

Auswertung

# Ferromagnetische Hysterese

## Versuch P1 83, 84

Iris Conradi, Melanie Hauck  
Gruppe Mo-02

19. August 2011



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Induktivität und Verlustwiderstand einer Lustspule</b>                         | <b>3</b> |
| 1.1      | Induktivität und Verlustwiderstand . . . . .                                      | 3        |
| 1.2      | Berechnung von Spuleninduktivität und Drahtwiderstand . . . . .                   | 5        |
| <b>2</b> | <b>Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern</b> | <b>5</b> |
| 2.1      | Induktivität und Verlustwiderstand . . . . .                                      | 5        |
| 2.2      | Wechselfeld-Permeabilität und Gesamtverlustleistung . . . . .                     | 6        |
| <b>3</b> | <b>Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste</b>                   | <b>7</b> |
| 3.1      | Magnetisierungskurve . . . . .  | 7        |
| 3.2      | Eichung der Achsen . . . . .  | 7        |
| 3.3      | Ummagnetisierungsverluste . . . . .   | 7        |
| 3.4      | relative Wechselfeld-Permeabilität . . . . .                                      | 8        |
| 3.5      | Vergleich der Ergebnisse . . . . .  | 8        |
| <b>4</b> | <b>Vergleich Eisen-Ferrit</b>   | <b>9</b> |

## 1 Induktivität und Verlustwiderstand einer Lustspule

### 1.1 Induktivität und Verlustwiderstand

Wir haben wie in der Aufgabenstellung gefordert und in der Vorbereitung erläutert die in Tabelle 1 gezeigten Messwerte erhalten. Dabei musste beachtet werden, dass die

| $I_{eff}$ | $U_{SS}$ | $U_{R,SS}$ | $\Delta t$ |
|-----------|----------|------------|------------|
| 300mA     | 12,61V   | 8,53V      | 2,71ms     |
| 30mA      | 1,254V   | 856mV      | 2,71ms     |

**Tabelle 1:** Messwerte Aufgabe 1.1

Spannung an einem Oszilloskopeingang invertiert werden musste, da von einem Bezugspotential (GND) aus in zwei „Richtungen“ gemessen wurde, wie man in Abbildung 1 sehen kann. Wir haben die Scheitel-Scheitel-Spannung beider Signale gemessen. Da die

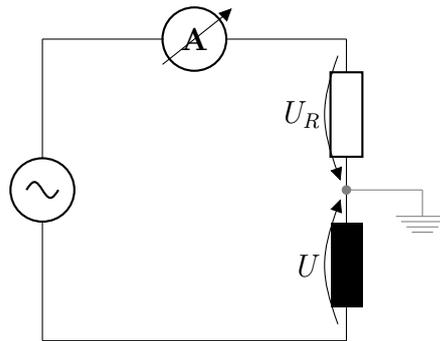


Abbildung 1: Schaltung

Spannungen in der Formel aus der Vorbereitung zur Berechnung von  $|Z|$  nur als Quotient vorkommen, muss man sie nicht in Amplituden umrechnen. Der Faktor 2 kürzt sich. Mit den Formeln aus der Vorbereitung ergibt sich:

- 300mA:
  - $|Z| = 14,78\Omega$
  - $\varphi = 0,85$
  - $r = 9,75\Omega$
  - $L = 35,34mH$
- 30mA:
  - $|Z| = 14,65\Omega$
  - $\varphi = 0,85$
  - $r = 9,67\Omega$
  - $L = 35,03mH$

Wie in dem Hinweis angegeben, sind Verlustwiderstand und Induktivität nicht vom Strom abhängig.

Um unsere Messergebnisse zu überprüfen, haben wir den Strom über den Widerstand berechnet und in den Effektivstrom umgerechnet (siehe Vorbereitung). Für die erste Messung ergibt sich 0,301A, dies passt sehr gut zu dem am Amperemeter abgelesenen Strom. Für die zweite Messung ergibt sich 0,03A, was dem gewünschten Ergebnis entspricht.

## 1.2 Berechnung von Spuleninduktivität und Drahtwiderstand

In der Vorbereitung haben wir den theoretischen Wert für die Induktivität berechnet. Unsere erste Messung hat dazu eine Abweichung von 4%, die zweite von 5%.

Der berechnete Drahtwiderstand und der gemessene Verlustwiderstand sind etwa gleich. Die Verluste entstehen also durch die Abwärme am ohmschen Widerstand des Drahtes.

