

# Versuchsauswertung P1-80: Magnetfeldmessung

Kathrin Ender, Michael Walz  
Gruppe 10

13. Januar 2008

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Zur Auswertung</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Induktivität einer Eisenkernspule</b>	<b>2</b>
1.1	Entmagnetisieren des Kerns . . . . .	2
1.2	Induktiver Widerstand (ohne Luftspalt) . . . . .	2
1.3	Induktiver Widerstand mit Luftspalt . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Hysteresiskurven</b>	<b>4</b>
2.1	Hysteresiskurve mit Widerstand . . . . .	4
2.2	Hysteresiskurve ohne Widerstand . . . . .	7
2.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Magnetfeldmessung mit einer Hallsonde</b>	<b>10</b>
3.1	Eichen der Hallsonde . . . . .	10
3.2	Magnetfeld einer Zylinderspule . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Magnetische Eigenschaften von Stoffen</b>	<b>11</b>

## 0 Zur Auswertung

Alle Messwerte befinden sich im handgeschrieben angehängten Versuchsprotokoll. Diese Werte wurden am Computer abgetippt und dem Programm GNUPLOT<sup>1</sup> zur Visualisierung übergeben.

Die meisten Messwerte mussten aufgrund der Ablesekalen (oder aus sonstigen Gründen) noch umgerechnet werden. Aufgrund des massiven Rechenaufwandes erledigten wir dies direkt am Computer unter GNUPLOT mittels der Option „using“<sup>2</sup>.

## 1 Induktivität einer Eisenkernspule

### 1.1 Entmagnetisieren des Kerns

Um den geschlossenen Kern der Spule mit 125 Windungen zu entmagnetisieren wird eine Wechselspannung angelegt, die dann langsam bis auf Null abgesenkt wird. Die Wechselspannung hat zur Folge, dass durch die ständige Umpolung des Spulenfeldes (also des äußeren Feldes) die Hysteresisschleife durchlaufen wird. Durch das Absenken der Maximalstroms wird die Schleife immer „kleiner“, so dass wenn kein Strom mehr fließt, es also kein äußeres Feld mehr gibt, auch fast kein Restfeld übrig bleibt. Der maximal einstellbare Strom bei unserem Versuch betrug  $I \approx 480mA$ . Beim Entmagnetisieren fiel uns auf, dass es wichtig ist, den Strom nicht zu schnell abzusenken, da sonst eine hohe Restmagnetisierung zu erkennen war. Diese wurde schon deutlich, wenn man das Joch vom U-Kern abhob.

### 1.2 Induktiver Widerstand (ohne Luftspalt)

Für zwei sinnvoll in Reihe geschaltete<sup>3</sup> Spulen (mit je 1000 Windungen) mit einem gemeinsamen geschlossenen Eisenkern sollte durch Spannungs- und Strommessung (es lag natürlich Wechselspannung an) der induktive Widerstand  $R_L$  bestimmt werden. Aus der Messung lässt sich außerdem die Induktivität  $L$ , und daraus wiederum die relative Permeabilität bestimmen.

Beim größten Messstrom  $I_{eff} = 5mA$  ergibt sich:

- Induktivität

$$L = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50Hz} \cdot \frac{29,9V}{5,0mA} = 19,03H$$

- relative Permeabilität:

$$\mu_r = \frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A} = 1165$$

$$\text{mit } l = 0,48cm \quad n = 2000 \quad A = 15,6cm^2$$

### 1.3 Induktiver Widerstand mit Luftspalt

Nun soll dieselbe Messung mit einem Luftspalt im Eisenkern durchgeführt werden. Um einen Luftspalt zu erhalten wurde zwischen Joch und U-Kern auf der einen Seite ein 2mm-dickes Eisenstück gelegt und auf der anderen Seite ein U-förmiges Abstandstück (d=2mm) aus Messing. Beim größten Messstrom  $I_{eff} = 21,5mA$  ergibt sich:

<sup>1</sup><http://www.gnuplot.info/>

<sup>2</sup><http://www.gnuplot.info/docs/node133.html>

<sup>3</sup>sinnvoll in Reihe geschaltet bedeutet, dass der Wicklungssinn der gleiche ist

- Induktivität

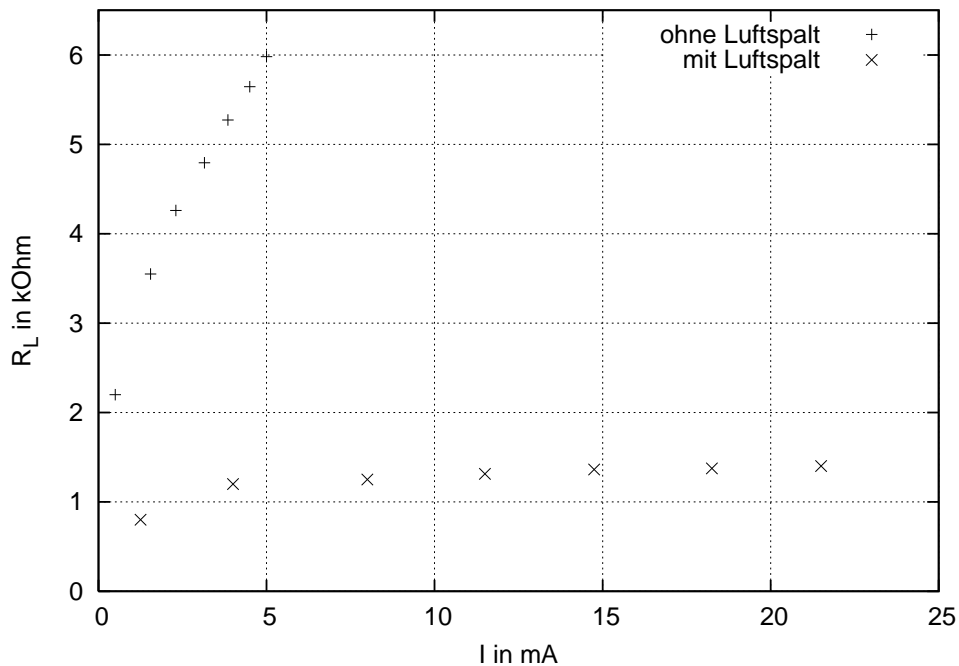
$$\text{mit } U_{eff} = 30,1V \quad L = 4,46H$$

