

# Versuchsvorbereitung P1-80: Magnetfeldmessung

Michael Walz  
Gruppe 10

3. Januar 2008

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Induktivität einer Eisenkernspule</b>	<b>2</b>
1.1	Entmagnetisierung . . . . .	2
1.2	Induktiver Widerstand . . . . .	2
1.3	Induktiver Widerstand mit Luftspalt . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Hysteresiskurven</b>	<b>3</b>
2.1	Hysteresiskurve mit Widerstand . . . . .	3
2.2	Hysteresiskurve ohne Widerstand . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Magnetische Feldstärke in zylindrischen Spulen</b>	<b>4</b>
3.1	Hallsondeneichung . . . . .	4
3.2	Magnetische einer Zylinderspule . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Inhomogenes Magnetfeld</b>	<b>5</b>

# 1 Induktivität einer Eisenkernspule

## 1.1 Entmagnetisierung

Zuerst soll der geschlossene Kern entmagnetisiert werden. Dazu wird der Kern in eine Spule eingebracht und an die Spule Wechselstrom gelegt. Dieser Wechselstrom wird nun vom maximal möglichen Wert 750 mA langsam auf 0 mA gesenkt. Durch den Wechselstrom wird ständig eine Hystereskurve durchlaufen, deren Remanenz allerdings zusammen mit dem Wechselstrom abnimmt, sodass bei kontinuierlichen Absenken der Stromstärke am Schluss der Kern entmagnetisiert sein sollte.

Überprüfen kann man dies entweder mit Eisenspänen oder einer Kompassnadel. Diese sollten sich nicht (oder kaum) mehr vom Kern ausrichten lassen. Alternativ kann man auch mit einer Hallsonde das Magnetfeld im Luftraum des Kerns messen.

## 1.2 Induktiver Widerstand

Nun betrachten wir den induktiven Widerstand von zwei in Reihe geschalteten Spulen mit je 1000 Windungen bei geschlossenem gemeinsamen Eisenkern. Gemessen wird der Wechselstrom in Abhängigkeit der Wechselspannung, die in 5 V-Schritten von 5 V bis 30 V verändert wird. Daraus lässt sich der induktive Widerstand der Spule (unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes) berechnen:

$$R_L = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$$

Die Messung soll spannungsrichtig geschehen. Dies bedeutet, dass der Spannungsmesser direkt die Spannung der Spule misst und der Strommesser die Summe aus Spulenstrom und Spannungsmesserstrom misst. Da der Innenwiderstand des Spannungsmessers aber sehr groß ist, ist dieser Fehler vernachlässigbar.

Wenn man nun die Aufgabenstellung bei 1.3 liest, so erfährt man, dass auch bei Aufgabe 1.2 noch mehr berechnet werden soll:

Die gemessenen Widerstandswerte sollen nun in einem  $R_L(I)$ -Diagramm visualisiert werden und beim größten Messstrom (bei  $U = 30 \text{ V}$ ) soll nun die Induktivität  $L$  berechnet werden. Dies geschieht über die theoretische Formel

$$R_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad f: \text{Frequenz des Wechselstroms}$$

$$\Rightarrow L = \frac{R_L}{2\pi f}$$

Alternativ dazu kann man auch die Formel für Eigeninduktivität einer langgestreckten Spule verwenden:

$$L = \mu \cdot A_{\text{wirk}} \cdot \bar{n}$$

Dabei bezeichnet  $A_{\text{wirk}} = A \cdot n$  die wirksame Querschnittsfläche der Spule,  $n$  die Wicklungszahl,  $\bar{n} = \frac{n}{l}$  die Wicklungsdichte,  $l$  die Spulenlänge und  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  die Permeabilität der Materials. Eingesetzt und nach der relativen Permeabilität aufgelöst ergibt sich:

