

UNIVERSITÄT REGENSBURG

ANFÄNGERPRAKTIKUM B

## **Versuch "fm": Ferromagnetismus**

*Fabian Tanzer*

15. Dezember 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Allgemeines</b>	<b>2</b>
1.1 Maxwell Gleichungen . . . . .	2
1.2 Weiß'sche Bezirke . . . . .	3
1.3 Hysterese . . . . .	3
1.4 Curie-Temperatur . . . . .	4
<b>2 Vorbereitungsaufgaben</b>	<b>5</b>
2.1 Einheiten . . . . .	5
2.2 Beziehung Permeabilitätszahl und Suszeptibilität . . . . .	5
2.3 Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus . . . . .	5
2.4 Typische Werte von der Permeabilitätszahl . . . . .	5
2.5 Parallelität $\vec{B}$ und $\vec{H}$ . . . . .	6
2.6 Differenzielle Permeabilität . . . . .	6
2.7 Skizze B(H) und M(H) . . . . .	6
2.8 Entmagnetisieren . . . . .	7
2.9 Quer- und Längsspalt . . . . .	7
2.10 Spalte möglichst eng . . . . .	7
2.11 Nicht-durchgehende Querspalt . . . . .	8
2.12 Wirkungsweise Hallsonde . . . . .	8
2.13 Magnetfeld einer Zylinderspule . . . . .	9
2.14 Magnetische Feldstärke für lange Spule . . . . .	9
2.15 Erdmagnetfeld . . . . .	10
2.16 Ferromagnetische Stoffe in der Praxis . . . . .	11
<b>3 Versuchsdurchführung</b>	<b>12</b>
3.1 Test der Hallsonden mit Hilfe des Erdmagnetfelds . . . . .	12
3.2 Magnetfeld einer Luftspule . . . . .	12
3.3 Magnetfeld einer Spule mit geradem Eisenkern . . . . .	13
3.4 Ermittlung der Hysteresekurve eines Eisenkerns von Hand . . . . .	14
<b>4 Fazit</b>	<b>16</b>
<b>5 Quellen</b>	<b>17</b>

# 1 Allgemeines

Bei diesem Versuch werden Phänomene untersucht, die in ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld auftreten. Zunächst soll der Einfluss eines Eisenkerns auf das Magnetfeld einer Luftspule mithilfe der Hall-Sonde als Feldmessgerät untersucht werden und anschließend werden weitere magnetische Eigenschaften des Eisenkerns, wie zum Beispiel das Hystereseverhalten  $B(H)$ , untersucht.

Es soll vor allem der Umgang mit den Größen magnetische Flussdichte  $\vec{B}$ , magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  und Magnetisierung  $\vec{M}$  gelernt werden.

## 1.1 Maxwell Gleichungen

Diesem Versuch werden die Maxwellschen Gleichungen der Magnetostatik zugrunde gelegt:

1. Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  ist quellenfrei:

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

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

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

Die Magnetisierung  $\vec{M}$  addiert sich mit der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  zur Flussdichte  $\vec{B}$ :

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

wobei  $\mu_0 := 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$  die magnetische Feldkonstante ist. Die magnetische Suszeptibilität  $\chi$  wird definiert als:

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

Außerdem gibt es folgende Beziehung:

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

mit der magnetischen Permeabilität  $\mu$  und der relativen Permeabilität  $\mu_r$  (Vakuum:  $\mu_r = 1$ ). Die magnetische Suszeptibilität ist im Allgemeinen ein 3x3-Tensor, wir behandeln allerdings nur den isotropen Fall. Es gilt:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (6)$$

Da  $\vec{M}$  und  $\vec{H}$  im allgemeinen nicht linear sind, also  $\mu$  und  $\chi$  von  $\vec{H}$  abhängen, betrachtet man oft die differentielle Permeabilität

$$\mu := \frac{\partial B}{\partial H} \quad (7)$$

und die differentielle Suszeptibilität

$$\chi := \frac{\partial M}{\partial H} \quad (8)$$

Man kann Materialien entsprechend ihrer magnetischen Eigenschaften und somit ihrer relativen Permeabilität bzw. Suszeptibilität einordnen:

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

## 1.2 Weiß'sche Bezirke

Als Weiß'sche Bezirke wird die magnetische Domänenstruktur innerhalb ferromagnetischer Körper bezeichnet. Vom entmagnetisierten Zustand eines ferromagnetischen Materials spricht man, wenn sich die Magnetisierungen der einzelnen Domänen makroskopisch wegmitteln und somit die effektive Magnetisierung verschwindet. Die Angabe der Suszeptibilität nach der Definition (4) ist nicht sinnvoll, da es innerhalb jedes Weiß'schen Bezirks eine spontane Magnetisierung gibt, d. h.  $\vec{M} = 0$  für  $\vec{H} = 0$ . Deshalb verwendet man an der Stelle oft die differenzielle Suszeptibilität. Die Grenzen zwischen den Bezirken bezeichnet man als Bloch-Wände.