- relative Permeabilität: mit der obigen Formel für die relative Permeabilität kann nur ein scheinbarer Wert berechnet werden, da der Luftspalt nicht beachtet wird. Etwas anderes soll aber laut Versuchsanleitung auch nicht berechnet werden:

$$\mu_r^{schein} = 274$$

Es ist klar, dass  $\mu_r$  mit Luftspalt kleiner sein muss als ohne, da im Bereich des Luftspalts die Permeabilität auf  $\mu_r^{Luft} = 1$  absinkt.

Um die beiden Messungen miteinander vergleichen zu können, sollten die  $R_L(I)$ -Kurven beider Messungen in einem Diagramm zusammengefasst werden:

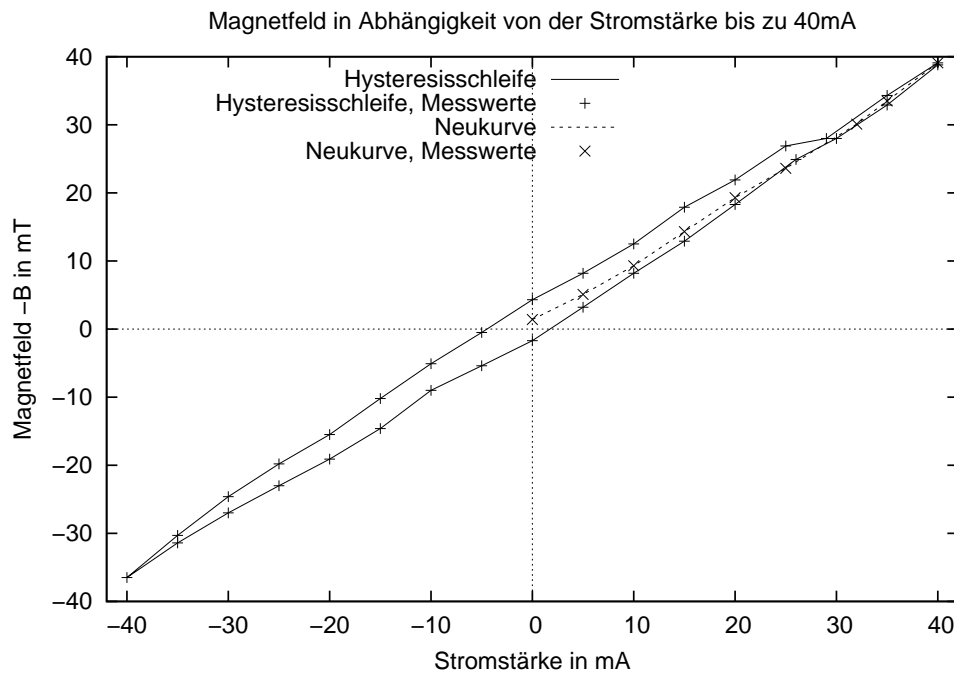


Mit Luftspalt scheint der induktive Widerstand nahezu unabhängig von der Stromstärke zu sein. Beim Versuch ohne Luftspalt ist jedoch deutlich zu erkennen, dass der induktive Widerstand mit steigender Stromstärke ebenfalls ansteigt. Dies lässt sich durch die Abhängigkeit der Induktivität von der Erregung erklären. Durch den Luftspalt im Kern sinkt die magnetische Erregung (daher muss auch bei 2.1 die Scherrung durchgeführt werden), so dass sich die Abhängigkeit nicht mehr so stark ins Gewicht fällt. Dies scheint auch durch die höhere Induktivität und die höhere Permeabilität beim Versuch ohne Luftspalt bestätigt. Die Abhängigkeit Induktivität von der magnetischen Erregung lässt sich so erklären, dass bei geringen  $I_{eff}$ , also bei geringer Erregung, nur ein kleiner Teil der magnetischen Dipole mit jeder Umpolung des Wechselstroms umgeklappt werden müssen. Je größer der Strom jedoch wird, desto mehr magnetische Dipole müssen umgeklappt werden, dies kostet Energie und daher steigt der induktive Widerstand der Spule.

