

**Zusammenfassung**

# **v308 - Spulen und Magnetfelder**

Max Rademacher  
max.rademacher@tu-dortmund.de

21.06.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

# 1 Ziel

Messung der Magnetfelder verschiedener Spulenanordnungen

## 2 Theorie

### 2.1 Allgemein

- Bewegte Ladungen erzeugen Magnetfelder
- Manche Materialien besitzen grundlegendes mag. Moment durch Elektronenbewegung
  - mag. Momente können durch Wärmebewegung statistisch verteilt sein
  - $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ ;  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
- jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt Magnetfeld
  - $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$

### 2.2 Solenoid

- langgestreckte stromdurchflossene Spule
- Magnetfeld in Mitte der Spule konstant, Feldlinien parallel zur Symmetrieachse
- Feld ist innen homogen:
  - $B = \mu_r \mu_0 \frac{n}{l} I$ ;  $n$  : Windungszahl,  $l$  : Länge
- außen inhomogen (fächert sich breit auf)

### 2.3 Toroid

- ringförmiges Solenoid
- ist  $r_T \ll l$ , dann keine Randeffekte  $\rightarrow$  kein Feld außerhalb des Toroids
- homogenes Magnetfeld innerhalb
  - $B = \mu_r \mu_0 \frac{n}{2\pi r_T} I$ ;  $l = 2\pi r_T$

## 2.4 Helmholtzspulenpaar

- zwei gleichsinnig durchflossene Kreisspulen, Strom  $I$
- Abstand der Spulen  $R$  = Radius der Kreisspulen (optimal)
- Ursprung im Zentrum beider Spulen, wenn  $d \neq R$ :
  - $B(0) = B(x) + B(-x) = \frac{\mu_0 I R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$
- homogenes Magnetfeld im Zentrum entlang Symmetrieachse
- Feldgradient im Idealfall auf Symmetrieachse vernachlässigbar:
  - $\frac{dB}{dx} = -3\mu_0 I R^2 \frac{x}{(R^2 + x^2)^{5/2}}$

## 2.5 Diamagnetismus

- erst magnetische Dipole durch anliegendes Magnetfeld
  - richten sich antiparallel zum Magnetfeld aus
- Suszeptibilität  $\chi_{\text{Dia}} < 0$ ;  $\chi_{\text{Dia}} = \text{const}$

## 2.6 Paramagnetismus

- magnetische Momente richten sich im Magnetfeld aus  $\rightarrow$  Magnetfeld wird verstärkt
- Suszeptibilität  $\chi_{\text{Para}} > 0$ ;  $\chi_{\text{Para}}$  temperaturabhängig
  - $\chi_{\text{Para}} = \frac{C}{T}$ ;  $C$  : Materialkonstante

## 2.7 Ferromagnetismus

- fundamentale Dipole in weißchen Bezirken  $\rightarrow$  permanentes Magnetfeld, aber durch statistische Verteilung der weißchen Bezirke ist das Gesamtmagnetfeld null
- Dipole richten sich bei äußerem Magnetfeld aus
  - eigen generiertes Magnetfeld abhängig von äußerem Magnetfeld
  - wenn in Spule gebracht, lautet  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$ ,  $\vec{M}$  ist Magnetisierung  $\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$
  - relative Permeabilität von Ferromagneten bei  $10^2 \text{ V s/(A m)}$  –  $10^7 \text{ V s/(A m)}$

## 2.8 Hysteresekurve

- ferromagnetische Materialien können permanent magnetisiert werden,  $\mu_r$  hoch, nichtlinear
- Hysteresekurve für Material nicht eindeutig, von Vorgeschichte abhängig
- bei Erhöhung von äußerem Magnetfeld steigt Magnetisierung des Materials an bis Sättigungswert  $B_S$  erreicht ist (Neukurve)
- Verringerung von Magnetfeld bildet entgegengesetzte Dipole im Material  $\rightarrow$  Magnetisierung sinkt (2)
- bei abgeschaltetem Magnetfeld verbleibt Remanenz  $B_r$ , aufhebbar durch Koerzitivkraft  $H_c$
- durch weiteres senken des Magnetfeldes ins negative wird Magnetisierung negativ bis zur Sättigung  $-B_S$
- bei erneuter Erhöhung entsteht symmetrische Kurve zu (2), materialabhängig
- differentielle Permeabilität  $\mu_{\text{diff}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$