## 2 Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern

### 2.1 Induktivität und Verlustwiderstand

Hier ergaben sich die in Tabelle 2 dargestellten Werte. Für 30mA war der Messbereich

| $I_{eff}$ | $U_{SS}$ | $U_{R,SS}$ | $\Delta t$ |
|-----------|----------|------------|------------|
| 30mA      | 9,39V    | 811,0mV    | 2,79ms     |
| 10mA      | 24,64V   | 286,5mV    | 4,15ms     |

**Tabelle 2:** Messwerte Aufgabe 2.1

des Oszilloskops bei der Spannung über die Induktivität nicht groß genug. Deshalb verwendeten wir einen in Reihe geschalteten Widerstand von  $8,9M\Omega$ . Die in Tabelle 2 aufgeführten Werte bei 30mA müssen also mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden, um die tatsächlichen Werte zu erhalten.

Das Oszilloskop hat einen Eingangswiderstand von  $1M\Omega$ . Es handelt sich also um einen Spannungsteiler ( $\frac{U_{R_{innen}}}{U_R} = \frac{R_{innen}}{R}$ ).

Die über den Eingangswiderstand des Oszilloskops abfallende Spannung ist die, die angezeigt wird. Es muss also die über den gesamten Spannungsteiler abfallende Spannung ( $U_{ges} = U_R + U_{R_{innen}}$ ) berechnet werden.

$$U_{ges} = \underbrace{\left( \frac{R}{R_{innen}} + 1 \right)}_{=9,9} U_{R_{innen}} \quad (1)$$

Unter Verwendung dieser Korrektur ergeben sich:

- 30mA:
  - $|Z| = 1157,83\Omega$
  - $\varphi = 0,87$
  - $r = 746,6\Omega$
  - $L = 2,8H$
  
- 10mA:
  - $|Z| = 860,03\Omega$
  - $\varphi = 1,30$
  - $r = 230\Omega$
  - $L = 2,64H$

Wie im Hinweis angegeben, sind Verlustwiderstand und Induktivität stark vom Strom abhängig.

## 2.2 Wechselfeld-Permeabilität und Gesamtverlustleistung

In der Vorbereitung ist die Formel zur Berechnung der Verlustleistung angegeben. Mit dem im vorhergehenden Aufgabenteil bestimmten Verlustwiderständen ergibt sich:

$$P_{30mA} = 0,672W \text{ und } P_{10mA} = 0,023W.$$

Um die Wechselfeld-Permeabilität nur aus den Ergebnissen von Aufgabe 2.1 und den angegebenen Daten zu berechnen lösen wir die Formel für die Induktivität einer Spule um

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

Die Formel aus der Vorbereitung kann nicht verwendet werden, da für Luftspule und Spule mit Eisenkern die Feldlinienlängen variieren, da der Eisenkern nicht nur in der Spule ist. Es ergeben sich also mit den obigen Werten  $\mu_r = 703,2$  für 30mA und  $\mu_r = 778$  für 10mA.

---

## 3 Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste

### 3.1 Magnetisierungskurve

Wir bauten die in der Vorbereitung beschriebene Schaltung auf. Da wieder eine Wechselspannung mit Frequenz 50Hz verwendet wurde und ein RC-Glied als Integrierer verwendet wurde, musste die Frequenz sehr viel größer als  $\frac{1}{RC}$  sein. Wir wählten  $R = 10k\Omega$  und  $10\mu F$ . Einmal versuchten wir es auch mit  $R = 100k\Omega$ , da wurde aber die Magnetisierungskurve zu schmal.

Wir haben die Magnetisierungskurve für 30mA und 10mA aufgenommen. Sie sind in Abbildung 2 zu sehen.

### 3.2 Eichung der Achsen

Nachdem nun die Dimensionierung des RC-Gleides bekannt ist, kann auch der Proportionalitätsfaktor für das B-Feld bestimmt werden. Er beträgt:  $1,32 \frac{s}{m^2}$ .