## 2 Hysteresiskurven

### 2.1 Hysteresiskurve mit Widerstand

Der Versuchsaufbau von Aufgabe 1.3 wurde im Wesentlichen übernommen. In den Luftspalt des Eisenkerns, der durch das 2mm-dicke Messingabstandstück entsteht, wurde eine bereits geeichte Hallsonde geschoben. Zur Realisierung des mit den Spulen in Reihe geschalteten 600  $\Omega$ -Widerstandes wurden zwei 1,2k $\Omega$ -Widerstände parallel geschaltet. Wir entmagnetisierten den Eisenkern mit den bereits eingebauten  $2 \times 1000$ -Windungen-Spulen nach der Methode der Aufgabe 1.1. Wir maßen eine Restmagnetisierung im Kern von  $B = -1,4$  mT mit der Hallsonde. Anschließend schlossen wir den Versuchsaufbau an eine Gleichstromquelle an und maßen das Magnetfeld  $B$  in Abhängigkeit zum Spulenstrom  $I$ , den wir in kleinen Schritten durch folgenden Zyklus schalteten: 0 mA, 40 mA, 0 mA, -40 mA, 0 mA, 40 mA. Für negative Spannungen vertauschten wir die Anschlüsse am Netzgerät und stellten am Messgerät die Polung um, sodass wir am Netzgerät wieder positive Spannungen einstellen konnten. Es ergab sich folgenden Kurve:



Hierbei wurde  $-B$  auf die Y-Achse aufgetragen, damit die Hysteresisschleife in der bekannten Form von links unten nach rechts oben entsteht. Die Hallsonde wurde anscheinend so in den Luftspalt eingebracht<sup>4</sup>, dass die Messung genau „falsch herum“ geschah. Die einzelnen Messwerte wurden einfach gerade verbunden. Dies geschah nicht, um eine (nicht erfolgte) Interpolation der Messwerte darzustellen, sondern lediglich damit man sieht welche Messwerte zum oberen bzw. unteren Durchlaufen der Hysteresisschleife gehören.

Die beiden äußersten Messwerte der Kurve sind (40 mA, -39,1 mT) und (-40 mA, 36,5 mT), sodass sich der Betrag  $m$  der mittleren Steigung ergibt:

$$m = \frac{36,5 + 39,1}{40 + 40} \frac{\text{mT}}{\text{mA}} = 0,945 \frac{\text{T}}{\text{A}} \quad B \approx m \cdot I$$

Wenn wir nun den Luftspalt ignorieren und einfach  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n}{l} \cdot I$  annehmen, so

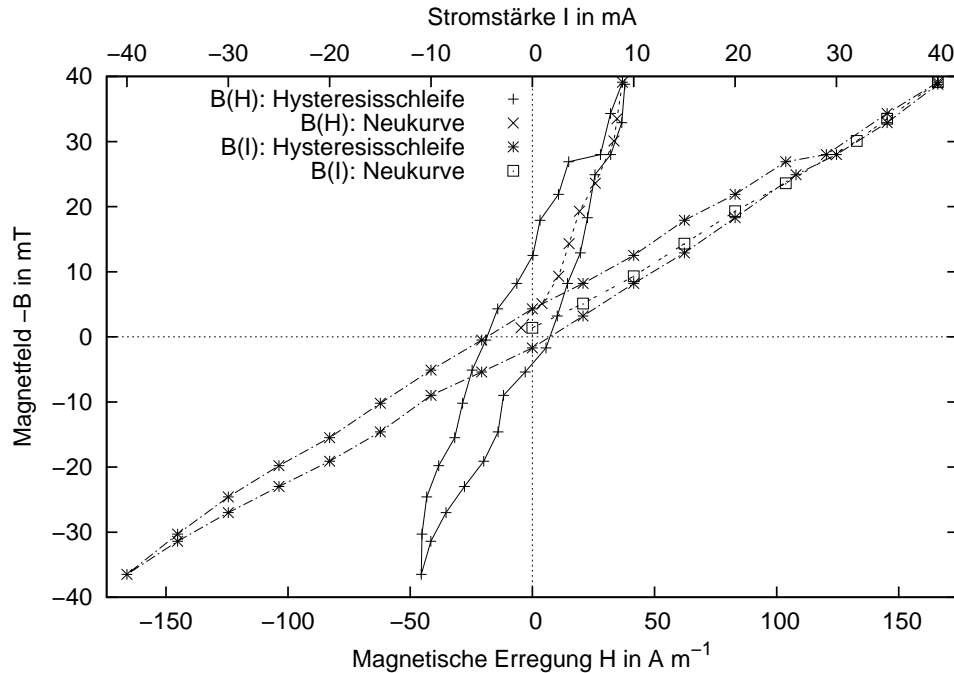
<sup>4</sup>bzw. die Spulen so geschaltet

erhalten wir für die scheinbare relative Permeabilität  $\mu_r^{\text{schein}}$  mit  $l = 48 \text{ cm} + 2 \cdot 0,2 \text{ cm}^5$  und  $n = 2000$ :

$$\mu_r^{\text{schein}} = \frac{m \cdot l}{\mu_0 \cdot n} = \frac{0,945 \cdot 0,484}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000} = 182,0$$

Aber diese Betrachtung ist nicht korrekt, da wie in der Vorbereitung beschrieben, die Wirkung des Luftspalt herausgerechnet werden muss. Dies geschieht mittels einer Scherung:

