

## Elektrizitätslehre

Elektromagnetische Induktion

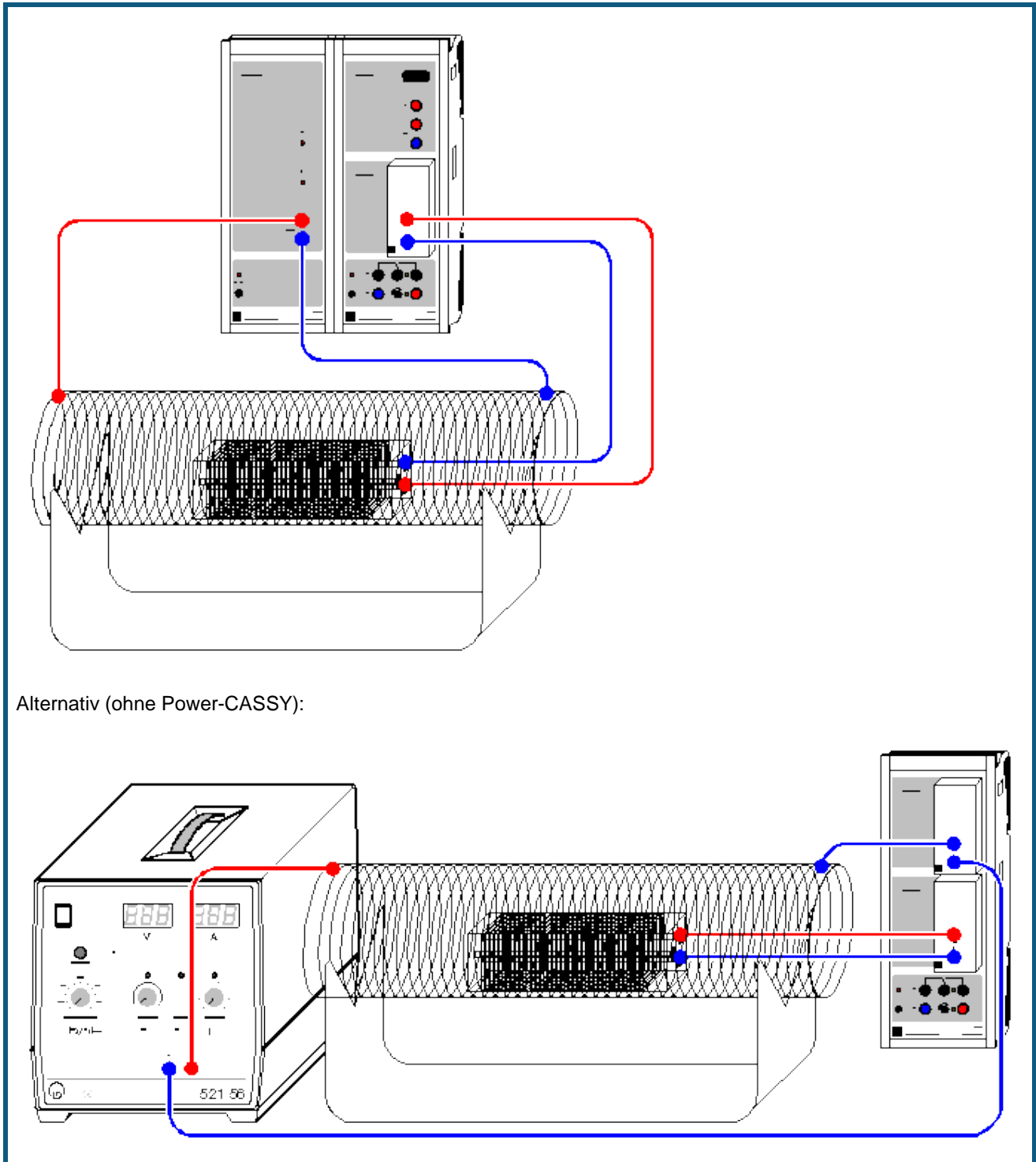
*Induktion durch ein veränderliches Magnetfeld*

Messung der  
Induktionsspannung in einer  
Leiterschleife bei  
veränderlichem Magnetfeld  
- mit Power-CASSY als  
variable Stromquelle

### Beschreibung aus CASSY Lab 2

Zum Laden von Beispielen und  
Einstellungen bitte die CASSY Lab 2-Hilfe  
verwenden.

## Induktion durch ein veränderliches Magnetfeld



Alternativ (ohne Power-CASSY):

 auch für [Pocket-CASSY](#) und [Mobile-CASSY](#) geeignet

### Versuchsbeschreibung

Spannungen und Ströme, die durch Veränderung von Magnetfeldern entstehen, nennt man Induktionsspannungen bzw. Induktionsströme, den Vorgang selbst magnetische Induktion. Befindet sich in einem Magnetfeld  $\mathbf{B}$  eine Leiterschleife, so ist der sie durchsetzende magnetische Fluss durch das Leiterschleifenflächenintegral

