



Induktionsversuch

1 Vorausgesetzte Kenntnisse

1. Erzeugung und Nachweis magnetischer Felder
2. Induktion, Lenz'sche Regel
3. Magnetisierung von Materie (Dia-, Para-, Ferromagnetismus)
4. Hysterese
5. Ballistisches Galvanometer
6. bester Schätzwert, Unsicherheit, grafische Auswertung von Geraden, Student-Verteilung
7. **Zusätzlich für Studiengang Bauingenieurwesen, Geodäsie, Unweltingenieurwesen, Angew. Geowiss.:** zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (besonders Wirbelstromprüfung und Magnetpulverprüfung)

2 Mitzubringende Hilfsmittel

Bringen Sie folgende Materialien mit:

- 1 Blatt Millimeterpapier

3 Literatur

- **Feynman, R. P.:** *The Feynman lectures on physics: 2. Mainly electromagnetism and matter*, New millenium ed., Basic Books, New York, 2010.
- **Halliday, D., Walker, J., Resnick, R.:** *Halliday Physik*, 3. überarb. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2018. (erhältlich als E-Book über die ULB)
- **Meschede, D.:** *Gerthsen Physik*, 25. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015. (erhältlich als E-Book über die ULB)
- **Raith, W., Bergmann, L., Schaefer, C.:** *Elektromagnetismus*, 9. überarb. Auflage, de Gruyter Verlag, Berlin, 2006.
- Merkblatt .A., *Auswertung physikalischer Messungen*
- Ergänzende Literatur in der Mappe zu Versuch E6
- Ergänzende Literatur: **Purcell, E. M.:** *Elektrizität und Magnetismus*, 4. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1989.

4 Teileliste

- 1 Feldspule mit $L = (44,0 \pm 0,1) \text{ cm}$, $N = 500,0 \pm 1,2$, $A = 13,2 \text{ cm}^2$,
- 1 Induktionsspule mit $n = 250,0 \pm 1,2, 500,0 \pm 1,2, 750,0 \pm 1,2, 1000,0 \pm 1,2$,
- 1 Netzgerät mit Amperemeter, 1 Schalter, 9 Leitungen,

- 1 Eisenkern mit $A_0 = (0,20 \pm 0,01) \text{ cm}^2$,
- 1 Messingkern mit $A_0 = (0,20 \pm 0,01) \text{ cm}^2$.

Zusammenstellung der im Folgenden benutzten Größen:

Größe	Bedeutung	SI-Einheit
\vec{H}	magnetische Feldstärke	A m^{-1}
\vec{B}	magnetische Induktion oder Kraftflussdichte	$\text{Vs m}^{-2} = \text{T (Tesla)}$
\vec{M}	Magnetisierung	A m^{-1}
Φ	magnetischer Kraftfluss	$\text{Vs} = \text{Wb (Weber)}$
μ_0	magnetische Feldkonstante	$\text{Vs A}^{-1} \text{m}^{-1}$
μ_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^2
U_i	induzierte Spannung	V
\vec{j}	Stromdichte	A m^{-2}
I_F	Strom in der Feldspule	A
I_i	induzierter Strom, $= U_i/R_{aG}$	A

5 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):

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

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

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

$$H = \frac{N \cdot I_F}{L}. \quad (3)$$

Die magnetische Induktion \vec{B} ist allgemein

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

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

$$\vec{M} = \chi \vec{H}. \quad (5)$$

Damit wird Gl. (4) zu

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

Ändert sich der magnetische Kraftfluss zeitlich, so wird nach Gl. (2) in der Induktionsspule eine Spannung induziert. Die Stromstärkenänderung ΔI_F in der Feldspule ergibt nach Gl. (2) bis (6) einen Spannungstoß