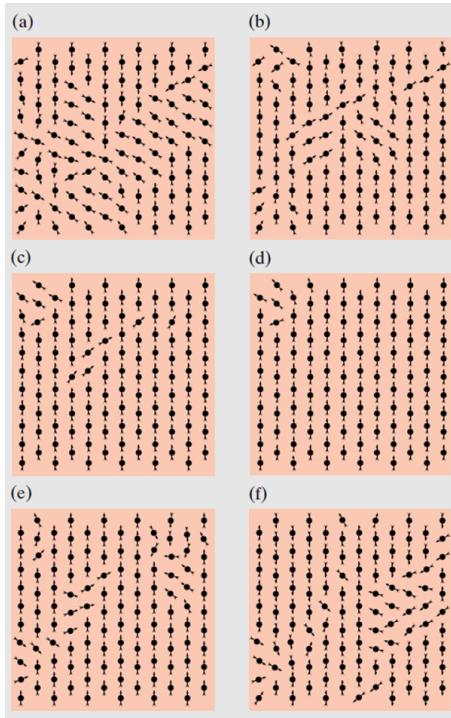


Abb. 1: Weiß'sche Bezirke (Quelle: Gerthsen, S. 407)

Diese Abbildung zeigt die Magnetisierung durch ein äußeres Feld. Von (a)-(d) wird ein Permanentmagnet angenähert, wodurch das Magnetfeld anwächst. Entfernt man ihn wieder, so bleibt trotzdem eine sogenannte Remanenzmagnetisierung zurück (e). Um letztendlich auch diese zu entfernen, braucht man ein Gegenfeld (f).

## 1.3 Hysterese

Durch magnetische Anisotropien kommt es zu einem Hystereseverhalten wie in folgender Abbildung gezeigt:

Hier ist die Funktion  $B(B_0)$  die sogenannte Magnetisierungskurve. Ist die Probe am Anfang nicht magnetisiert und erhöht sich das magnetisierende Feld  $B_0$ , so bewegt man sich entlang der Neukurve (gestrichelt). Reduziert man dann  $B_0$  wieder, so bewegt man sich entlang der darüber liegenden Kurve. Dieses Phänomen wird als Hysterese bezeichnet. Man erkennt hier auch sehr gut, dass auch für  $B_0 = 0$  die Remanenz zurückbleibt. Will man auch diese verschwinden lassen, so muss man ein entgegengesetzt gerichtetes Feld  $B_0$ , welches man auch als Koerzitivkraft bezeichnet, anlegen. Der Zusammenhang zwischen  $M$  und  $H$  ist also bei ferromagnetischen Stoffen nicht eindeutig.

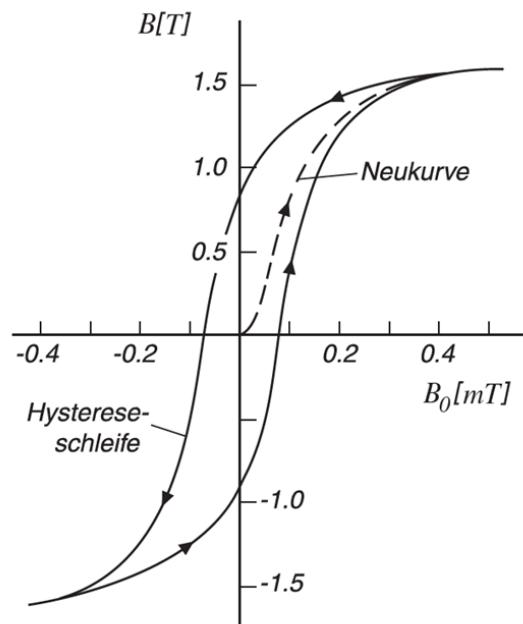


Abb. 2: Hysterese (Quelle: Dransfeld, S. 207)

#### 1.4 Curie-Temperatur

Das Curie-Gesetz beschreibt die Abhängigkeit der paramagnetischen Suszeptibilität  $\chi$  von der Temperatur  $T$ :

$$\chi = \mu_0 \frac{n \cdot m^2}{3 \cdot k_B \cdot T} \quad (9)$$

Ein ferromagnetischer Stoff wird paramagnetisch, falls die Temperatur oberhalb der Curie-Temperatur  $T_C$  ist.

## 2 Vorbereitungsaufgaben

### 2.1 Einheiten

Größe	Formelzeichen	Einheit
Magnetische Flussdichte	$\vec{B}$	$T = \frac{Vs}{m^2} = \frac{N}{Am}$
Magnetische Feldstärke	$\vec{H}$	$\frac{A}{m}$
Magnetisierung	$\vec{M}$	$\frac{A}{m}$
Magnetische Fluss	$\phi$	$Wb = Vs = Tm^2$
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0$	$\frac{N}{A^2} = \frac{Vs}{Am}$
Permeabilitätszahl	$\mu_r$	1
Stromdichte	$\vec{j}$	$\frac{A}{m^2}$

### 2.2 Beziehung Permeabilitätszahl und Suszeptibilität

$$\chi = \mu_r - 1 = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \Leftrightarrow \mu = \mu_0(\chi + 1) \quad (10)$$

### 2.3 Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus

Diamagnetismus:

„Eigentlich sind alle Stoffe diamagnetisch, nur wird diese Eigenschaft bei manchen durch den weit stärkeren Paramagnetismus verdeckt.“ (Gerthsen, S. 402). Dies liegt daran, dass alle Stoffe einen Spin und damit ein magnetisches Moment besitzen. Versucht man einen diamagnetischen Stoff in ein Magnetfeld zu schieben, so muss man eine Kraft überwinden, die ihn wieder hinausdrängt. Dies ist mit den Lorentzkräften in einem Metall ähnlich, aber beim Diamagnetikum wirkt die Kraft auch weiter, wenn man ihn im Magnetfeld ruhig hält. Ohne äußeres Feld sind diamagnetische Materialien übrigens nichtmagnetisch.