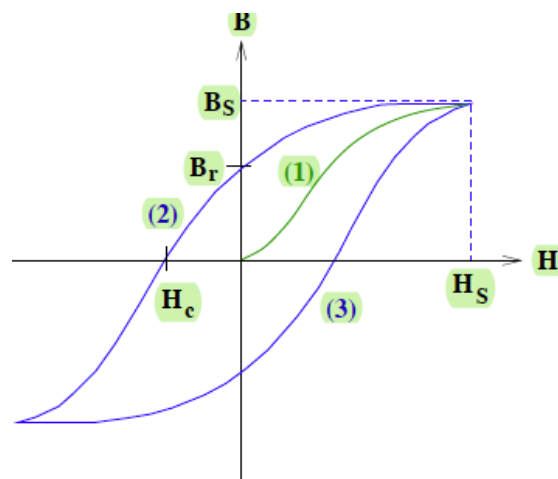


Abbildung 1: Hysteresekurve

## 2.9 Funktionalität einer Hall-Sonde

- Steuerstrom fließt in  $x$ -Richtung durch dünne Leiterplatte
- B-Feld fließt senkrecht in  $z$ -Richtung dazu
- $\Rightarrow$  Elektronen des Stroms werden durch Lorentzkraft abgelenkt ( $y$ -Richtung)  $\rightarrow$  Elektronenüberschuss und -Mangel auf jeweils einer Seite  $\rightarrow$  Hallspannung

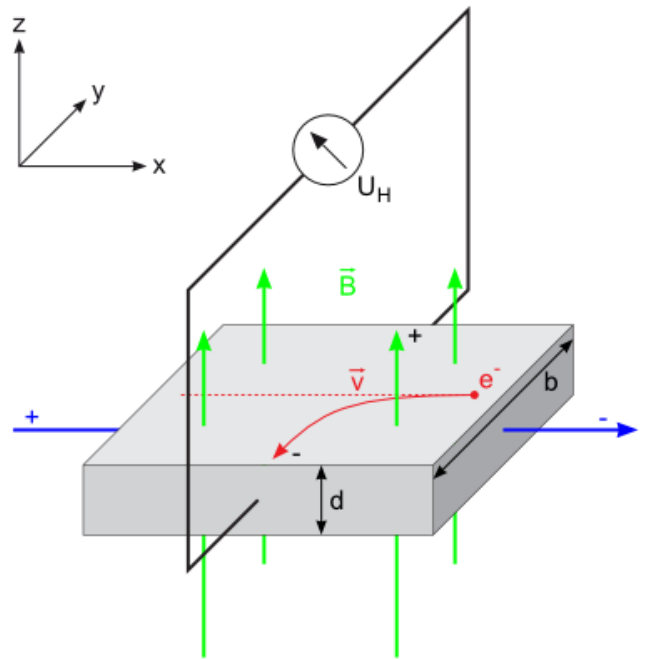


Abbildung 2: Hallsonde

### 3 Durchführung/Auswertung

#### 3.1 Magnetfeld von Spulenpaar

##### 3.1.1 Durchführung

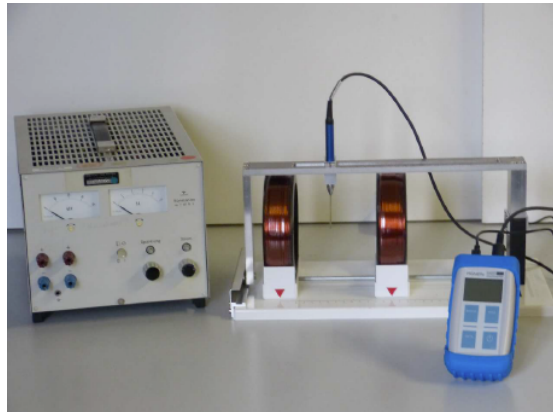


Abbildung 3: Spulenpaar.