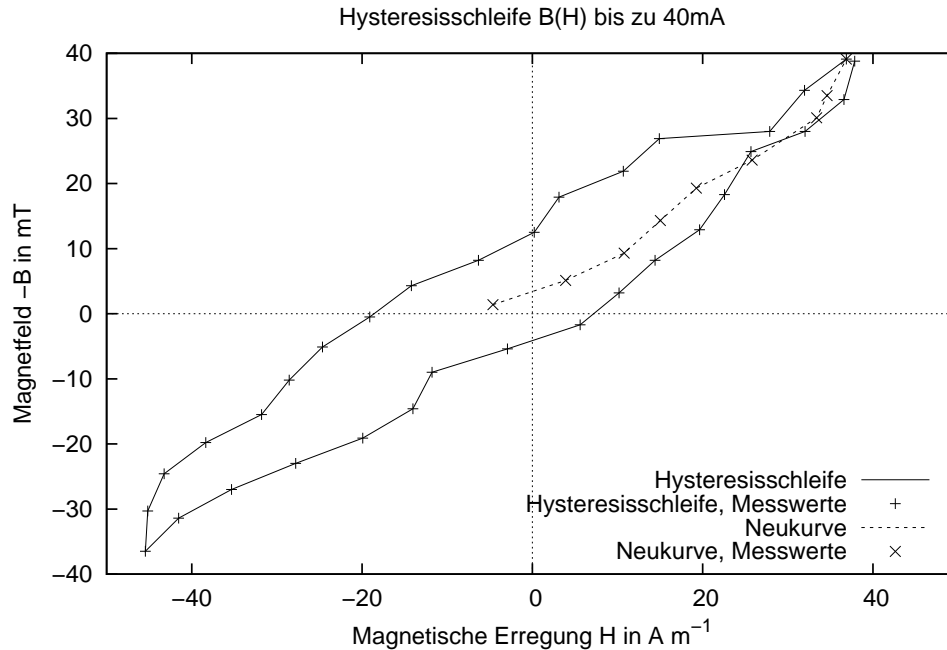
$$H = \frac{n}{l} \cdot \left( I - \frac{l_s}{n \cdot \mu_0} \cdot B \right)$$



Die Skalierung der beiden x-Achsen wurde so gewählt, dass die Stromstärken der magnetischen Erregung entsprechen, die man durch lineare Umskalierung  $H = \frac{n}{l} \cdot I$  erreichen würde. Dadurch kann man schön die entstandene Scherung erkennen. Die einzelnen Messwerte sind einfach horizontal zur y-Achse hin verschoben und zwar umso mehr, je größer ihr Abstand zur x-Achse war.

Zur genaueren Betrachtung bietet es sich an, die  $B(H)$ -Kurve in einem eigenen Schaubild zu betrachten:

<sup>5</sup>Laut Aufgabenblatt ist die mittlere Länge der Feldlinien im Eisen 48 cm. Dazu wird die Dicke der eingefügten Blättchen addiert.



Die beiden äußersten Messwerte liegen bei  $(36,87 \frac{\text{A}}{\text{m}}, -39,1 \text{ mT})$  und  $(-45,45 \frac{\text{A}}{\text{m}}, 36,5 \text{ mT})$ , sodass sich aus der mittleren Steigung  $m = \mu_0 \cdot \mu_r$ , die relative Permeabilität berechnen lässt:

$$m = \frac{39,1 + 36,5}{36,87 + 45,45} \frac{\text{mT} \cdot \text{m}}{\text{A}} = 7,97 \cdot 10^{-4} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

$$\Rightarrow \mu_r = \frac{m}{\mu_0} = 634$$

Aus dem Schaubild können wir die Remanenz zu  $B_R = 12,4 \text{ mT}$  und die Koerzitivkraft zu  $H_C = 18,6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$  ablesen. Die Sättigungsmagnetisierung lässt sich nicht ablesen, da die Sättigung noch nicht erreicht wurde.

Die Verlustleistung lässt sich gemäß der Vorbereitung über

$$P = V_{\text{Kern}} \cdot A_{\text{Hysteresis}} \cdot f$$

berechnen. Dabei ist  $V_{\text{Kern}} = 3,9 \cdot 4,0 \cdot (48 + 2 \cdot 0,2) \text{ cm}^3 = 7,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  und  $f = 50 \text{ Hz}$ . Um die Fläche der Hysteresisschleife zu bestimmen, druckten wir das obige Schaubild ganzseitig auf DIN-A4, legten ein kariertes Blatt dahinter und bestimmten die Obersumme und die Untersumme der Quadrate. Bei der Obersumme wurden alle Quadrate gezählt, die teilweise innerhalb der Hysteresisschleife liegen; bei der Untersummen nur die Quadrate, die vollständig innerhalb liegen. Ein Quadrat war  $(\frac{1}{2} \text{ cm})^2$  groß. Die Skalierung der Achsen betrug

$$\text{für die x-Achse: } x_{\text{scal}} = \frac{40 \frac{\text{A}}{\text{m}}}{7,9 \text{ cm}}$$

$$\text{und für die y-Achse: } y_{\text{scal}} = \frac{40 \text{ mT}}{6,05 \text{ cm}}$$

