



# Induktionsversuch

---

## 1 Vorbereitung

---

- Erzeugung und Nachweis magnetischer Felder
- Induktion, Lenz'sche Regel
- Magnetisierung von Materie (Dia-, Para-, Ferromagnetismus)
- Hysterese
- ballistisches Galvanometer
- Gauß-Verteilung, Mittelwert, Standardabweichung
- **zusätzlich für Studiengang Bauingenieurwesen, Geodäsie, Umweltingenieurwesen, Angew. Geowiss.:** zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (besonders Wirbelstromprüfung und Magnetpulverprüfung)

---

### 1.1 Literatur

---

- Feynman *Lectures on Physics*
- Halliday-Resnick *Physik* Band 2 (Aufl. 1994)
- Gerthsen *Physik*
- Bergmann-Schäfer *Elektrizitätslehre und Magnetismus*
- Merkblatt .A., Auswertung physikalischer Messungen
- Literaturliste
- Ergänzende Literatur: Berkeley Physik Kurs 4: Elektrizität und Magnetismus.

**Mitzubringende Hilfsmittel:** 1 Blatt Millimeterpapier

---

### 1.2 Teileliste

---

- 1 Feldspule mit  $L = 44 \text{ cm}$ ,  $N = 500$ ,  $A = 13.2 \text{ cm}^2$
- 1 Induktionsspule mit  $n = 250, 500, 750, 1000$
- 1 Netzgerät mit Amperemeter, 1 Schalter, 9 Leitungen
- 1 Eisenkern mit  $A_0 = 0.2 \text{ cm}^2$ ,
- 1 Messingkern mit  $A_0 = 0.2 \text{ cm}^2$

**Zusammenstellung der im Folgenden benutzten Größen :**

Größe	Bedeutung	SI-Einheit
$\vec{H}$	magnetische Feldstärke	A/m
$\vec{B}$	magnetische Induktion oder Kraftflussdichte	Vs/m <sup>2</sup> = T (Tesla)
$\vec{M}$	Magnetisierung	A/m
$\Phi$	magnetischer Kraftfluss	Vs = Wb (Weber)
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	Vs/Am
$\mu_r$	relative Permeabilität	-
$\chi = \mu_r - 1$	magnetische Suszeptibilität	-
$n$	Windungszahl der Induktionsspule	-
$N$	Windungszahl der Feldspule	-
$d\vec{s}$	Wegelement	m
$d\vec{A}$	Flächenelement	m <sup>2</sup>
$U_i$	induzierte Spannung	V
$\vec{j}$	Stromdichte	A/m <sup>2</sup>
$I_F$	Strom in der Feldspule	A
$I_i$	induzierter Strom, = $U_i/R_{\text{äG}}$	A

**2 Grundlagen**

Grundlage für diesen Versuch sind zwei der vier Maxwell'schen Gleichungen, die aus experimentellen Erfahrungstatsachen (Ampere, Faraday) abgeleitet wurden, das Durchflutungsgesetz (1) und das Induktionsgesetz (2):

$$\oint_{C(\vec{A})} \vec{H} \cdot d\vec{s} = N \cdot I_F = \int_{\vec{A}} \vec{j} \cdot d\vec{A} \tag{1}$$

$$U_i = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{mit} \quad \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \tag{2}$$

Die *geschlossene* Kurve  $C(\vec{A})$  begrenzt dabei die Fläche  $\vec{A}$ , die von der Stromdichte  $\vec{j}$  durchsetzt wird. Im vorliegenden Fall wird eine Feldspule mit der Windungszahl  $N$ , der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $L$  von einer Induktionsspule mit variabel einstellbarer Windungszahl  $n$  umschlossen. Wird die Feldspule von einem elektrischen Strom  $I_F$  durchflossen, so wird ein magnetisches Feld aufgebaut, das in einer langen Spule weitgehend homogen ist. Für diesen Fall vereinfacht sich Gleichung (1) in der Spulenmitte zu

$$H = \frac{N \cdot I_F}{L} \tag{3}$$

Die magnetische Induktion  $\vec{B}$  ist allgemein

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \tag{4}$$

wobei  $\vec{H}$  und  $\vec{M}$  einen beliebigen Winkel einschließen können. Für dia- und paramagnetische Stoffe, aber auch für ferromagnetische Stoffe im *linearen* Bereich der Hystereseurve, gilt für die Magnetisierung