### 3.3 Ummagnetisierungsverluste

$\frac{W_{mag}}{V}$  bestimmen wir mittels Ausschneiden und Wiegen der Hysteresekurven. Wir verwenden:

$$\frac{W_{mag}}{V} = \epsilon_H x \cdot \epsilon_B y \cdot \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

Wobei  $\epsilon_h$  und  $\epsilon_B$  die in Aufgabe 3.2 berechneten Proportionalitätsfaktoren und x und y die Einteilung der Achsen in V/cm sind.  $\rho$  ist die Dichte des Papiers ( $80 \frac{g}{m^2}$ ). Somit ist  $\frac{m}{\rho}$  die Fläche des Papierstückes. Unsere Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt. Mit den in

| $I_{eff}$ | x                      | y                      | m       | $W_{mag}/V$           |
|-----------|------------------------|------------------------|---------|-----------------------|
| 30mA      | $37,037 \frac{mV}{cm}$ | $23,529 \frac{mV}{cm}$ | 0,7868g | $23,57 \frac{J}{m^3}$ |
| 10mA      | $14,815 \frac{mV}{cm}$ | $5,882 \frac{mV}{cm}$  | 0,1550g | $0,46 \frac{J}{m^3}$  |

**Tabelle 3:** Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen und Zyklus

der Vorbereitung genannten Formeln ergeben sich die in Tabelle 4 gezeigten Ergebnisse.

| $I_{eff}$ | $P_{Verlust}$ | $r_{Verlust}$   |
|-----------|---------------|-----------------|
| 30mA      | 0,86W         | 955,55 $\Omega$ |
| 10mA      | 0,017W        | 170 $\Omega$    |

**Tabelle 4:** Verlustleistung

### 3.4 relative Wechselfeld-Permeabilität

Zur Bestimmung der relativen Wechselfeld-Permeabilität verwenden wir jeweils das Wertepaar von B und H an der Spitze der Hysterese. Dieser Punkt ist der Beginn des Sättigungsbereiches. Wir mitteln also den Wert für die Permeabilität indem wir die insgesamte Verkippung der Kurve im Koordinatensystem betrachteten.

Es wird die Formel aus der Vorbereitung verwendet. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse zu sehen.

| $I_{eff}$ | H                   | B     | $\mu_r$ |
|-----------|---------------------|-------|---------|
| 30mA      | 84,18 $\frac{A}{m}$ | 0,16T | 1512,52 |
| 10mA      | 29,78 $\frac{A}{m}$ | 0,02T | 534,44  |

**Tabelle 5:** relative Wechselfeld-Permeabilität

### 3.5 Vergleich der Ergebnisse

Wir verwenden zum Vergleich, da der Drahtwiderstand in etwa stromunabhängig ist, berechnen wir die entsprechende Verlustleistung für 10mA mit dem arithmetischen Mittelwert unserer beiden Messungen  $r_{Draht} \approx 9,71\Omega$ .

- 10mA:
  - $P_{Draht} = 9,71 \cdot 10^{-4} W$
  - $P_{ummagn} = 0,017 W$
  - $P_{Summe} = 0,017971$

---

–  $P_{ges} = 0,023 W$

• 30mA:

–  $P_{Draht} = 8,7 mW$

–  $P_{ummagn} = 0,86 W$

–  $P_{Summe} = 0,8687 W$

–  $P_{ges} = 0,672 W$

Für 10mA liegt die Summe von Drahtwiderstands- und Ummagnetisierungsverlustleistung unterhalb der Gesamtverlustleistung, was auf Wirbelstromverluste zurückzuführen ist. Für 30mA gilt dies unerklärlicherweise nicht. Die Summe ist sogar größer, was eigentlich physikalisch unmöglich ist.

Die Wechselfeld-Permeabilitäten passen nicht zusammen. Die Wechselfeld-Permeabilität ist bei Ferromagneten abhängig vom angelegten magnetischen Feld. Beide Verfahren zur Bestimmung dieser Permeabilität sind also nur Näherungen, da sie ein konstantes Ergebnis liefern.

## 4 Vergleich Eisen-Ferrit

In Abbildung 3 sind die aufgenommenen Magnetisierungskurven abgebildet. Da andere Spulen verwendet wurden, müssen die Proportionalitätsfaktoren zur Eichung der Achsen neu berechnet werden. Als Primärspulen wurde jeweils 250 Windungen verwendet, als Sekundärspule 50 Windungen.

Die Proportionalitätsfaktoren für die Messung mit dem Eisenkern sind:

$$\epsilon_H = 52,08 \frac{A}{Vm}, \epsilon_B = 1,32 \frac{s}{m^2} \text{ (wie zuvor).}$$

Die Proportionalitätsfaktoren für die Messung mit dem Ferrit-Schalenkern sind:

$$\epsilon_H = 238,1 \frac{A}{Vm}, \epsilon_B = 3,2 \frac{s}{m^2}.$$

Mithilfe der Messwerte, die im Messprotokoll zu finden sind und den obigen Eichfaktoren haben wir folgende Ergebnisse erhalten:

- Remanenz: 0,342T (für Eisen), 0,017T (für Ferrit)
- Koerzitivkraft:  $-93,74 \frac{A}{m}$  (für Eisen),  $-5,64 \frac{A}{m}$  (für Ferrit)
- Sättigungsinduktion: 0,46T (für Eisen), 0,14T (für Ferrit)

#### 4 Vergleich Eisen-Ferrit

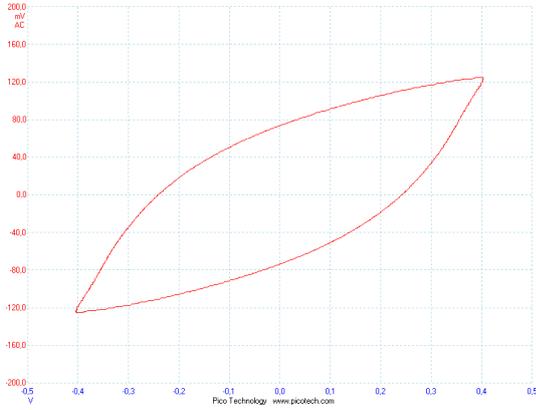
---

Die Ummagnetisierungsverlustleistung ergibt sich wie oben zu den in Tabelle 6 gezeigten Werten.

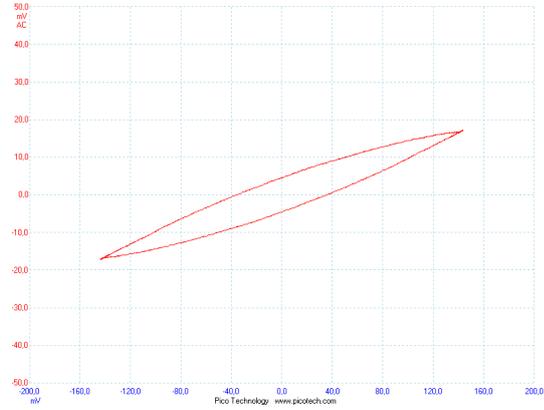
|        | x                      | y                      | m       | $W_{mag}/V$            | $P_{Verlust}$ |
|--------|------------------------|------------------------|---------|------------------------|---------------|
| Eisen  | $400 \frac{mV}{cm}$    | $52,632 \frac{mV}{cm}$ | 0,7013g | $126,87 \frac{J}{m^3}$ | 4,63W         |
| Ferrit | $37,037 \frac{mV}{cm}$ | $14,286 \frac{mV}{cm}$ | 0,0927g | $4,67 \frac{J}{m^3}$   | 15,3mW        |

**Tabelle 6:** Eisen und Ferrit

Für Spulen hoher Güte eignet sich vor allem der Ferritkern, da er eine geringe Ummagnetisierungsverlustleistung hat. Die hohe Sättigungsinduktion des Eisenkerns prädestiniert ihn für die Verwendung in Elektromagneten.

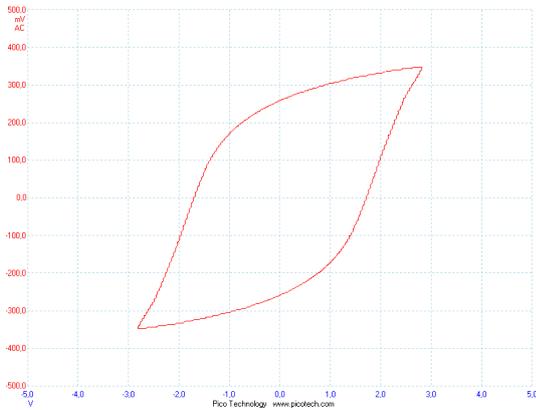


(a) 30mA

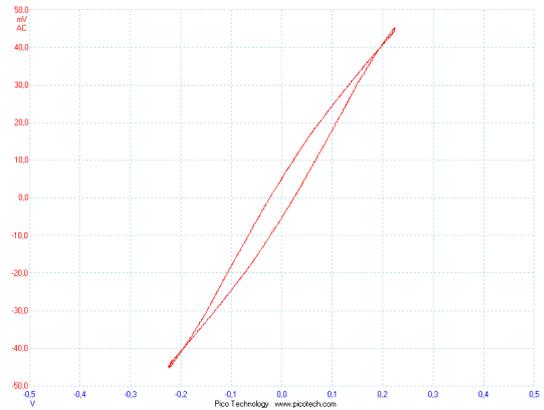


(b) 10mA

Abbildung 2: Aufgabe 3



(a) Eisen



(b) Ferrit

Abbildung 3: Aufgabe 4