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

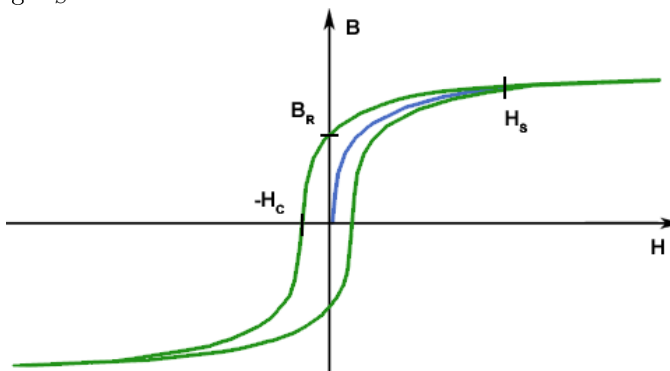
### 1.3 Induktiver Widerstand mit Luftspalt

Die gleiche Messung soll nun mit einem 2 mm großen Luftspalt<sup>1</sup> an einer Seite des Kerns wiederholt werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die magnetische Flussdichte  $B$  nicht ändert, da die Magnetfeldlinien geschlossen sein müssen<sup>2</sup>. Die magnetische Erregung  $H$  ändert sich aber, und damit auch die relative Permeabilität. Mit der obigen Formel berechnet man dann nur eine „scheinbare“ oder „wirksame“ relative Permeabilität des Eisenkerns mit Luftspalt.

## 2 Hysteresiskurven

Die magnetische Hysterese tritt bei ferromagnetischen Stoffen auf. In einer Hysteresiskurve werden die magnetische Flussdichte  $B$  über die Stärke der magnetischen Erregung  $H$  aufgetragen. Zu Beginn ist das Material noch nicht magnetisiert, sodass die Neukurve im Ursprung startet. Steigt nun  $H$  an, so wächst auch  $B = \mu_0 \mu_r H$  bis zu einem Maximum. Dies bezeichnet man als Sättigungsmagnetisierung  $H_S$ .

Wird  $H$  nun wieder auf Null gesenkt, geht  $B$  nicht auf Null zurück. Es bleibt eine Restmagnetisierung übrig, die man Remanenz  $B_R$  nennt. Um eine vollständige Entmagnetisierung zu erreichen, muss ein umgekehrtes Feld angelegt werden. Diese Stärke nennt man Koerzitivfeldstärke  $-H_C$ .



Wird  $H$  noch weiter erhöht<sup>3</sup>, so erreicht man auf der anderen Seite der Hysteresiskurve die Sättigung, und der Vorgang läuft entsprechend weiter.

### 2.1 Hysteresiskurve mit Widerstand

Nun soll die Magnetische Feldstärke  $B$  innerhalb des Luftspaltes des Kerns mit Luftspalt in Abhängigkeit vom Strom  $I$  gemessen werden. Dazu wird die Spule mit einem 600 $\Omega$ -Widerstand und einem Strommessgerät in Reihe geschaltet und die Stromstärke mit kleinen Schritten durch folgenden Zyklus geschaltet: 0 mA, 40 mA, 0 mA, -40 mA, 0 mA, 40 mA. Die Messung des  $B$ -Feldes geschieht mit einer Hallsonde. Da auch die Neukurve aufgenommen werden soll, muss der Kern zuerst wie in 1.1 entmagnetisiert werden.

Die gewonnenen  $B(I)$ -Kurve wird nicht einfach durch lineare Umskalierung zu einer Hysteresisschleife, da wegen des Luftspaltes  $H_s \cdot l_s + H \cdot l = n \cdot I$  gilt<sup>4</sup>. Es muss also ein Scherung durchgeführt werden mit:

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

Anschließend sollen aus den beiden Schaubilder über die mittlere Steigung der Hysteresiskurve die relativen Permeabilitäten bestimmt und mit den Ergebnissen aus Aufgabe 1 verglichen werden.

<sup>1</sup>In der Praxis wird kein Luftspalt, sondern ein Abstandsplättchen aus nicht ferromagnetischem Material benutzt.

<sup>2</sup> $\nabla \times \vec{B} = 0$

<sup>3</sup>diesmal allerdings in umgekehrter Polung

<sup>4</sup>Der Index  $s$  bezeichnet den Luftspalt

Die Verlustleistung lässt sich über die Fläche  $A$  der Hysteresisschleife und das Volumen  $V$  des Kerns berechnen:

$$P = \frac{W_{\text{pro Periode}}}{T} = V \cdot A \cdot f$$

## 2.2 Hysteresiskurve ohne Widerstand

Nun wird die Messung aus 2.1 wiederholt, aber diesmal ohne den  $600\Omega$ -Widerstand und bis zu Stromstärken von  $1,2\text{ A}$ . Außerdem sollen die Sättigungsmagnetisierung, die Remanenz und die Koerzitivkraft aus dem Diagramm bestimmt werden.

