



UNIVERSITÄT REGENSBURG

Naturwissenschaftliche Fakultät II - **Physik**

Anleitung zum Anfängerpraktikum **B**

Versuch „*fm*“: Ferromagnetismus

4. Auflage 2019

**Dr. Stephan Giglberger**

**Marten Scheuck**

# Inhaltsverzeichnis

<b>fm Ferromagnetismus</b>	<b>3</b>
<i>fm.1</i> Lernziele . . . . .	3
<i>fm.2</i> Vorbereitung . . . . .	3
<i>fm.2.1</i> Literatur . . . . .	4
<i>fm.2.2</i> Theoretische Grundlagen . . . . .	4
<i>fm.2.3</i> Weiterführende Bemerkungen . . . . .	6
<i>fm.2.4</i> Prinzip der Messung von $\vec{B}$ und $\vec{H}$ . . . . .	7
<i>fm.2.5</i> Der magnetische Kreis . . . . .	9
<i>fm.2.6</i> Induktionsgesetz . . . . .	11
<i>fm.2.7</i> Hysterese . . . . .	13
<i>fm.3</i> Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung . . . . .	14
<i>fm.4</i> Versuchsdurchführung . . . . .	15
<i>fm.5</i> Aufgabenstellungen . . . . .	15
<i>fm.5.1</i> Test der Hallsonden mit Hilfe des Erdmagnetfelds . . . . .	15
<i>fm.5.2</i> Magnetfeld einer Luftspule . . . . .	16
<i>fm.5.3</i> Magnetfeld einer Spule mit geradem Eisenkern . . . . .	16
<i>fm.5.4</i> Ermittlung der Hysteresekurve eines Eisenkerns „von Hand“ . . . . .	16

# *fm* Ferromagnetismus



## *fm.1* Lernziele

Bei diesem Versuch sollen Sie die grundlegenden Phänomene kennenlernen und untersuchen, die in ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld auftreten. Insbesondere sollen dabei die Begriffe magnetische Flussdichte  $\vec{B}$ , magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  und Magnetisierung  $\vec{M}$  sowie deren Zusammenhang geübt und angewandt werden.

Mit der Hall-Sonde als Feldmessgerät werden Sie zunächst den Einfluss eines Eisenkerns auf das Magnetfeld einer Luftspule untersuchen und anschließend weitere magnetische Eigenschaften des Eisenkerns bestimmen, insbesondere sein Hystereseverhalten  $B(H)$ .

## *fm.2* Vorbereitung

Da der Stoff dieses Versuches von den Vorlesungen her teilweise noch nicht vertraut ist, sollten Sie sich an Hand der folgenden Begriffe intensiv auf die Gesetzmäßigkeiten und Phänomene des Ferromagnetismus vorbereiten:

- magnetische Flussdichte  $\vec{B}$ , magnetische Feldstärke  $\vec{H}$ , Magnetisierung  $\vec{M}$ , magnetischer (Kraft-) Fluss  $\Phi$ , Permeabilität  $\mu$ , Suszeptibilität  $\chi$ ,

- Ferromagnetismus, Hysteresis, Neukurve, Sättigungsfeldstärke, Sättigungsmagnetisierung, Koerzitivfeldstärke, Remanenz,
- Maxwellsche Gleichungen der Magnetostatik, Gaußscher und Stokesscher Satz, Induktionsgesetz, magnetische SI-Einheiten.

Zur Vorbereitung auf diesen Versuch sei auf die Literatur hingewiesen, einige wichtige Themen werden in Folgenden kurz wiederholt.

### ***fm.2.1* Literatur**

- Gerthsen, Kneser, Vogel : Physik (1997) 84 UC 156 G384 (19)
- Dransfeld, Kienle, Vonach, Physik II, Elektrodynamik 84 UC 174 D 764-2
- R. P. Feynman; Lectures on Physics II; 36, 37 (1987) 84 UC 163 F435 D4.987-2
- M. Bormann, Experimentalphysik, Bd. 2, Seiten 184 - 204 84 UC 177 B 735-2(7)
- R. Kories und H. Schmidt-Walter, Taschenbuch der Elektrotechnik: Grundlagen und Elektronik (H. Deutsch, 1998) Kapitel 2.3, Seiten 66 - 104
- Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, 84 UC 143 B499 2(7) Elektrizität und Magnetismus, 1987
- Kohlrausch, Praktische Physik, Band 2, Teubner 1996, 84 UC 100 K79(24)-2 Kap. 5 „Magnetismus“ (soweit nötig)
- Kneller, Ferromagnetismus 84 UP 6300 K 68