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \tag{5}$$

Damit wird Gl. (4) zu

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \tag{6}$$

ändert sich der magnetische Kraftfluss zeitlich, so wird nach Gl. (2) in der Induktionsspule eine Spannung induziert. Die Stromstärkenänderung  $\Delta I_F$  in der Feldspule ergibt nach Gl. (2) bis (6) einen Spannungstoß

$$\left| \int U_i \cdot dt \right| = n \cdot \Delta \Phi = \frac{\mu_0 n N \Delta I_F}{L} \cdot (A - A_0 + \mu_r A_0) \quad (7)$$

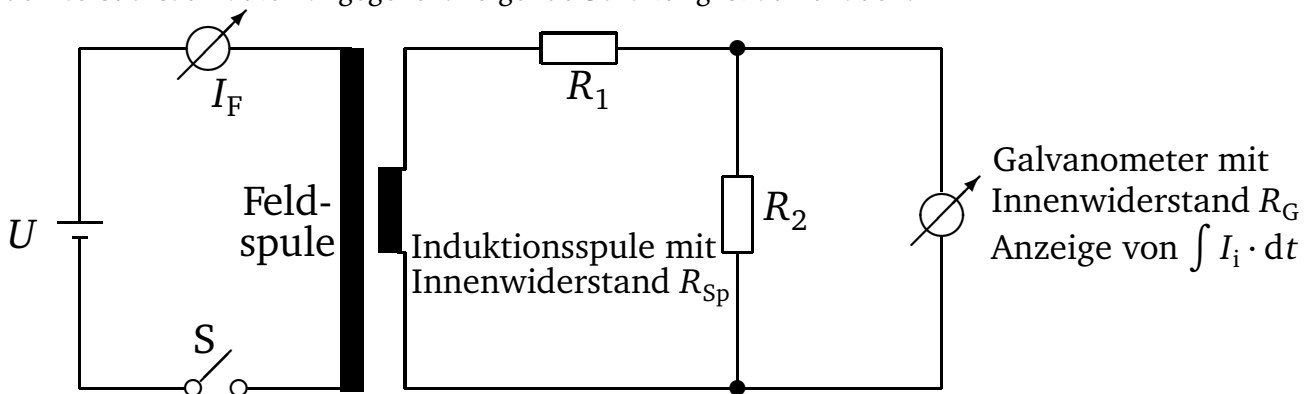
Dabei ist  $A_0$  die mit Materie ausgefüllte Fläche der Feldspule.

### 3 Versuchsdurchführung

In einem Primärkreis befindet sich eine Feldspule mit Windungszahl  $N$ . Der Feldstrom  $I_F$  wird mit einem Netzgerät geregelt. Durch öffnen und schließen des Schalters  $S$  kommt es in der Induktionsspule mit variabler Windungszahl  $n$  zu einem Spannungstoß, der von einem als Integrator funktionierenden ballistischen Galvanometer im aperiodischen Grenzfall gemessen wird. Der Spannungstoß hat einen Ausschlag  $\hat{\alpha}$  zur Folge, der über eine Skala abgelesen wird. Der Ausschlag ist proportional zum Spannungstoß, also nach (7) auch proportional zur Änderung des magnetischen Flusses:

$$n \cdot \Delta \Phi(\hat{\alpha}) = R_{\text{äG}} \cdot \int I_i \cdot dt = (R_{\text{äG}} \cdot B_I) \cdot \hat{\alpha} \quad (8)$$

Dazu muss das Galvanometer mit dem sogenannten äußeren Grenzwiderstand  $R_{\text{äG}}$  abgeschlossen werden.  $R_{\text{äG}}$  ergibt sich aus Reihen- bzw. Parallelschaltung der Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{\text{Sp}}$  und  $R_G$ .  $B_I = \int I_i dt / \hat{\alpha}$  ist der ballistische Eichfaktor des Galvanometers. Die Zahlenwerte für  $R_{\text{äG}}$  und  $B_I$  sind bei den Versuchsaufbauten angegeben. Folgende Schaltung ist aufzubauen:



### 4 Aufgaben

- Zu Hause vorbereiten:** Benutzen Sie die Definition (2) des magnetischen Kraftflusses  $\Phi$  und den linearen Zusammenhang zwischen Flussänderung  $\Delta \Phi$  und dem Ausschlag  $\hat{\alpha}$  des Galvanometers, um die Beziehung

$$M_r = \frac{R_{\text{äG}} \cdot B_I}{n \cdot \mu_0 \cdot A_0} \cdot |\hat{\alpha}_{\text{ein}} - \hat{\alpha}_{\text{aus}}| \quad (9)$$

für die Restmagnetisierung  $M_r$  herzuleiten.

**Hinweis:**  $\hat{\alpha}_{\text{ein}}$  und  $\hat{\alpha}_{\text{aus}}$  sind dabei die Ausschläge des Galvanometers beim Einschalt- bzw. Ausschaltvorgang, hervorgerufen durch die Änderung der Magnetisierung um  $\Delta M_{\text{ein}}$  bzw.  $\Delta M_{\text{aus}}$ . Benutzen Sie *nicht* die für Ferromagneten i.a. ungültigen Formeln

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad \text{und} \quad M = \chi H \quad (10)$$

sowie alle daraus abgeleiteten Formeln. Wegen der eintretenden Sättigung gilt Gl. (5) nicht mehr. Benutzen Sie deshalb den allgemeinsten Ausdruck Gl. (4), der hier auch skalar richtig ist.

2. **Zu Hause vorbereiten:** Stellen sie die für Aufgabe 4. und 6. benötigten Formeln auf, um  $\mu_0$  bzw.  $\mu_r$  aus den Messwerten berechnen zu können.
3. Bestimmen Sie die Flussänderung  $n \cdot \Delta\Phi \propto \hat{\alpha} = f(n)$  für  $n = 250, 500, 750, 1000$  bei konstantem  $\Delta I_F$ , und stellen Sie das Ergebnis grafisch auf Millimeterpapier dar.  $\Delta I_F$  ist so zu wählen, dass bei  $n = 1000$  die Galvanometerskala voll ausgenutzt wird.
4. Bestimmen Sie  $n \cdot \Delta\Phi \propto \hat{\alpha} = f(\Delta I_F)$  für  $n = 1000$  (grafische Darstellung auf Millimeterpapier). Bestimmen Sie Mittelwert  $\bar{\mu}_0$  und Standardabweichung  $\sigma(\mu_0)$  sowie die Unsicherheit  $\Delta\bar{\mu}_0$  des Mittelwertes.
5. Messen Sie die Flussänderung  $n \cdot \Delta\Phi$  bei  $I_F = 1 \text{ A}$  und  $n = 1000$  mit dem Messingstab in der Spule. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem aus Aufgabe 4.
6. Im Fall eines Ferromagneten definiert man ein feldabhängiges  $\mu_r(H) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial H}$ .  
Bestimmen Sie an einem Eisenstab näherungsweise das  $\mu_r$  aus  $\frac{\Delta B}{\Delta H}$  sowie die Restmagnetisierung  $M_r$ , und zwar für  $I_F = 0,2 \text{ A}$  und  $n = 250$  (jeweils 3 Messungen).  
Unter welcher Bedingung würde  $M_r$  mit der Remanenz  $M_R$  übereinstimmen? Prüfen Sie mit einer Messung nach, ob diese Bedingung im vorliegenden Fall erfüllt ist.  
Weshalb ist der Eisenstab vor jeder Messung zu entmagnetisieren?
7. **Zusatzaufgabe für Studiengang Bauingenieurwesen, Geodäsie, Umweltingenieurwesen, Angew. Geowiss. (kann bereits zu Hause erledigt werden):** Erläutern Sie die Ziele der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Beschreiben Sie die Vorhergehensweise der Wirbelstrom- und Magnetpulverprüfung. Welche der beiden Verfahren wählen Sie, wenn sie die Oberfläche von Ferriten auf Risse überprüfen müssen (Begründung!).  
Anmerkung: Ferrite sind elektrisch schlecht oder nicht leitende ferrimagnetische (eine schwächere Form des Ferromagnetismus) keramische Werkstoffe.