Für die Fläche ergibt sich dann:

$$A_{\text{scal}} = x_{\text{scal}} \cdot y_{\text{scal}} = 33,48 \frac{\frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{mT}}{\text{cm}^2} = 8,37 \cdot 10^{-3} \underbrace{\frac{\frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T}}{\frac{1}{4} \text{ cm}^2}}_{1 \text{ Quadrat}}$$

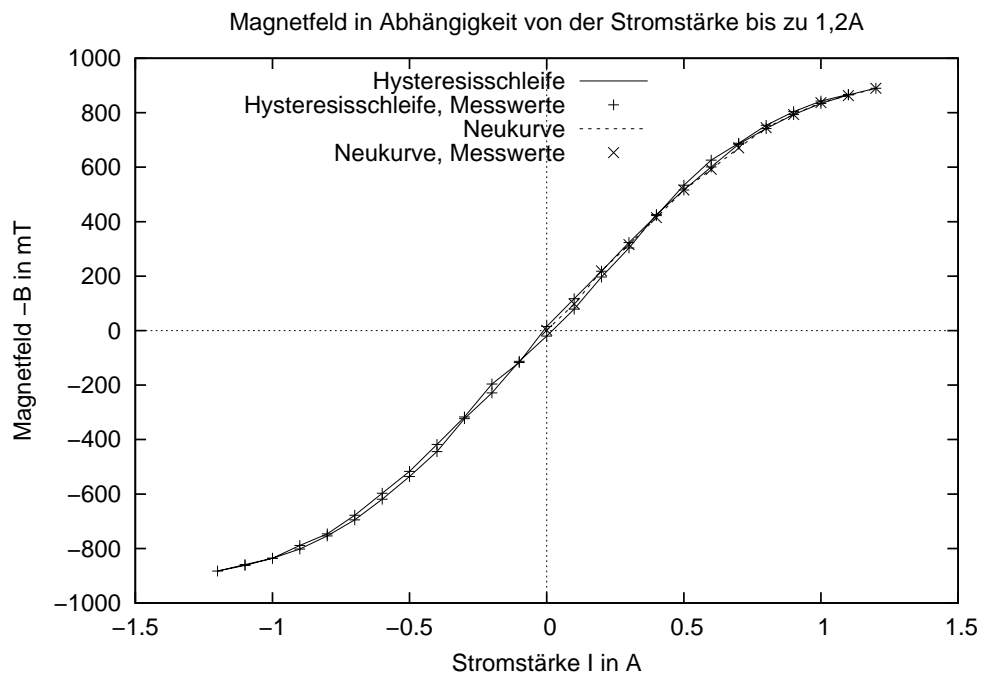
Als Obersumme ergaben sich 180 Quadrate und als Untersumme 84 Quadrate, sodass im Folgenden mit  $\frac{1}{2}(180+84) = 132$  Quadraten gerechnet wird. Damit ist die Fläche und damit die Verlustleistung:

$$A_{\text{Hysterese}} = 132 \cdot 8,37 \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T} = 1,10 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T}$$

$$\Rightarrow P = 7,55 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 \cdot 1,10 \frac{\text{A}}{\text{m}} \text{T} \cdot 50 \text{Hz} = 41,5 \text{mW}$$

## 2.2 Hysterisiskurve ohne Widerstand

Aus dem Versuchsaufbau wurde nun der  $600\Omega$ -Widerstand entfernt und wieder eine Entmagnetisierung mit Wechselstrom durchgeführt. Wir maßen diesmal Restmagnetisierung im Kern von  $B = -1,2 \text{mT}$ . Den Spulenstrom  $I$  schalteten wir diesmal mit kleinen Schritten durch den Zyklus:  $0 \text{A}, 1,2 \text{A}, 0 \text{A}, -1,2 \text{A}, 0 \text{A}, 1,2 \text{A}$ . Es ergab sich folgende Kurve:



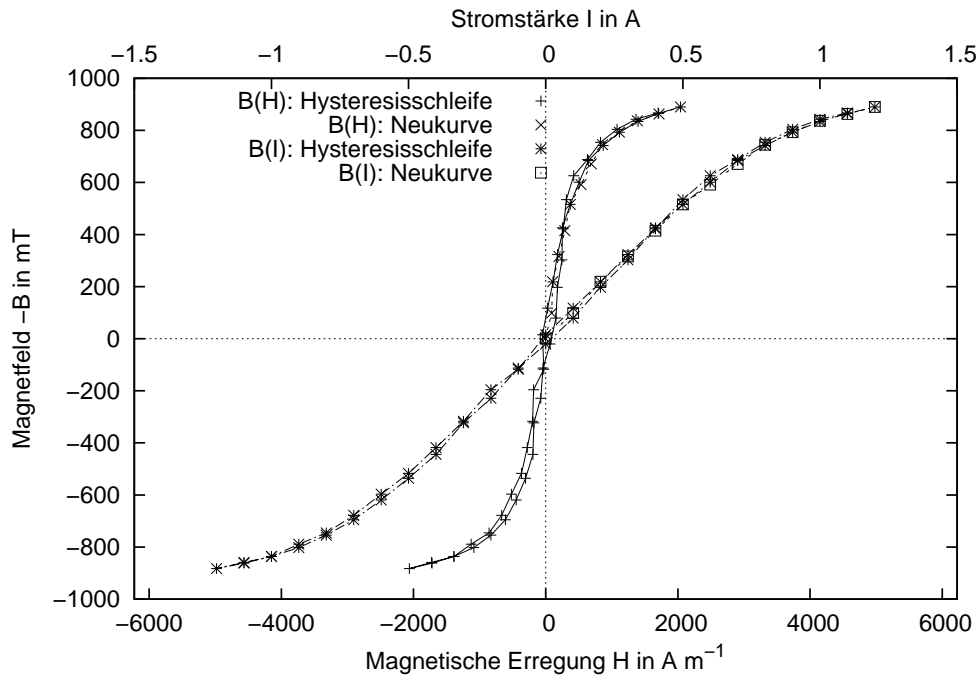
Die beiden äußersten Messwerte der Kurve sind  $(1,2 \text{A}, -0,890 \text{T})$  und  $(-1,2 \text{A}, 0,883 \text{T})$ , sodass sich der Betrag  $m$  der mittleren Steigung ergibt:

$$m = \frac{0,890 + 0,883}{1,2 + 1,2} \frac{\text{T}}{\text{A}} = 0,739 \frac{\text{T}}{\text{A}} \quad B \approx m \cdot I$$

Wenn wir nun wieder den Luftspalt ignorieren und einfach  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n}{l} \cdot I$  annehmen, so erhalten wir für die scheinbare relative Permeabilität  $\mu_r^{\text{schein}}$ :

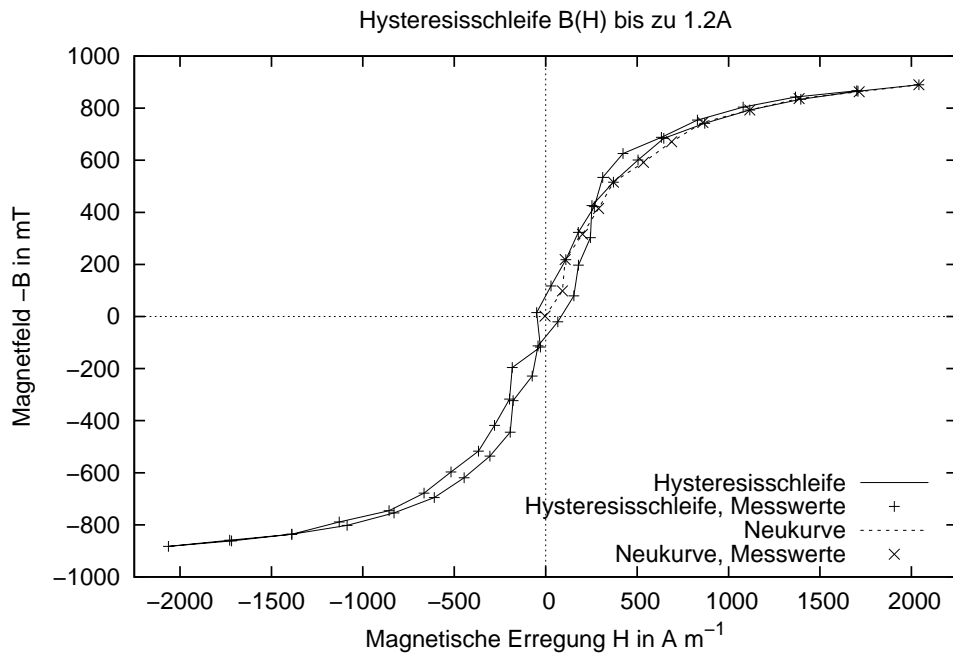
$$\mu_r^{\text{schein}} = \frac{m \cdot l}{\mu_0 \cdot n} = \frac{0,739 \cdot 0,484}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000} = 142$$

Unter Beachtung der Scherung erhalten wir folgendes Bild:



Die Skalierung der beiden x-Achsen wurde wieder so gewählt, dass die Stromstärken der magnetischen Erregung entsprechen. Die entstandene Scherung lässt sich wieder gut erkennen.

Zur genaueren Betrachtung wird die  $B(H)$ -Kurve wieder in einem eigenen Schaubild betrachtet:



Die beiden äußersten Messwerte liegen bei  $(2040 \frac{A}{m}, -0,890 T)$  und  $(-2063 \frac{A}{m}, 0,883 T)$ , sodass sich wieder relative Permeabilität berechnen lässt:

$$m = \frac{0,890 + 0,883}{2040 + 2063} \frac{T \cdot m}{A} = 4,32 \cdot 10^{-4} \frac{T \cdot m}{A}$$



$$\Rightarrow \mu_r = \frac{m}{\mu_0} = 344$$

Aus dem Schaubild können wir die Remanenz zu  $B_R = 75 \text{ mT}$  und die Koerzitivkraft zu  $H_C = 43 \frac{\text{A}}{\text{m}}$  ablesen. Die Sättigungsmagnetisierung liegt bei ca.  $H_S = 1000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ . Ab hier steigt das Magnetfeld im Kern nicht mehr nennenswert an; auch dann nicht, wenn das äußere Feld erhöht wird.