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

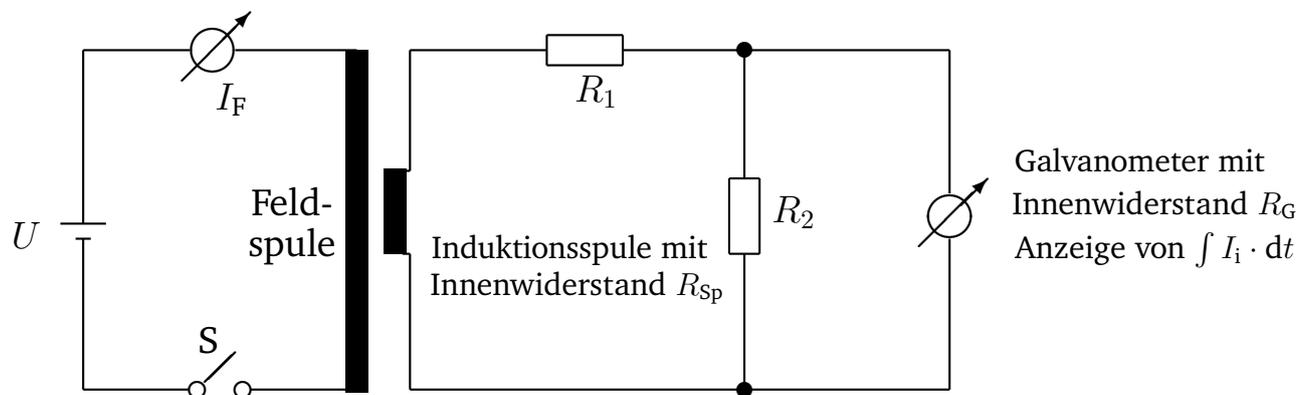
Dabei ist A_0 die mit Materie ausgefüllte Fläche der Feldspule.

6 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:

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

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



7 Hausaufgaben

Vor dem Praktikumstermin zu Hause zu erledigen:

1. Benutzen Sie die Definition (2) des magnetischen Kraftflusses Φ und den linearen Zusammenhang zwischen Flussänderung $\Delta\Phi$ und dem Ausschlag $\hat{\alpha}$ des Galvanometers, um die Beziehung

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

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 ΔM_{ein} bzw. ΔM_{aus} . Benutzen Sie *nicht* die für Ferromagneten i. Allg. 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. Stellen Sie die für Präsenzaufgaben 2 und 4 benötigten Formeln auf, um μ_0 bzw. μ_r aus den Messwerten berechnen zu können.

8 Präsenzaufgaben

1. Bestimmen Sie die Flussänderung $n \cdot \Delta\Phi \propto \hat{\alpha} = f(n)$ für $n = 250, 500, 750, 1000$ bei konstantem ΔI_F , und stellen Sie das Ergebnis grafisch auf Millimeterpapier dar. ΔI_F ist so zu wählen, dass bei $n = 1000$ die Galvanometerskala voll ausgenutzt wird.
2. Bestimmen Sie $n \cdot \Delta\Phi \propto \hat{\alpha} = f(\Delta I_F)$ für $n = 1000$ (grafische Darstellung auf Millimeterpapier). Bestimmen Sie den besten Schätzwert $\hat{\mu}_0$ und dessen Unsicherheit $u(\hat{\mu}_0)$, indem Sie eine Gerade an die Messdaten anpassen und deren Steigung graphisch ermitteln. Hinweis: Eine Ausgleichsgerade geht immer durch den Schwerpunkt der Daten, also durch $(\overline{\Delta I_F}, \overline{\hat{\alpha}})$.
3. 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 Präsenzaufgabe 2.
4. 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 μ_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, verwenden Sie für die Unsicherheit des besten Schätzwerts die Gleichung für die Standardabweichung nach der Student-Verteilung).

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?

-
5. **Zusatzaufgabe für Studiengang Bauingenieurwesen, Geodäsie, Umweltingenieurwesen, Angew. Geowiss. (kann bereits zu Hause erledigt werden):** Erläutern Sie die Ziele der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Beschreiben Sie die Vorgehensweise 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.