- Spulen werden in Reihe geschaltet (damit gleicher Strom [5 A] an beiden Spulen)

- drei verschiedene Spulenabstände, Vermessung von B-Feld inner- und außerhalb der Spule mit transversaler Hallsonde

### 3.1.2 Auswertung

- Magnetfeldstärke ist abhängig von Position relativ zum Spulenpaar und Abstand der Spulen
- Werte lagen relativ nah an der Theorie

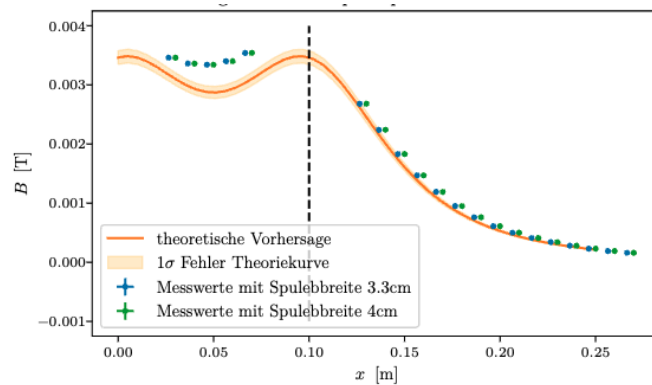


Abbildung 4: Spulenpaar bei kleinstem Abstand

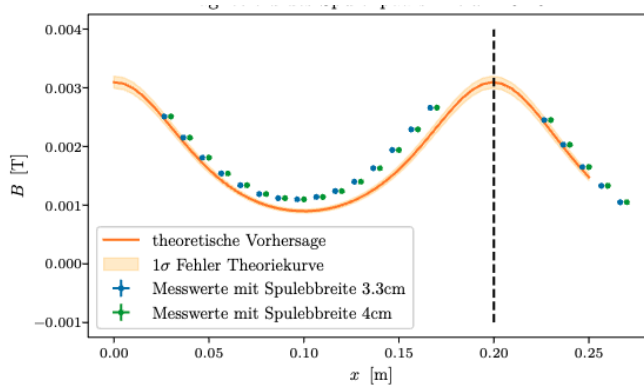


Abbildung 5: Spulenpaar bei größtem Abstand

## 3.2 Hysterese

### 3.2.1 Durchführung

- Toroidspule mit Eisenkern innerhalb, Netzgerät zur Regelung des Spulenstroms und transversale Hallsonde in Zwischenraum der Spule

- Aufnehmen der Neukurve: schrittweises Erhöhen des anliegenden Stroms bis Sättigungswert  $B_S$  erreicht ist
- Reduzieren des Stroms auf 0 A → Ablesen der Remanenz von Eisenkern
- Umpolen der Spule → Aufnahme der Koerzitivkraft, wenn generiertes  $B$ -Feld = null → Erhöhung des Stroms bis negativ. Sättigungswert  $-B_S$  erreicht
- Reduzieren des Stroms → Umpolung und Erhöhung zum Sättigungswert