### ***fm.2.2* Theoretische Grundlagen**

Diesem Versuch werden die Maxwellschen Gleichungen der Magnetostatik im MKSA-System (SI-Einheiten) zugrunde gelegt:

Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  ist quellenfrei

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (fm.1)$$

Die Wirbel der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  sind die makroskopischen Ströme der Dichte  $\vec{j}$ :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (fm.2)$$

Die magnetischen Eigenschaften der Materie kann man durch die Magnetisierung  $\vec{M}$  darstellen, die sich mit der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  zur Flussdichte  $\vec{B}$  addiert:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (fm.3)$$

wobei  $\mu_0 := 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$  die Magnetische Feldkonstante ist.

$\vec{M}$  ist eine Funktion von  $\vec{H}$ :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (fm.4)$$

mit der magnetischen Suszeptibilität  $\chi$ .

Eine andere Beschreibung ist möglich mit der magnetischen Permeabilität  $\mu$  bzw. der relativen Permeabilität  $\mu_r$ :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (fm.5)$$

Für das Vakuum (bzw. in erster Näherung auch für Luft) ist  $\mu_r = 1$ , in ferromagnetischen Stoffen gilt dagegen  $\mu_r \gg 1$ . Zur Erzeugung einer bestimmten magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  reicht dann eine um den Faktor  $\mu_r$  kleinere Feldstärke  $\vec{H}$  als im Vakuum.

Es gilt

$$\mu_r = 1 + \chi, \quad (fm.6)$$

wobei  $\chi$  im Allgemeinen ein  $3 \times 3$ -Tensor ist. In unserem Falle wird aber nur der isotrope Fall behandelt.

Der Zusammenhang zwischen  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  bzw.  $\vec{M}$  und  $\vec{H}$  ist im allgemeinen nicht linear, d.h.  $\mu$  und  $\chi$  hängen selbst von  $\vec{H}$  ab. Es ist daher oft nützlich, die

$$\text{differentielle Permeabilität } \mu := \partial B / \partial H \quad (fm.7)$$

$$\text{differentielle Suszeptibilität } \chi := \partial M / \partial H \quad (fm.8)$$

zu betrachten.

Die Materialien werden ihren magnetischen Eigenschaften entsprechend eingeteilt:

	$\mu_r$	$\chi$
diamagnetisch	$0 < \dots < 1$	$-1 < \dots < 0$
paramagnetisch	$> 1$	$> 0$
ferromagnetisch	$\gg 1$	$\gg 1$
Vakuum	1	0