Paramagnetismus:

„Paramagnetische Stoffe entsprechen den Dielektrika mit Orientierungspolarisation. Ihre Teilchen haben permanente magnetische Momente, die vom Feld ausgerichtet werden; im Diamagnetikum muss das Feld diese Momente erst erzeugen.“ (Gerthsen) Die atomaren magnetischen Momente richten sich also in einem externen Magnetfeld aus und verstärken damit das Magnetfeld im Inneren des Stoffes. Diese magnetischen Momente kann man sich als Ringströme in den Teilchen vorstellen. Allerdings haben nur manche ein Bahnmoment und somit nicht jedes Elektron einen Kreisstrom. „Paramagnetismus tritt nur in Stoffen auf, deren Atome oder Moleküle ungepaarte Elektronen besitzen (Radikale, Übergangsmetallkationen, Lanthanoidkationen) und ein magnetisches Moment besitzen.“ (Wikipedia)

Ferromagnetismus:

In ferromagnetischen Stoffen sind die magnetischen Momente dauerhaft parallel zum äußeren Feld ausgerichtet. Deshalb zeigen diese Materialien auch Remanenz. Sie besitzen also auch nach dem Anlegen eines äußeren Magnetfeldes noch eine gewisse Restmagnetisierung. Ferromagnetische Stoffe werden also stark von einem äußeren Magnetfeld angezogen.

### 2.4 Typische Werte von der Permeabilitätszahl

Vergleiche Tabelle in 1.1.

Diamagnete: Supraleiter ( $\mu_r = 0,9999936$ ), Supraleiter ( $\mu_r \approx 0$ )

Paramagnete: Luft ( $\mu_r = 1 + 4 \cdot 10^{-7}$ ), Aluminium ( $\mu_r = 1 + 2,2 \cdot 10^{-5}$ )

Ferromagnete: Eisen ( $\mu_r = 300 - 10000$ )

## 2.5 Parallelität $\vec{B}$ und $\vec{H}$

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. Damit sind  $B$  und  $H$  auch nur in isotropen Medien parallel. In anisotropen Medien sind  $B$  und  $H$  nicht parallel und werden durch einen Tensor verknüpft.

## 2.6 Differenzielle Permeabilität

Ist die Sättigungsmagnetisierung erreicht (also  $M = \text{const.}$ ), so gilt für die differentielle Permeabilität:

$$\frac{\partial B}{\partial H} = \frac{\partial}{\partial H} \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \left( \frac{\partial \vec{H}}{\partial H} + \frac{\partial \vec{M}}{\partial H} \right) = \mu_0 (1 + 0) = \mu_0 \quad (11)$$

## 2.7 Skizze $B(H)$ und $M(H)$

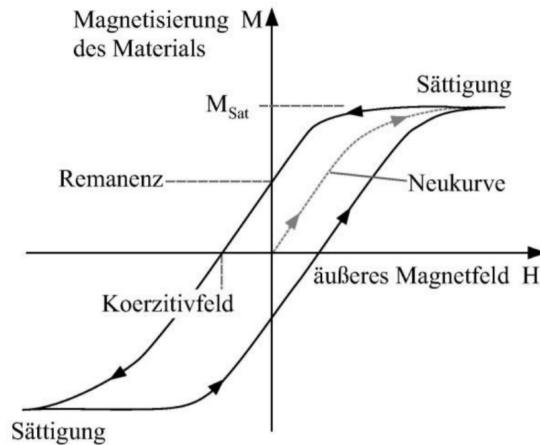


Abb. 3: Hysterese (Quelle: fh-münster)

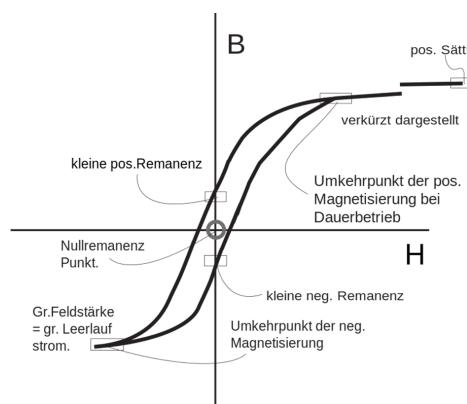


Abb. 4: Hysterese (Quelle: Wikipedia.de)

Beide Kurven schauen ähnlich aus, jedoch sind im anisotropen Fall in beiden Fällen die Größen über Tensoren verknüpft, welche unterschiedlich sind.