### 3.2.2 Auswertung

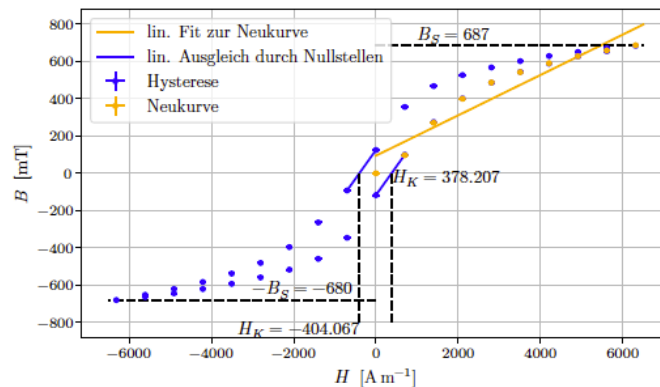


Abbildung 6: Hysterese

- Sättigungswert bei  $B_S \approx 700$  mT
- Koerzitivkraft bei  $H_K \approx 400$  A/m
- $\mu_{diff}$  durch lineare Ausgleichsgerade →  $\mu_{diff} \approx 100$  T m/A
- Versuch war schlecht durchzuführen, da Hysteresekurve von Vorgeschichte des Materials abhängig → es blieb eine Restmagnetisierung des Eisenkerns am Anfang übrig, die Ergebnisse verfälscht
- Strom konnte nicht voll aufgedreht werden → es konnte nicht vollständig ein Sättigungswert erreicht werden

## 3.3 Spulen

### 3.3.1 Durchführung

- kurze und lange Spule, Netzgerät zur Spannungs- und Stromregelung
- Einstellen eines konstanten Spulenstroms → Vermessung des Magnetfeldes innerhalb der Spule mittels longitudinaler Hallsonde

### 3.3.2 Auswertung

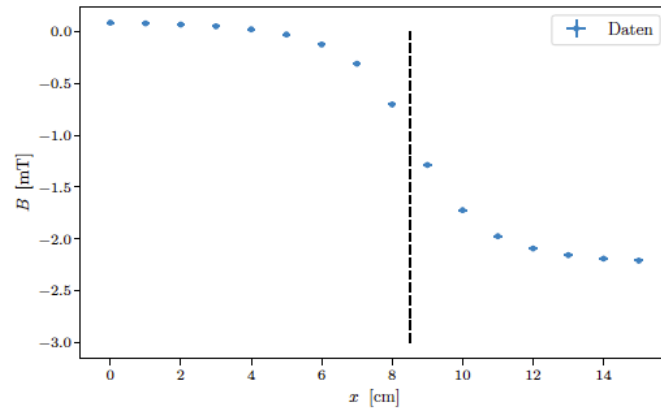


Abbildung 7: lange Spule

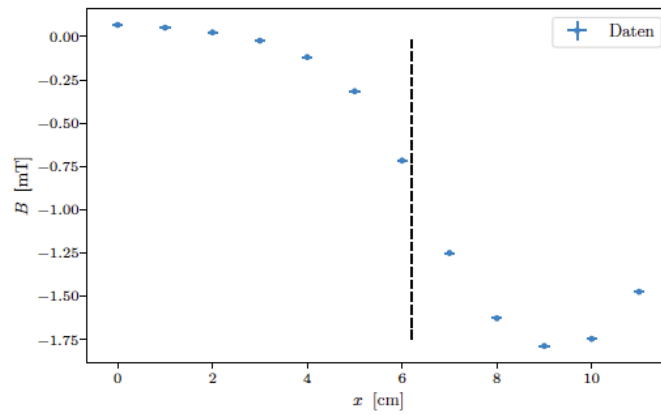


Abbildung 8: kurze Spule

- Ermittlung der Spulenlänge mittels der Messwerte
$$l = \mu_r \mu_0 \frac{n \cdot I}{B}$$
- $B_{kurz} \approx 1,5 \text{ mT}$
- $B_{lang} \approx 2 \text{ mT}$
- experimentelle Werte waren nah an der theoretischen Vorhersage

## 4 Allgemeines zur Diskussion

- Auswirkungen des Erdmagnetfeldes sind zu vernachlässigen ( $1 \text{ mT} \gg B_{erd} = 70 \mu\text{T}$ )