### fm.2.3 Weiterführende Bemerkungen

- Streng genommen kann die Magnetisierung nur in kugelförmigen bzw. ellipsenförmigen Proben homogen, d.h. unabhängig vom Ort, sein. Trotzdem kann man auch in Körpern, deren Form nur wenig von der eines Ellipsoids abweicht, in guter Näherung von einer homogenen Magnetisierung ausgehen.
- Meistens entsteht im Inneren ferromagnetischer Körper eine magnetische Domänenstruktur (Weiss'sche Bezirke). Die Größe einer Domäne beträgt oft nur einige Kubikmikrometer. Ist die Ausdehnung eines Körpers groß gegenüber der Ausdehnung der einzelnen Domänen, kann man ihn oft wie homogen magnetisiert betrachten (mit einer effektiven Magnetisierung, die kleiner ist als die innerhalb der einzelnen Domänen). Ist die Domänenkonfiguration derart beschaffen, dass sich die Magnetisierungen der einzelnen Domänen über makroskopische Volumina wegmitteln, verschwindet die effektive Magnetisierung und man spricht vom entmagnetisierten Zustand des ferromagnetischen Materials.
- Innerhalb jedes Weiss'schen Bezirks gibt es eine spontane Magnetisierung, d.h.  $\vec{M} = 0$  für  $\vec{H} = 0$ . Dafür ist also die Angabe einer Suszeptibilität nach der Definition  $\chi := M/H$  überhaupt nicht sinnvoll (sie wäre quasi unendlich). Die differenzielle Suszeptibilität  $\chi := \partial M / \partial H$  kann aber durchaus endlich sein.
- Durch magnetische Anisotropien (siehe F-Praktikum) kommt es zur magnetischen Hysterese. Daher ist bei ferromagnetischen Stoffen der Zusammenhang zwischen  $M$  und  $H$  nicht eindeutig, und somit ist auch die Angabe der Suszeptibilität  $\chi$  nicht eindeutig. Bei bestimmten magnetisch weichen ferromagnetischen Substanzen hat man jedoch nur eine vernachlässigbare Hystereseaufspaltung und die Funktion  $M(H)$  ist für hinreichend kleine Feldstärken  $H$  näherungsweise linear. Wenn in der Praxis  $\chi$ -Werte für ferromagnetische Substanzen angegeben werden, liegt meistens dieser Fall vor.
- Wenn die Magnetisierungsverteilung in endlich ausgedehnten Körpern so beschaffen ist, dass sich nicht alle Feldlinien im Inneren des Körpers schließen, entstehen an den Oberflächen magnetische Pole, die im Außenraum zu einem Streufeld führen. Im Inneren des Körpers wird von den Polen ebenfalls ein Magnetfeld verursacht, das der Magnetisierung entgegengerichtet ist und als entmagnetisierendes Feld bezeichnet wird. Dadurch ergibt sich im endlich ausgedehnten Körper eine etwas geringere Flussdichte als in einem unendlich ausgedehnten. Der Körper wird aber durch das entmagnetisierende Feld nicht vollständig entmagnetisiert.
- Oberhalb einer bestimmten Temperatur  $T_c$ , der sog. Curie-Temperatur, verhält sich ein ferromagnetisches Material paramagnetisch. Für Eisen ist  $T_c \approx 740^\circ\text{C}$ .

## fm.2.4 Prinzip der Messung von $\vec{B}$ und $\vec{H}$

Die direkte Messung der Felder  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  in festen Stoffen mittels einer makroskopischen Messsonde ist streng genommen natürlich nicht möglich. Misst man mit einer Feldsonde in Hohlräumen der ferromagnetischen Probe, so muss dabei gesichert sein, dass die Magnetisierungsverteilung (und damit der Feldverlauf in der Probe durch die Hohlräume) nur geringfügig gestört wird.

Die Maxwell'schen Gleichungen werden im folgenden auf einen schmalen „Querspalt“ und einen schmalen „Längsspalt“ angewandt (siehe Abb. fm.1). Mittels der nachfolgenden Theorie kann dann aus der Messung mit kalibrierten Hallsonden in diesen Spalten auf die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  und die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  im Material geschlossen werden.

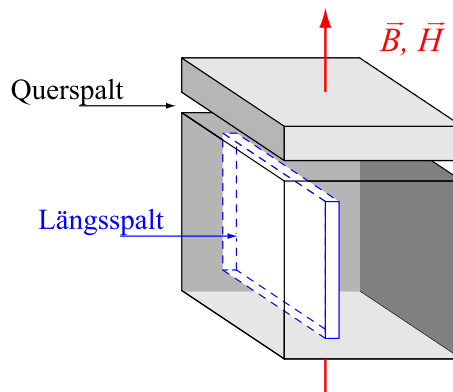


Abbildung fm.1: Beispiel für einen Längs- oder Querspalt in einem Stück Eisen

### Querspalt

Da  $\vec{B}$  quellen frei ist, gilt (unter Vernachlässigung von Streufeldern bzw. entmagnetisierenden Feldern) gemäß dem Gaußschen Satz:

$$0 = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} \, d^3 \vec{r} = \int_0 \vec{B} \cdot d\vec{f} \quad (fm.9)$$

Bei homogener Magnetisierung ist auch  $\vec{B}$  homogen, d.h. die Integrale über die Seitenflächen heben sich gegenseitig auf. Also gilt:

$$0 = \vec{B}_E \cdot \vec{F} - \vec{B}_L \cdot \vec{F} \quad (fm.10)$$

woraus folgt

$$\vec{B}_E = \vec{B}_L, \quad (fm.11)$$

wobei  $\vec{B}_E$  und  $\vec{B}_L$  die magnetischen Flussdichten im Eisen bzw. im Luftspalt sind.