## 2.8 Entmagnetisieren

Man kann einen ferromagnetischen Körper in einen „entmagnetisierten“ Zustand bringen, indem man ihn

- einem starken Wechsel-Magnetfeld aussetzt, das dann allmählich abklingt. Betrachte hierzu folgende Abbildung:

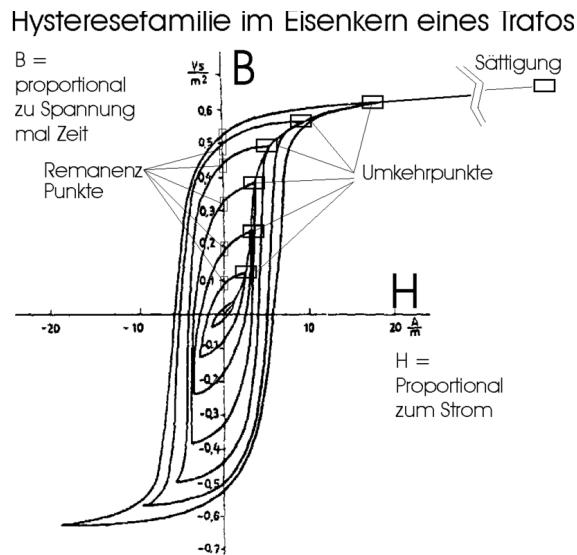


Abb. 5: Entmagnetisieren durch Wechsel-Magnetfeld (Quelle: Wikipedia.de)

- über die Curie-Temperatur erhitzt oder
- starken mechanischen Erschütterungen ausgesetzt

## 2.9 Quer- und Längsspalt

Die folgende Abbildung zeigt einen Längs- und Querspalt in einem Stück Eisen:

Mit der transversalen Hallsonde misst man die magnetische Flussdichte  $B_L$  im Querspalt, wodurch sich unmittelbar die Flussdichte  $B_E$  im Inneren des Eisens ergibt.

Mit der longitudinalen Hallsonde misst man die magnetische Flussdichte  $B_L$  im Längsspalt, wodurch die magnetische Feldstärke  $H_E$  im Eisen mit der Formel

$$H_E = H_L = \frac{1}{\mu_0} B_L \quad (12)$$

ermittelt werden kann.

## 2.10 Spalte möglichst eng

Zur Messung von  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  in ferromagnetischem Material müssen die Spalte möglichst eng sein, da sonst große Differenzen zwischen dem magnetischen Feld und magnetischen Fluss entstehen und somit starke Streufelder entstehen.

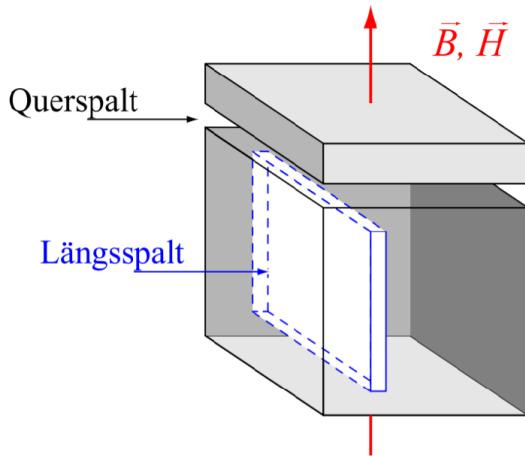


Abb. 6: Quer- und Längsspalt in Eisen (Quelle: Skript)

## 2.11 Nicht-durchgehende Querspalt

In einem durchgehenden Querspalt fällt die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  stärker ab als in einem durchgehenden Längsspalt.

## 2.12 Wirkungsweise Hallsonde

Eine Hallsonde nutzt den Hall-Effekt zur Messung von Magnetfeldern. Dieser besagt, dass eine elektrische Spannung auftritt, wenn sich ein stromdurchflossener Leiter in einem stationären Magnetfeld befindet. Die Ablenkung der Elektronen erfolgt durch die Lorentzkraft. Die Ladungsträger werden soweit abgelenkt, bis das elektrische Feld die Lorentzkraft kompensiert. Folgende Abbildung zeigt dies gut (Blauer Bereich auf Hallsonde: negative Ladung, Roter Bereich auf Hallsonde: positive Ladung):

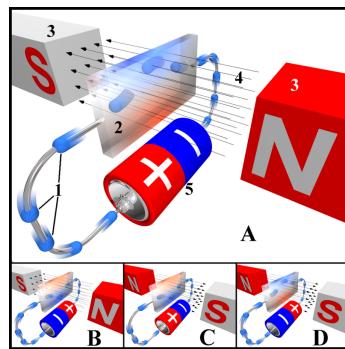


Abb. 7: Erklärung Halleffekt (Quelle: Wikipedia.de)

Mit der Hallsonde kann also die Spannung  $U$  gemessen werden und dann mithilfe der Formel

$$U_H = A_H \frac{IB}{d} \quad (13)$$

bei bekannter Stromstärke  $I$  auf das Magnetfeld  $\vec{B}$  geschlossen werden ( $A_H$  ist die Hall-Konstante). Legt man eine passende Gegenspannung an, so können Nullfeldsignale vermieden werden.