## 3 Magnetische Feldstärke in zylindrischen Spulen

### 3.1 Hallsondeneichung

In einer Hallsonde findet auf Grund des zu messenden Magnetfeldes eine Ladungstrennung statt. Die daraus resultierende Spannung  $U_H$  wird gemessen, um auf das Magnetfeld schließen zu können.

Bewegen sich die Elektronen in der Hallsonde mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  senkrecht zum Magnetfeld  $\vec{B}$ , so wirkt auf sie die Lorentzkraft, die im statischen Fall durch die elektrische Kraft, die bei der Trennung der Ladungen entsteht, kompensiert wird.

$$\begin{aligned} F_{\text{elektrisch}} &= F_{\text{Lorentz}} \\ e \cdot \frac{U_H}{d} = e \cdot E &= e \left| \vec{v} \times \vec{B} \right| = e \cdot v \cdot B \\ \Rightarrow B = \frac{U_H}{d \cdot v} &\Rightarrow B \propto U_H \end{aligned}$$

$d$  bezeichnet die Dicke der Hallsonde. Der Proportionalitätsfaktor soll nun experimentell bestimmt werden. Dazu messen wir bei einem Steuerstrom von  $I_H = 120\text{ mA}$  das Magnetfeld in der Mitte der Kalibrierspule bei einem Spulenstrom von  $I = 0,96\text{ A}$ . In der Mitte der Spule sinkt das Magnetfeld aufgrund eines Windungsspalt auf ein Minimum von  $B = 10\text{ mT}$  ab.

### 3.2 Magnetfeld einer Zylinderspule

Mit dieser Hallsonde soll jetzt das Magnetfeld einer Zylinderspule entlang der Achse innerhalb und außerhalb der Spule bei einem Spulenstrom von  $I = 2\text{ A}$  gemessen und zusammen mit den theoretischen Werten in einem Schaubild visualisiert werden. Die theoretischen Werte berechnet man über

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

Hierbei bezeichnet  $L$  die Länge der Spule,  $R$  den Radius der Spule und  $x$  der Abstand zum Mittelpunkt der Spule.

## 4 Inhomogenes Magnetfeld

Verschiedene Materialien kann man anhand ihrer magnetischen Eigenschaften in drei Klassen einteilen:

**paramagnetische Stoffe:** z.B: Aluminium. Sie haben eine Suszeptibilität  $\chi > 0$ , die durch Dipolmoleküle erzeugt wird, die im Normalfall zufällig ausgerichtet sind. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes richten sich die Dipole an den Magnetfeldlinien aus. Der Stoff wird damit in Bereiche großer Feldstärken gezogen.

**ferromagnetische Stoffe:** z.B: Eisen. Sie haben eine Suszeptibilität  $\chi \gg 0$ , und unterscheiden sich zusätzlich von den paramagnetischen Stoffen dadurch, dass sie eine Restmagnetisierung<sup>5</sup> behalten, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird.

**diamagnetische Stoffe:** z.B: Bismut. Sie haben eine Suszeptibilität  $\chi < 0$  und „arbeiten“ damit umgekehrt zu den paramagnetischen Stoffen. Der Stoff wird in Bereiche kleiner Feldstärken gezogen. Die Dipole sind anders als bei paramagnetischen Stoffen ohne Magnetfeld noch nicht vorhanden, sondern bilden sich erst beim Anlegen eines äußeren Feldes.

Dieses Verhalten soll überprüft werden, indem die drei Stoffe anfangs schräg zur Verbindungslinie zwischen den Polspitzen ausgerichtet werden. Das Magnetfeld zwischen den Polspitzen ist stark inhomogen. Die nun entstehenden Drehungen sollen Aufschluss über die Eigenschaften geben.

---

<sup>5</sup>Remanenz