Das  $B$ -Feld ist also stetig an der Grenzfläche, d.h. es durchdringt einen Querspalt in Materie ohne Änderung des Betrages. Die magnetische Flussdichte  $B_L$  im Querspalt kann mit einer „transversalen

Hallsonde“ gemessen werden. Diese Messung ergibt unmittelbar die Flussdichte  $B_E$  im Inneren des Eisens.

## Längsspalt

Hier verwenden wir die Gleichung

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (fm.12)$$

und integrieren, wieder unter Vernachlässigung von Streufeldern, über eine rechteckige Fläche, die teilweise in Luft und teilweise im Eisen verläuft. Da weder im Eisen noch im Spalt ein Strom fließt ( $\vec{j} = 0$ ), gilt:

$$0 = \int_F \vec{j} \cdot d\vec{f} = \int_F (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{f} = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \ell (\vec{H}_E - \vec{H}_L). \quad (fm.13)$$

Die Gleichheit zwischen dem Flächenintegral und dem Linienintegral ist durch den STOKESSchen Satz gegeben. Aus dem letzten Teil der Gleichung folgt:

$$\vec{H}_E = \vec{H}_L. \quad (fm.14)$$

$\vec{H}_E$  und  $\vec{H}_L$  sind die magnetischen Feldstärken im Eisen bzw. im Luftspalt. Die magnetische Feldstärke ist also im Längsspalt genauso groß wie im Eisen. Die magnetische Flussdichte  $B_L$  im Längsspalt kann mit der „longitudinalen Hallsonde“ gemessen werden, die magnetische Feldstärke  $H_E$  im Eisen folgt daraus gemäß

$$H_E = H_L = \frac{1}{\mu_0} B_L. \quad (fm.15)$$

Quer- und Längsspalt werden im Versuch durch einen variablen Spalt bzw. eine Bohrung in den Jochen des Experimentiertrafos näherungsweise verwirklicht (siehe Abb. fm.2).

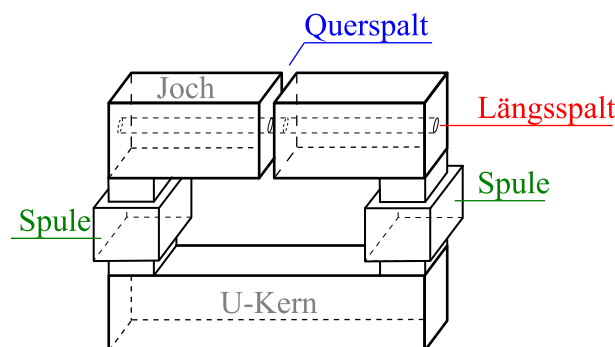


Abbildung fm.2: Experimentierspulen mit Eisenkern und Jochen



### fm.2.5 Der magnetische Kreis

Ein magnetischer Kreis sei aus  $k$  Elementen der Länge  $l_k$  mit den Querschnittsflächen  $f_k$  und den relativen Permeabilitäten  $\mu_k$  wie in Abb. fm.3 zusammengesetzt und es wird angenommen, dass näherungsweise kein Streufluss existiert, d.h. es gilt  $\phi_k = B_k f_k = \text{const.}$  für alle  $k$ . Dann hat man ähnliche Verhältnisse wie bei einem Stromkreis, in dem überall der gleiche Strom fließt. Die feldererzeugende Spule muss nicht unbedingt um alle Kerne gewickelt sein, sondern befindet sich, wie es in der Technik üblich ist, an einer Stelle, wo sie nicht stört.