## 2.13 Magnetfeld einer Zylinderspule

Das Magnetfeld einer langen Zylinderspule ( $l \gg r$ ) fällt zu den Spulenden hin ab, da die Feldlinien im Inneren der langen Zylinderpule nahezu parallel verlaufen, an den Enden aber nicht. Dies zeigt folgende Abbildung deutlich:

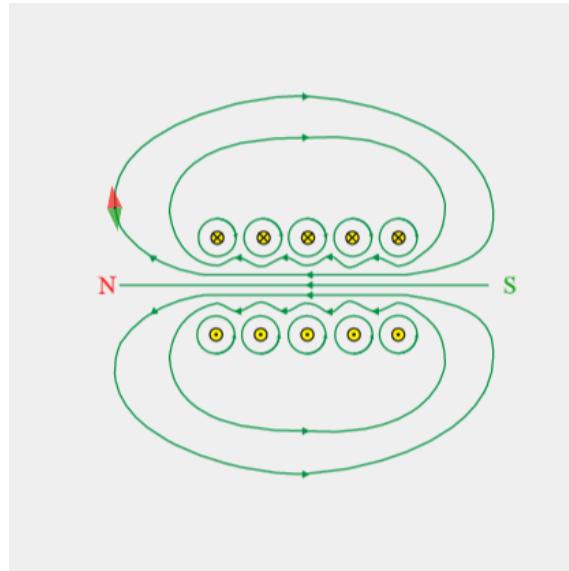


Abb. 8: Magnetfeldlinien Zylinderspule (Quelle: leifiphysik.de)

Ist  $l$  die Länge der Spule,  $N$  die Windungszahl und  $I$  die Stärke des Stroms durch die Spule, so berechnet sich die magnetische Flussdichte  $B$  folgendermaßen:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} I \quad (14)$$

## 2.14 Magnetische Feldstärke für lange Spule

Die magnetische Feldstärke  $H$  einer langen Spule folgt aus der Superposition der Magnetfelder der einzelnen stromdurchflossenen Kreisringe. Durch Integration ergibt sich dann:

$$H(x) = \frac{nI}{2l} \left[ \frac{x + \frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + (x + \frac{l}{2})^2}} - \frac{x - \frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + (x - \frac{l}{2})^2}} \right] \quad (15)$$

Für eine 8 cm lange Spule mit Durchmesser  $D = 5,5$  cm, Windungszahl  $n = 500$  und Stromstärke  $I = 2,5$  A ergibt sich folgender Graph:

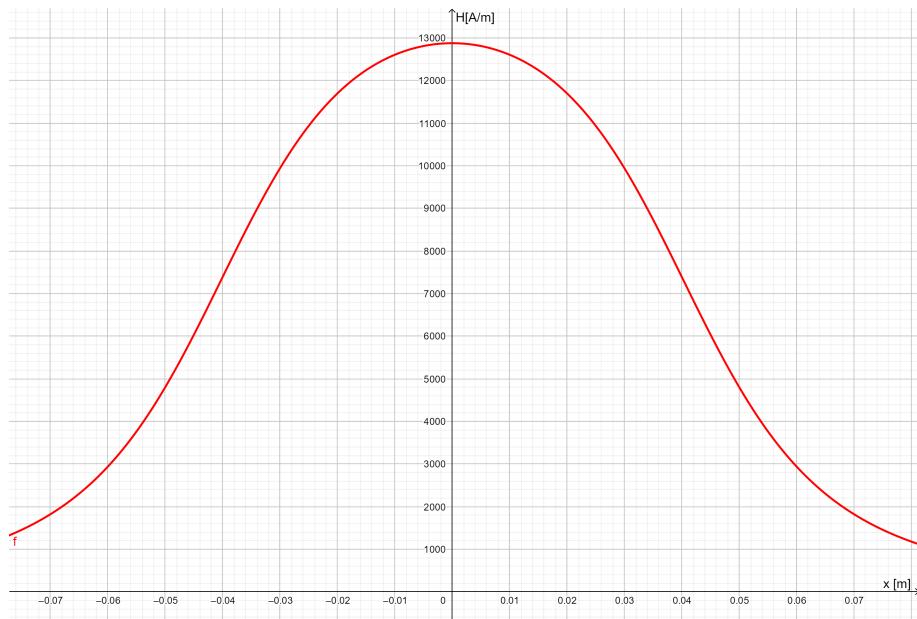


Abb. 9: Feldstärke in Abhängigkeit vom Ort (Quelle: Selbst erstellt mit Geogebra)

## 2.15 Erdmagnetfeld

Das Erdmagnetfeld hat an den Polen eine magnetische Feldstärke von  $B = 60 \mu T = 0,60 Gs$  und am Äquator  $B = 30 \mu T = 0,30 Gs$ . Bei unserem Breitengrad (49 Grad) ist  $B = 48 \mu T = 0,48 Gs$ . Mehr Informationen kann man aus folgender Abbildung ablesen.

