Joch zuschnappt. Hier besteht die Gefahr, die Hallsonde zu beschädigen.

Für verschiedene Spulenströme misst man von $I = 0{,}0\ A$ bis $I = 1{,}0\ A$ in Schritten von $0{,}1\ A$ die magnetische Flussdichte im Luftspalt sowie die magnetische Kraft F_m, mit der sich die Spaltflächen des Jochs gegenseitig anziehen. Notiere sowohl diese Werte als auch die Dicke des verwendeten Abstandsplättchen in einer handschriftlichen Tabelle. Wiederhole die Messprozedur dieses Versuchsabschnitts für das andere Abstandsplättchen.

3.2.2 Auswertung Magnetfeld und magnetische Kraft im Luftspalt des Eisenjochs

Trage am Computer die Messergebnisse für die magnetische Flussdichte B und die magnetische Kraft F_m jeweils in ein $I - B - Diagramm$ und ein $I - F_m - Diagramm$ ein.

Vergleiche die gemessenen Werte für das Magnetfeld in diesem Versuch mit den höchsten Werten, die bei der Messung des Fernfelds der Luftspule bei einem Erregerstrom von $I = 1{,}0\ A$ erzielt wurden. Berechne den Quotienten aus den beiden Messwerten, um den Effekt der Magnetisierung zu beschreiben.

Versuch Magnetische Kraft im Spalt

3.3 Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite

Nun interessieren wir uns nur noch für die magnetischen Kräfte.

3.3.1 Versuch zum Zusammenhang von magnetischer Kraft und Abstand

Der Spulenstrom wird auf einen konstanten Wert von $I = 0{,}5\ A$ eingestellt. Für die Spaltbreiten von ca. $0{,}01\ mm$ bis $5\ mm$ soll die Anziehungskraft im Joch vermessen werden. Verwende dazu die beim Versuch ausliegenden Folien- bzw. Blechstücke als Abstandshalter. Die Dicke soll jeweils mit der Mikrometer-Messschraube ermittelt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Spaltflächen jeweils parallel zueinander aufliegen. Eventuell muss dies mehrfach nachjustiert werden. Notiere die Messwerte von d und F_m in einer Tabelle.

3.3.2 Auswertung Magnetische Kraft in Abhängigkeit der Spaltbreite

Tragen mit Hilfe des Computers die Messwerte in ein $d - F_m - Diagramm$ ein.

Kann man durch die Zusammenschau aller Messwerte ohne Experiment eine begründete Schätzung machen, welche Kraft für $d = 1{,}0\ mm$ bei $I = 1{,}0\ A$ zu erwarten wäre?