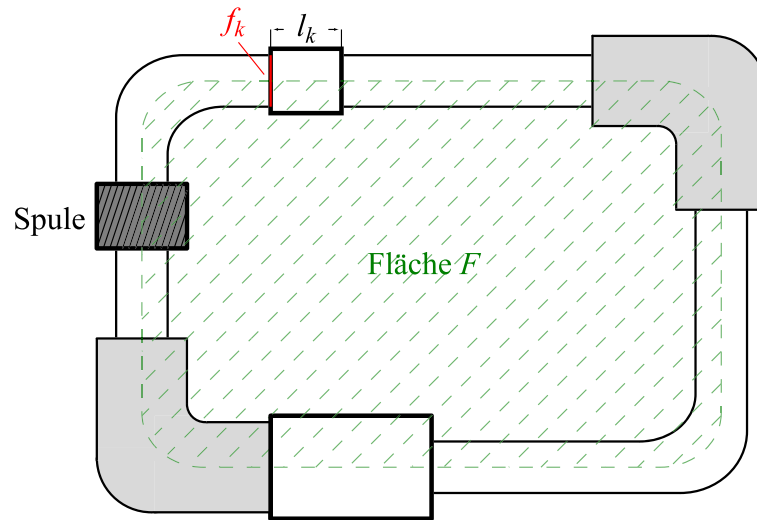


Abbildung fm.3: Schema eines magnetischen Kreises

Mit  $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}$  folgt durch Integration über die gestrichelte Fläche  $F$

$$\int_F (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{f} = \int_F \vec{j} \cdot d\vec{f}. \quad (fm.16)$$

Da  $\vec{j}$  in den Spulendrähten ungleich Null ist, erhält man auf der rechten Seite  $n \cdot I$  mit dem Spulenstrom  $I$  und der Windungszahl  $n$ . Auf der linken Seite wenden wir den STOKESSchen Satz an und erhalten:

$$n \cdot I = \int_F (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{f} = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_k H_k l_k \quad (fm.17)$$

mit  $C$  : Randkurve. Setzt man  $B_k = \mu_0 \mu_k H_k$  ein, so folgt mit konstantem Fluss  $\phi = B_k f_k$ :

$$n \cdot I = \sum_k H_k l_k = \sum_k \frac{1}{\mu_0 \mu_k} B_k l_k = \phi \cdot \sum_k \frac{l_k}{\mu_0 \mu_k f_k} \quad (fm.18)$$

Man bezeichnet  $n \cdot I$  auch als *magnetische Spannung*,  $\phi$  als *magnetischen Strom* und den Ausdruck

$$R_{\text{mag}} := \sum_k \frac{l_k}{\mu_0 \mu_k f_k} \quad (\text{fm.19})$$

als magnetischen Widerstand und kann damit dem Gesetz Gl. (fm.18) eine zum OHMSchen Gesetz des elektrischen Stromkreises analoge Formulierung geben:

### Ohmsches Gesetz des Magnetischen Kreises

$$n \cdot I = \phi \cdot R_{\text{mag}} \quad (\text{fm.20})$$

Der Fluss des gesamten Kreises hängt also bei konstantem Strom  $I$  von der relativen Permeabilität  $\mu_k$  und der Geometrie  $l_k f_k$  aller Teilstücke des Kreises ab. Als Spezialfall betrachte man einen toroidalen Eisenkern aus homogenem Material konstanten Querschnitts. Für das magnetische Feld  $H$  ergibt sich aus Gl. (fm.17):

$$H(r) = \frac{nI}{\ell} = \frac{nI}{2\pi r} \quad (\text{fm.21})$$

Dieser Ausdruck ist identisch mit dem für die magnetische Feldstärke in einer toroidalen Luftspule. Es spielt also keine Rolle, aus welchem Material der Torus ist. Der im vorliegenden Experiment verwendete Eisenkern wird in erster Näherung durch solch einen Torus beschrieben. Wird er durch einen engen Querspalt unterbrochen, so hat man, unter Vernachlässigung von Streufeldern, folgende Zusammenhänge:

Für den Eisenkern gilt

$$\vec{B}_E = \mu_0 \left( \vec{H}_E + \vec{M} \right), \quad (\text{fm.22})$$

während im Luftspalt  $\vec{M} = 0$  ist, so dass

$$\vec{B}_L = \mu_0 \vec{H}_L. \quad (\text{fm.23})$$

Mit  $\vec{B}_E = \vec{B}_L$  ist

$$\vec{H}_L = \vec{H}_E + \vec{M}. \quad (\text{fm.24})$$

Für die vorliegende Geometrie (s.o.) gilt

$$n \cdot I = H_L l_L + H_E l_E, \quad (\text{fm.25})$$

wobei  $l_E$  die Länge des Eisenkerns ist. Aus obigen Gleichungen folgt für das zu messende Feld im Luftspalt

$$B_E = B_L = \mu_0 H_L = \mu_0 \left( \frac{nI}{l} + M \frac{l_E}{l} \right) \quad (\text{fm.26})$$

mit  $l = l_E + l_L$ . Durch den Eisenkern wird also die magnetische Flussdichte verstärkt, und zwar für kleine Luftspalte  $l_l \ll l$  gerade um  $\mu_0$  mal der Magnetisierung. Ebenso folgt aus obigen Gleichungen

$$H_E = \left( \frac{nI}{l} - M \frac{l_l}{l} \right), \quad (fm.27)$$

d.h. das magnetisierende Feld wird durch den Luftspalt reduziert.