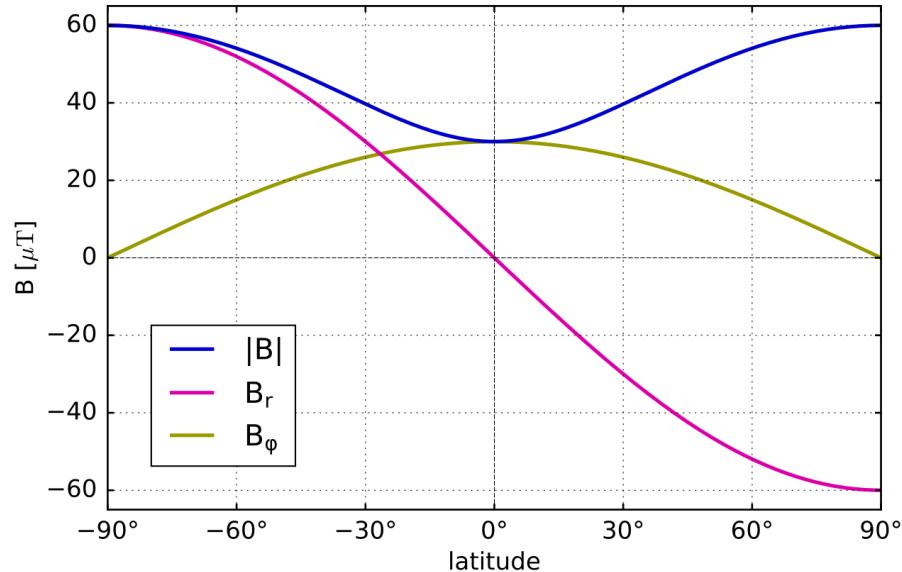


Abb. 10: Erdmagnetfeld (Quelle: Wikipedia.de)

Die Umrechnung lautet:

1 Gs (Gauss) = 0,1 mT  
Bzw. 1 T = 10.000 Gs

## 2.16 Ferromagnetische Stoffe in der Praxis

Ferromagnetische Stoffe werden oft für die Kerne von Elektromagneten und Transformatoren verwendet. Außerdem werden sie in Speichermedien, wie den Festplatten, eingesetzt (Hier wird der TMR (Tunnelwiderstand) und GMR-Effekt ausgenutzt: Der elektrische Widerstand ist bei Magnetisierung in entgegengesetzte Richtungen deutlich höher als bei Magnetisierung in die gleiche Richtung).

### 3 Versuchsdurchführung

Die Netzgeräte und die Multimeter sind uns bereits aus dem A2 Praktikum bekannt. Neu hinzu kommen die transversale und longitudinale Hallsonde.

Mit den Hallsonden ist sehr sorgsam umzugehen, da sie keinesfalls verbogen oder geknickt werden dürfen. Außerdem ist vor dem Umbau des Eisenkerns der Strom am Netzgerät auf Null zurückzudrehen und dann erst auszuschalten. Beim ersten Versuch wird das Erdmagnetfeld untersucht und die Messgeräte kalibriert. Beim zweiten Teil wird die Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke von der Position in einer Luftspule untersucht, wohingegen beim dritten das Ganze mit einem eingesetzten angespitzten Eisenkern wiederholt wird. Zum Schluss wird noch das Hystereseverhalten für einen vollen Ummagnetisierungszyklus eines Eisenkerns untersucht.

#### 3.1 Test der Hallsonden mit Hilfe des Erdmagnetfelds

Zuerst wurde die Richtung des Erdmagnetfelds im Raum mit einer Kompassnadel ermittelt.

Dann wurden die Hallsonden durch Messung des Erdmagnetfelds getestet und der Nullpunkt korrekt eingestellt. Hält man die Hallsonden

- a) senkrecht zum Erdmagnetfeld, so ergibt sich  $B = 0T$
- b) parallel zum Erdmagnetfeld, so ergibt sich  $B = 0,04mT = 40\mu T$
- c) antiparallel zum Erdmagnetfeld, so ergibt sich  $B = -0,04mT = -40\mu T$ .

Da die Anzeigen der Messgeräte stark schwankte, wurden hier Mittelwerte verwendet. Die Werte stimmen also im Rahmen der Messgenauigkeit mit Vorbereitungsaufgabe 15 überein. Bei dieser Messung ist übrigens darauf zu achten, dass sich keine Eisenteile in unmittelbarer Nähe befinden.

#### 3.2 Magnetfeld einer Luftspule

Bei dieser Messung wird die magnetische Feldstärke  $H$  einer Luftspule (Länge  $l = 7,2$  cm, Durchmesser  $D = 5,5$  cm, Windungszahl  $n = 500$ ), durch die ein konstanter Strom fließt ( $I = 2,5$  A), auf der Symmetriechse in Abhängigkeit von der Position (in einem Intervall  $\pm 7$  cm um die Spulenmitte) ermittelt. Dazu wird die longitudinale Hallsonde verwendet.

Es ergeben sich folgende Messwerte:

x [cm]	B [mT]
-7	2,55
-6	3,92
-5	6,04
-4	9,30
-3	12,54
-2	14,82
-1	16,09
0	16,44
1	15,6
2	13,08
3	9,55
4	6,48
5	4,26
6	2,68
7	1,84

### 3.3 Magnetfeld einer Spule mit geradem Eisenkern

Nun wird der gerade Eisenkern mit Längsbohrung und einem angespitzten Ende in die Spule eingesetzt und die gleichen Messungen wie gerade eben durchgeführt:

x [cm]	B [mT]
-7	8,89
-6	16,06
-5	9,61
-4,7	5,16
-4	0,13
-3	0,13
-2	0,14
-1	0,17
0	0,20
1	0,23
2	0,24
3	0,25
4	0,38
4,5	7,74
5	10,5
6	17,83
7	12,98

Die Permeabilitätszahl lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\mu_r = \frac{Bl}{\mu_0 NI} = 9,17 \cdot 10^{-3} \quad (16)$$

Dieser Wert stimmt bei weitem nicht mit dem Literaturwert überein. Der Grund hierfür sind wahrscheinlich das ungenaue Ablesen aufgrund der starken Schwankungen der Anzeige. Weiterhin war unsere Hallsonde nicht exakt in der Mitte der Spule zentriert. Zudem befanden sich einige Eisenteile in der Umgebung, die die Messung verfälschen.