Ebenso wie oben, wurde die Fläche der Kurve bestimmt, nur dass diesmal die zu zählende Quadrate mit einer Fläche von  $(\frac{1}{4} \text{ cm})^2$  kleiner waren. Die Skalierung der Achsen betrug diesmal

$$\text{für die x-Achse: } x_{\text{scal}} = \frac{1000 \frac{\text{A}}{\text{m}}}{4,75 \text{ cm}}$$

$$\text{und für die y-Achse: } y_{\text{scal}} = \frac{1 \text{ T}}{6,85 \text{ cm}}$$

Für die Fläche ergibt sich dann:

$$A_{\text{scal}} = x_{\text{scal}} \cdot y_{\text{scal}} = 30,73 \frac{\frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T}}{\text{cm}^2} = 1,92 \underbrace{\frac{\frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T}}{\frac{1}{16} \text{ cm}^2}}_{1 \text{ Quadrat}}$$

Als Obersumme ergaben sich 127 Quadrate; als Untersumme 26 Quadrate und damit als Mittelwert 76,5 Quadrate. Damit ist die Fläche und die Verlustleistung:

$$A_{\text{Hysterese}} = 76,5 \cdot 1,92 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T} = 146,9 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T}$$

$$\Rightarrow P = 7,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 146,9 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot \text{T} \cdot 50 \text{ Hz} = 5,55 \text{ W}$$

## 2.3 Diskussion der Ergebnisse

Bisher wurde die Permeabilität dreimal gemessen und es ergaben sich jedes Mal andere Werte:

Bestimmung über		$\mu_r^{\text{Schein}}$	$\mu_r$
Aufgabe 1:	Widerstandsmessung	274	1165
Aufgabe 2.1:	Hysterese bis 40 mA	182	634
Aufgabe 2.2:	Hysterese bis 1,2 A	142	344

Den Unterschied zwischen  $\mu_r^{\text{Schein}}$  und  $\mu_r$  konnte auch hier eindrucksvoll nachgewiesen werden und liegt einfach daran, dass der Luftspalt dazu führt, dass das Eisen das Magnetfeld nicht mehr so stark verstärken kann, wie bei einem durchgängigen Eisenkern.<sup>6</sup>

Den großen Unterschied zwischen Aufgabe 1 und Aufgabe 2 können wir theoretisch nicht erklären. Vermutlich handelt es sich um größere systematische Fehler bei den Messungen. So war beispielsweise das Einstellen des Spulenstroms ziemlich schwierig; besonders bei der Hysterese bis 1,2 A, da wir hier auf einen Messbereich bis 3 A stellen mussten, und damit nur noch ca.  $\frac{1}{3}$  des Zeigerausschlags zu Bestimmung des Stroms zur Verfügung hatten. Auch könnte das Abstandsplättchen aus Messing nicht exakt 2 mm dick sein. Eine Änderung der Dicke hätte wegen der Scherung einen recht großen Einfluss auf  $\mu_r$ .<sup>7</sup> Dass die Messgenauigkeit nicht sonderlich hoch ist, sieht man auch an der Form der Hysteresiskurven. Die theoretische Forderung, dass die Neukurve komplett innerhalb der Hysteresisschleife liegt, wird bei beiden Messungen durch einzelne Messwerte nicht erfüllt. Bei der Messung bis 1,2 A schneidet die

<sup>6</sup>vgl. auch Aufgabe 1

<sup>7</sup>Allerdings nicht auf  $\mu_r^{\text{Schein}}$

„obere“ Kurve der Schleife teilweise sogar die „untere“ Kurve, sodass die „untere Kurve“ über der „oberen“ liegt.

Den Unterschied der beiden aus Hysterese berechneten Permeabilitäten wird recht schnell klar, wenn man sich klar macht, was die Sättigung bei 2.2 bedeutet. Bei der Sättigung verliert das Eisen seine Fähigkeit, ein magnetisches Feld im Vergleich zum Vakuum zu verstärken. Das Magnetfeld  $B$  steigt nicht mehr an, auch wenn höhere externe Felder angelegt werden. Da wir mit der mittlere Steigung als Steigung der Gerade zwischen den beiden Endpunkten gerechnet haben, zeigt hier die Sättigung deutlich ihre Wirkung, die hier ein Absinken der relativen Permeabilität zu Folge hat.

### 3 Magnetfeldmessung mit einer Hallsonde

#### 3.1 Eichen der Hallsonde

Zum Eichen der Hallsonde wurde eine Eichspule verwendet von der bekannt war, dass das B-Feld im Zentrum ein Minimum aufweist, dass bei einem Spulenstrom von  $I_S = 0,96A$  den Wert  $B = 10mT$  hat. Als Steuerstrom für die Hallsonde waren  $I_H = 114mA$  eingestellt und vor Messbeginn wurde ein Nullabgleich durchgeführt. Nach mehrfachem „Hin- und Herfahren“ mit der Hallsonde lokalisierten wir das Minimum bei einer Hallspannung von  $U_H = 0,685mV$ . Daraus lässt sich nun der Umrechnungsfaktor zwischen gemessener Hallspannung und dem gesuchten Magnetfeld bestimmen:

$$B = k \cdot U_H \quad k = \frac{10mT}{0,685mV} \approx 14,59854 \frac{T}{V}$$

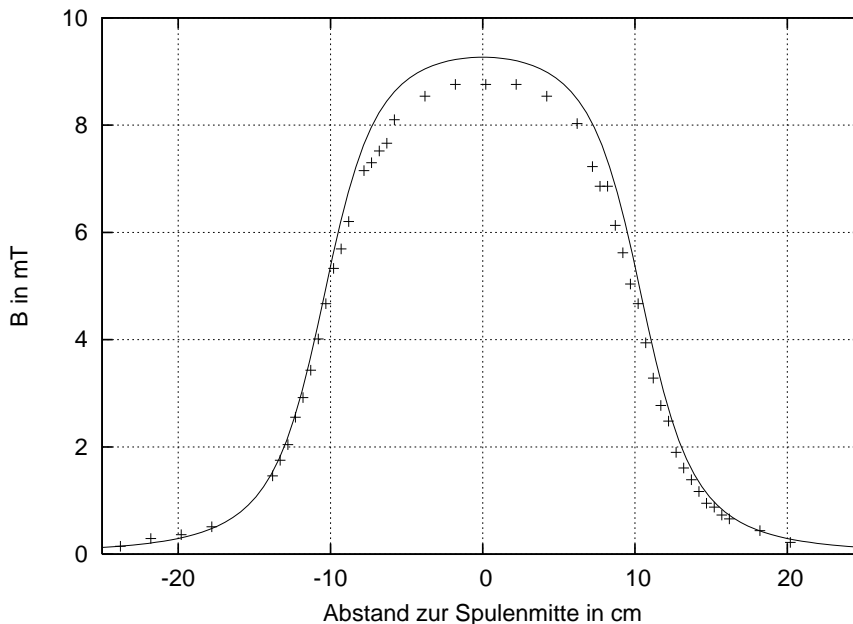
#### 3.2 Magnetfeld einer Zylinderspule

Nun sollte das Magnetfeld auf der Mittelachse einer Zylinderspule ausgemessen werden. Die gemessenen Hallspannungen wurden mittels des errechneten Umrechnungsfaktors direkt in Gnuplot umgerechnet. Der theoretische Wert des Magnetfeldes lässt sich berechnen aus:

$$B(x) = \frac{\mu_0 n I}{2L} \cdot \left( \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{R^2 + (L/2 - x)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{R^2 + (L/2 + x)^2}} \right)$$

$$L = 20,8cm \quad n = 814 \quad x = \text{Abstand vom Spulenmittelpunkt} \quad R = 3,7cm$$

Im folgenden Graphen sind die Messwerte und der theoretische Verlauf eingetragen:



Die Messwerte stimmen recht gut mit dem theoretischen Verlauf der Kurve überein. Das Magnetfeld geht über die Spulenden hinaus, steigt in der Spule dann stark an bis in der Mitte der Spule ein recht konstanter Wert erreicht wird. Es fällt jedoch auf, dass dieser konstante Wert im Experiment unter dem theoretischen liegt. Dies deutet auf systematische Fehler beim Experiment hin.

#### 4 Wirkung eines inhomogenen Magnetfeldes auf Stoffe mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften

In diesem Versuch sollte die Wirkung eines inhomogenen Magnetfeldes auf Stoffe mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften untersucht werden. Als inhomogenes Magnetfeld diente uns bei diesem Versuch das Feld zwischen zwei Polschuhen, die auf den U-Kern mit den zwei Spulen mit je 1000 Windungen gesteckt wurden. In diesen Bereich sollten dann bei noch ausgeschaltetem Feld und entmagnetisiertem Kern an Fäden aufgehängte Probestäbchen eingebracht werden, so dass sie in einem Winkel von etwa  $45^\circ$  zur Verbindungslinie zwischen den beiden Polschuhen stehen. Beim Einschalten des Magnetfeldes zeigten die Proben dann unterschiedliche Verhaltensweisen:

- **Fe:** Eisen ist der ferromagnetische Stoff, wie erwartet, dass er in den Bereich der höchsten Feldstärke gedrückt wird. Dies heißt, dass er sich entlang der Verbindungslinie ausrichten muss. Dies tat er auch. Allerdings war es sehr schwer das Eisenstäbchen überhaupt in einen  $45^\circ$  Winkel bei ausgeschaltetem Feld zu hängen, da der Kern wohl nicht gut genug entmagnetisiert war. Eisen zeigt dieses Verhalten, da ferromagnetische Stoffe permanente magnetische Dipole besitzen, die durch ein äußeres Feld ausgerichtet werden, so dass sie magnetisiert werden.
- **Al:** Aluminium ist der paramagnetische Stoff. Wie erwartet richtete sich die Alprobe entlang der Verbindungslinie, also in den Bereich der größten Feldstärke aus. Diese Ausrichtung geschieht jedoch nicht sofort wie beim Eisen, sondern erst bei einem hohen Spulenstrom. Dieser langsamere Ausrichtung liegt daran, dass Aluminium als paramagnetischer Stoff zwar auch permanente magnetische Dipole besitzt, diese werden jedoch

nur teilweise durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet. Die Magnetisierung ist daher nicht so stark.

- **Bi:** Bismut ist die diamagnetische Probe. Es drehte sich wie erwartet quer zu der Verbindungslinie, also in den Bereich der geringsten Feldstärke. Auch dieser Effekt trat erst bei hohem Spulenstrom auf. Diamagneten besitzen keine permanenten Dipole. Erst durch ein äußeres Magnetfeld werden magnetische Dipole induziert, die ein dem äußeren Feld entgegengerichtetes Magnetfeld im Medium erzeugen. Daher wird die Bismutprobe in den Bereich der kleinsten Feldstärke gezogen.