## fm.2.6 Induktionsgesetz

Der magnetische Fluss  $\phi$  durch eine Fläche  $A$  senkrecht zur magnetischen Flussdichte  $B$  ist

$$\phi = B \cdot A. \quad (fm.28)$$

Der Fluss  $\phi$  in einem ringförmig geschlossenen Eisenkern, der sich in einer stromdurchflossenen Spule mit  $N_P$  Windungen (*Feldspule*) befindet, ist

$$\phi = AB = A \cdot \mu_r \mu_0 H = A \cdot \mu_r \mu_0 \frac{N_P I}{l}, \quad (fm.29)$$

wobei  $I$  die Stromstärke,  $l$  die Länge des Eisenkerns und  $A$  der Querschnitt des Eisenkerns ist. Ändert

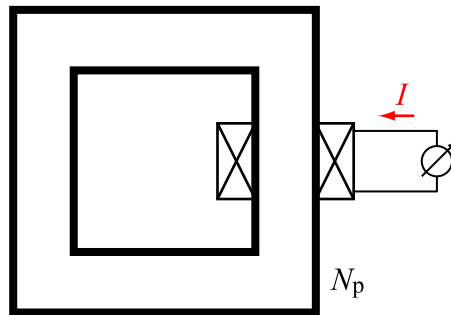


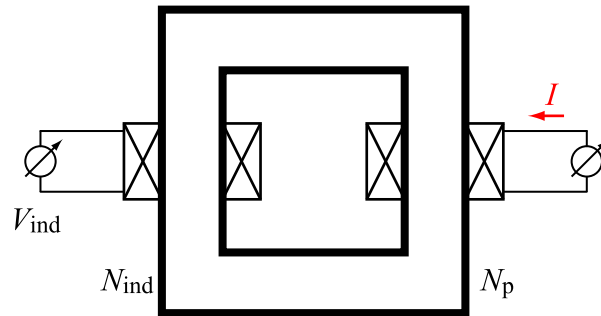
Abbildung fm.4: Feldspule auf geschlossenem Eisenkern

sich der magnetische Fluss  $\phi$ , so wird nach dem FARADAYSchen Induktionsgesetz eine Spannung induziert gemäß

$$V_{ind} = - \frac{\partial \phi}{\partial t}. \quad (fm.30)$$

In unserem Beispiel kann  $\phi$  durch Änderung des Stromflusses  $I$  geändert werden. In Abb. fm.5 ist an dem Eisenkern eine zusätzliche Messspule (*Induktionsspule*) mit  $N_m$  Windungen angebracht, an der die induzierte Spannung abgegriffen werden kann. Die induzierte Spannung ist

$$V_{ind} = -N_m \frac{\partial \phi}{\partial t} = -N_m N_P \frac{A}{l} \mu_0 \frac{\partial \mu_r I}{\partial t}. \quad (fm.31)$$



**Abbildung fm.5:** Induktionsspule auf dem Eisenkern, zusätzlich zur Feldspule

Der in der Messspule induzierte Spannungsstoß ist (mit  $H = N_p \frac{I}{l}$ )

$$\begin{aligned}
 \int_0^t V_{ind} dt' &= -N_m N_p \frac{A}{l} \mu_0 [\mu_r(t) I(t) - \mu_r(0) I(0)] \\
 &= -N_m A \mu_0 [\mu_r(t) H(t) - \mu_r(0) H(0)] \\
 &= -N_m A [B(t) - B(0)] \\
 &= -N_m [\phi(t) - \phi(0)].
 \end{aligned}
 \tag{fm.32}$$

Man kann also durch Integration von Induktionsspannungen magnetische Flüsse messen. Die Messung ist dabei eindeutig, bis auf eine Integrationskonstante  $\phi(0)$ , dem Fluss zu Beginn der Integration. Ist die Querschnittsfläche  $A$  bekannt, durch die der Fluss tritt, kann auch auf die Flussdichte  $B = \phi/A$  geschlossen werden.