Hier die Graphen von beiden Aufgaben:

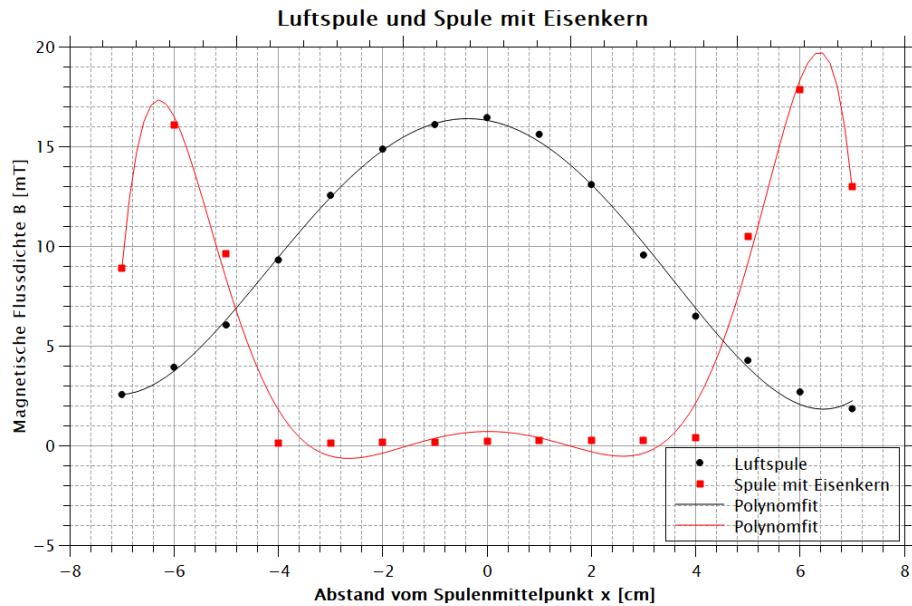


Abb. 11: Flussdichte in Abhängigkeit vom Ort

Die Messwerte waren in beiden Aufgaben nur schwer abzulesen, da die Anzeige stark schwankte. Außerdem vermuten wir, den Mittelpunkt der Spule nicht exakt erwischt zu haben.

Trotzdem entspricht der Verlauf des Graphens der theoretisch erwarteten Abhängigkeit, wie in Aufgabe 14 berechnet wurde.

Führt man den angespitzten Eisenkern ein, so sinkt die magnetische Flussdichte nahe der Spulenmitte auf knapp über Null. Der Grund hierfür ist, dass im Eisenkern ein Magnetfeld induziert wird, das nach der Lenz'schen Regel seinen verursachenden Feld (das von der Spule) entgegenwirkt. Damit kompensieren sich die beiden Felder nahezu.

### 3.4 Ermittlung der Hysteresekurve eines Eisenkerns von Hand

Bei dieser Aufgabe wird die magnetische Feldstärke  $H$  und die magnetische Flussdichte  $B$  in Abhängigkeit vom Spulenstrom  $I$  für einen vollen Ummagnetisierungszyklus, ausgehend von der Sättigung, gemessen. Die Hallsonden sind hier so zu platzieren, dass die Messung am wenigsten durch Streufelder verfälscht wird.

Der Strom wird hierbei nur monoton geändert, da es sonst Probleme bei der Hysteresekurve gibt. Es könnte passieren, dass man zwischen der "Neukurve" und den anderen nicht korrekt "wechselt". Außerdem wäre die induzierte Spannung  $V_{ind}$  nach dem Faraday'schen Induktionsgesetz

$$V_{ind} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (17)$$

unterschiedlich groß.

Mit der transversalen Hallsonde wurde die magnetische Flussdichte  $B_T$  im Querspalt und mit der longitudinalen Hallsonde die magnetische Flussdichte  $B_L$  im Längsspalt gemessen.