## fm.2.7 Hysterese

Wird in der Anordnung der Abb. fm.5 der Strom  $I$  zeitlich linear verändert,  $I(t) = I_0 \cdot t$ , ändert sich gemäß Gl.(fm.33) die magnetische Feldstärke  $H$  linear mit der Zeit,  $H(t) = H_0 \cdot t$ , und auch der magnetische Fluss  $\phi$  bzw. die Flussdichte  $B$  ändern sich zeitlich.

Wegen magnetischer Anisotropien und der unter Umständen komplizierten Dynamik magnetischer Domänen erhält man ein Hystereseverhalten wie in Abb. fm.6 gezeigt. Bei anfänglich entmagnetisier-

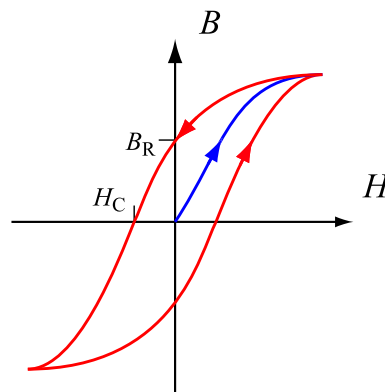


Abbildung fm.6: Hystereseschleife

tem Eisenkern ändert sich  $B$  gemäß der blauen Kurve („Neukurve“). Bei großen  $H$ -Werten wächst  $B$  gemäß

$$B = \mu_0 H + M_{\max} \quad (\text{fm.33})$$

nur noch langsam. Es sind alle magnetischen Dipole ausgerichtet, so dass  $M_{\max} = \text{const.}$ . Man spricht von magnetischer Sättigung. Bei Reduktion von  $H$  folgt  $B$  nicht der Kurve, die es beim Vergrößern von  $H$  einnahm. Der aktuelle Wert  $B(H)$  hängt also von der Vorgeschichte ab.

### fm.3 Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung

1. Machen Sie sich die Einheiten von  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{M}$ ,  $\phi$ ,  $\mu_0$ ,  $\mu_r$  und  $\vec{j}$  klar.
2. Leiten Sie die Beziehung zwischen  $\mu$  und  $\chi$  her.
3. Beschreiben Sie die Unterschiede von Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Geben Sie eine mikroskopische Erklärung im Rahmen eines einfachen Atommodells.
4. Was sind typische Werte von  $\mu_r$  für magnetische Materialien (Para-, Dia-, Ferromagnete)? Nennen Sie zu jedem Beispiel ein dafür typisches Material.
5. Sind die Vektoren  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  stets parallel? Wie konnte man gegebenenfalls die Nicht-Parallelität mathematisch ausdrücken?
6. Wie groß ist die „differenzielle Permeabilität“  $\partial B / \partial H$ , wenn die Sättigungsmagnetisierung erreicht ist?
7. Skizzieren Sie qualitativ  $B(H)$  und  $M(H)$  für ferromagnetische Stoffe. Was ist der Unterschied zwischen den beiden Graphen?
8. Wie kann man einen ferromagnetischen Körper in einen „entmagnetisierten Zustand“ bringen?
9. Was ist ein „Querspalt“ und was ein „Längsspalt“ bei Magneten? Wozu benutzt man eine „transversale“ bzw. eine „longitudinale Hallsonde“?
10. Warum müssen die Spalte zur Messung von  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  in ferromagnetischem Material möglichst eng sein?
11. Ist  $\vec{B}$  in einem nicht-durchgehenden Querspalt genauso groß wie in einem durchgehenden?
12. Erklären Sie die Wirkungsweise einer Hallsonde. Was wird mit ihr gemessen? Wie kann man geometriebedingte Nullfeldsignale vermeiden?
13. Das Magnetfeld einer langen Zylinderspule fällt zu den Spulenden hin ab. Schätzen Sie anschaulich (ohne zu rechnen!) die Größe des Feldes an den Spulenden im Vergleich zur Feldstärke im Mittelpunkt der Spule ab.
14. Geben Sie die Formel für die magnetische Feldstärke  $H$  einer langen Spule als Funktion des Ortes auf der Symmetrieachse an. Stellen Sie diese Abhängigkeit für eine 8cm lange Spule mit Durchmesser  $D = 5,5\text{cm}$ , Windungszahl  $n = 500$  und Stromstärke  $I = 2,5\text{A}$  im Intervall  $\pm 7\text{cm}$  um die Spulenmitte graphisch dar (Vergl. Aufgabe fm.5.2). Hierzu eignet sich z.B. eine Bearbeitung in Python.

15. Welchen Betrag hat das Erdmagnetfeld in Gauß und in Tesla?
16. Wo werden ferromagnetische Stoffe bzw. der Ferromagnetismus von Stoffen in der Praxis genutzt?

## **fm.4 Versuchsdurchführung**

Zur Durchführung der Versuche stehen Ihnen folgende Geräte zur Verfügung:

- Feldmessgerät PHYWE mit transversaler Hallsonde
- Feldmessgerät PHYWE mit longitudinaler Hallsonde
- div. Experimentiertrafos mit Kernen
- Netzgeräte
- Multimeter
- div. Stativmaterial

### **Achtung!**

Bitte gehen Sie sehr sorgsam mit den Hallsonden um, sie dürfen keinesfalls verbogen oder geknickt werden!

Vor dem Umbau des Eisenkerns bitte den Strom am Netzgerät auf Null zurückdrehen, dann erst ausschalten!

Hallsonde entfernen und in die Stativklemmen einspannen!

## **fm.5 Aufgabenstellungen**

### **fm.5.1 Test der Hallsonden mit Hilfe des Erdmagnetfelds**

Ermitteln Sie die Richtung des Erdmagnetfelds im Raum mit einer Kompassnadel. Testen Sie die Hallsonden durch Messung des Erdmagnetfelds und stellen Sie dabei den Nullpunkt korrekt ein. Halten Sie dazu die Hallsonden a) senkrecht, b) parallel und c) antiparallel zum Erdmagnetfeld. Achten Sie darauf, dass sich keine Eisenteile in unmittelbarer Nähe befinden.

### **fm.5.2 Magnetfeld einer Luftspule**

Ermitteln Sie die magnetische Feldstärke  $H$  einer Luftspule (Länge  $l = 7,2\text{cm}$ , Durchmesser  $D = 5,5\text{cm}$ , Windungszahl  $n = 500$ ), durch die ein konstanter Strom fließt ( $I = 2,5\text{A}$ ), auf der Symmetrieachse in Abhängigkeit von der Position (in einem Intervall von  $\pm 7\text{cm}$  um die Spulenmitte). Verwenden Sie dazu die longitudinale Hallsonde. Tragen Sie die Messdaten entweder analog auf mm-Papier oder digital mittels Python, QtiPlot, etc. auf. Vergleichen Sie den gemessenen Verlauf der Feldstärke graphisch mit der für eine Zylinderspule endlicher Länge bzw. für einen magnetischen Punktdipol theoretisch erwarteten Abhängigkeit.

### **fm.5.3 Magnetfeld einer Spule mit geradem Eisenkern**

Setzen Sie nun einen geraden Eisenkern mit Längsbohrung und einem angespitzten Ende in die Spule ein und führen Sie die gleichen Messungen durch wie bei Aufgabe fm.5.2. Tragen Sie die Messpunkte in den Graphen von Aufgabe fm.5.2 ein (im gleichen Maßstab, um quantitativ vergleichen zu können). Diskutieren Sie die Veränderung im Feldstärkeverlauf durch Einführung des Eisenkerns mit Hilfe des Hintergrundwissens aus Kap. fm.2.5 Können Sie daraus auf die relative Permeabilität  $\mu_r$  des Eisenkerns folgern?

### **fm.5.4 Ermittlung der Hysteresekurve eines Eisenkerns „von Hand“**

Messen Sie die magnetische Feldstärke  $H$  und die magnetische Flussdichte  $B$  in Abhängigkeit vom Spulenstrom  $I$  für einen vollen Ummagnetisierungszyklus, ausgehend von der Sättigung. Platzieren Sie dazu die Hallsonden so, dass die Messung am wenigsten durch Streufelder verfälscht wird.

Um möglichst weit in die Sättigung zu kommen, können Sie kurzzeitig Spulenströme bis zu  $5\text{A}$  zulassen. Achten Sie unbedingt darauf, dass Sie den Strom nur monoton ändern (warum?). Tragen Sie die Messwerte in ein  $B(H)$ -Diagramm ein.