Es ergeben sich folgende Werte:

I [A]	$B_T[mT]$	$B_L[mT]$
0,6	37,2	0,28
1,0	35,6	0,27
1,5	34,0	0,26
1,7	32,9	0,27
2,5	30,9	0,25
3,0	27,2	0,23
3,5	26,6	0,22
4,0	26,2	0,19
4,5	24,8	0,20
5,0	24,1	0,18
4,5	24,2	0,20
4,0	24,3	0,23
3,5	24,3	0,24
3,0	23,7	0,23
2,5	22,9	0,23
2,0	22,7	0,24
1,5	22,6	0,25
1,0	23,0	0,25
0,5	23,4	0,28
0,0	23,6	0,30
-0,5	22,5	0,29
-1,0	21,8	0,27
-1,5	21,2	0,25
-2,0	21,4	0,26
-2,5	21,5	0,27
-3,0	21,6	0,28
-3,5	22,0	0,28
-4,0	22,4	0,29
-4,5	22,9	0,31
-5,0	23,2	0,32
-4,5	22,7	0,29
-4,0	22,2	0,28
-3,5	21,6	0,27
-3,0	21,0	0,25
-2,5	20,7	0,25
-2,0	20,4	0,22
-1,5	19,8	0,21
-1,0	19,3	0,19
-0,5	19,0	0,15
0,0	18,8	0,14

Eisen hat nach Aufgabe 4 eine Permeabilitätszahl von 300 - 10.000. Wir nehmen hier für dein Eisenkern  $\mu_r = 800$  an.

Es ergibt sich folgendes B(H) Diagramm:

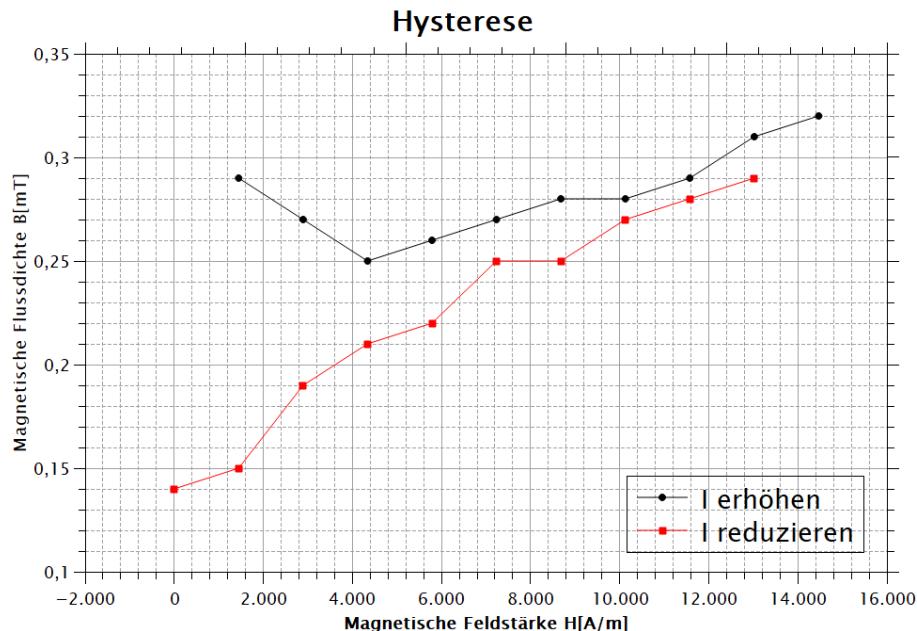


Abb. 12: Flussdichte in Abhängigkeit vom Ort

Bei diesem Versuch gibt es große Ungenauigkeiten. Die ersten zwei Messungen fallen dabei besonders auf.

Ein Grund hierfür ist, dass der Eisenkern vor Versuchsbeginn nicht vollständig entmagnetisiert war. Dies hätte man, wie in Aufgabe 8 beschrieben, durch ein starkes Wechsel-Magnetfeld, mechanische Erschütterungen oder durch das Überhitzen über die Curie-Temperatur erreichen können. Ein weiterer Grund ist das starke Schwanken der Messanzeigen. An der Stelle ist ein Fehler von  $\pm 0,05\text{mT}$  anzunehmen. Somit war ein genaues Ablesen nicht möglich.

Weiter Gründe, die aber nicht so essentiell wie die bisher genannten sind, sind folgende: Die longitudinale Hallsonde war nicht exakt in der Spulenmitte angebracht. Außerdem befanden sich einige Eisenteile in unmittelbarer Nähe, wie zum Beispiel das Stativmaterial. Zudem wurde die Permeabilitätszahl aus dem Internet entnommen und muss nicht exakt mit der des von uns verwendeten Eisenkerns übereinstimmen.

## 4 Fazit

Bei diesem Versuch konnte ich nochmal neue Dinge lernen und bereits gelernte vertiefen. So hatte ich nur die Formel (14) für die magnetische Flussdichte  $B$  im Kopf. Mir war allerdings vor Beginn des Versuchs nicht die Abhängigkeit vom Ort bewusst, wie sie in (15) beschrieben wird. Zudem hätte ich vermutet, dass das Magnetfeld durch den Eisenkern in der Spule steigt. Hier hat mir Teilversuch 2 allerdings das Gegenteil gezeigt. Um den Grund hierfür zu finden, wiederholte man nochmal einige Gesetze der Elektrodynamik und kam schließlich auf die Lenz'sche Regel.

Leider hat der Versuch mit der Hysterese nicht gut geklappt. Dies erschwerte dann auch die Auswertung und die Problemfindung enorm. Im Großen und Ganzen hat mir der Versuch Spaß gemacht und konnte auch einige Dinge lernen.

## **5 Quellen**

www.Wikipedia.de  
www.leifphysik.de

Dransfeld, Kienle: Physik II. Elektrodynamik und Spezielle Relativitätstheorie

Gerthsen: Physik  
fh-muenster.de