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

gegeben. Handelt es sich anstelle der Leiterschleife um eine Spule mit  $N_1$  Windungen, die sich alle senkrecht zum Magnetfeld befinden, dann vergrößert sich  $\Phi$  entsprechend zu

$$\Phi = B \cdot A \cdot N_1.$$

Ändert sich das Magnetfeld  $B$  nicht, dann bleibt auch der magnetische Fluss  $\Phi$  konstant. Bei zeitlicher Änderung des Magnetfeldes und somit des magnetischen Flusses durch die Spulenfläche wird in der Spule eine Spannung und somit ein Strom induziert, deren Stärke und Richtung von der Art dieser Änderung abhängt. Es gilt das Faradaysche Induktionsgesetz

$$U = - \frac{d\Phi}{dt}$$

und damit

$$U = - \frac{dB}{dt} \cdot A \cdot N_1.$$

Andererseits erzeugt ein elektrischer Strom ein Magnetfeld, z. B. wenn eine Spule von einem Strom  $I$  durchflossen wird. Für das Magnetfeld im Inneren einer großen Zylinderspule der Länge  $L$  und der Windungszahl  $N_2$  gilt

$$B = \mu_0 \frac{N_2}{L} I$$

mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am (magnetische Feldkonstante).

Im Versuch wird eine große Zylinderspule als Feldspule von einem sich ändernden Strom  $I(t)$  durchflossen, durch den in ihrem Inneren ein sich änderndes Magnetfeld  $B(t)$  entsteht. In diese Feldspule werden rechteckige Induktionsspulen unterschiedlicher Flächen  $A$  und Windungszahlen  $N_1$  gebracht. In diesen Induktionsspulen wird eine Spannung  $U$  induziert, die sich folglich zu

$$U = - \frac{dI}{dt} \cdot \mu_0 \cdot A \cdot \frac{N_2}{L} \cdot N_1$$

berechnen lässt.

Im Versuch werden die Proportionalitäten zwischen der induzierten Spannung  $U$  und der zeitlichen Änderung  $dI/dt$  des Feldspulenstromes  $I$ , der Fläche  $A$  der Induktionsspulen sowie der Windungszahl  $N_1$  der Induktionsspulen bestätigt. Dafür besonders gut geeignet ist das Power-CASSY (524 011) oder das Dreieckstrom-Netzgerät (521 56), da der zeitliche Verlauf des Ausgangsstromes  $I$  so gesteuert werden kann, dass die Steigung  $|dI/dt|$  konstant ist. Außerdem stehen drei Induktionsspulen mit jeweils  $N_1 = 300$  Windungen zur Verfügung: Spule 1 mit dem Querschnitt  $A = 50 \times 50 \text{ mm}^2$ , Spule 2 mit  $A = 30 \times 50 \text{ mm}^2$  und Spule 3 mit  $A = 20 \times 50 \text{ mm}^2$ . Außerdem hat Spule 1 zusätzliche Abgriffe bei  $N_1 = 100$  und  $N_1 = 200$  Windungen.

### Benötigte Geräte

1	<a href="#">Sensor-CASSY</a>	524 010 oder 524 013
1	<a href="#">Power-CASSY</a>	524 011
1	<a href="#">CASSY Lab 2</a>	524 220
1	<a href="#">µV-Box</a>	524 040
1	Feldspule $d = 120 \text{ mm}$	516 244
1	Ständer für Rohre und Spulen	516 249
1	Satz Induktionsspulen	516 241
2	Experimentierkabel, 100 cm, rot	501 30
2	Experimentierkabel, 100 cm, blau	501 31
1	PC mit Windows XP/Vista/7/8	

### Alternativ (ohne Power-CASSY)

1	<a href="#">Sensor-CASSY</a>	524 010 oder 524 013
1	<a href="#">CASSY Lab 2</a>	524 220
1	<a href="#">µV-Box</a>	524 040
1	<a href="#">30-A-Box</a>	524 043
1	Feldspule $d = 120 \text{ mm}$	516 244
1	Ständer für Rohre und Spulen	516 249
1	Satz Induktionsspulen	516 241
1	Dreieckstrom-Netzgerät	521 56
1	Experimentierkabel, 50 cm, blau	501 26
2	Experimentierkabel, 100 cm, rot	501 30
2	Experimentierkabel, 100 cm, blau	501 31
1	PC mit Windows XP/Vista/7/8	


### Versuchsaufbau (siehe Skizze)

Die große Spule wird mit konstantem  $|di/dt|$  entweder vom Power-CASSY oder vom Dreieckstrom-Netzgerät versorgt. Im zweiten Fall muss der fließende Strom noch mit der 30-A-Box an Eingang A des Sensor-CASSYs gemessen werden. Die induzierte Spannung der Induktionsspulen wird mit der  $\mu\text{V}$ -Box auf Eingang B erfasst.

### Versuchsdurchführung


a) Messung der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von der Fläche  $A$  der Induktionsspulen

■ Einstellungen laden

- Spule 1 ( $A = 0,0025 \text{ m}^2$ ,  $N_1 = 300$  Windungen) in große Feldspule legen und an  $\mu\text{V}$ -Box anschließen
- Messung mit  durchführen
- Messung mit den Spulen 2 ( $A = 0,0015 \text{ m}^2$ ) und 3 ( $A = 0,0010 \text{ m}^2$ ) wiederholen


b) Messung der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von der Anzahl  $N_1$  der Spulenwindungen

■ Einstellungen laden

- Spule 1 ( $N_1 = 100$  Windungen) in der großen Feldspule an  $\mu\text{V}$ -Box anschließen
- Messung mit  durchführen
- Messung mit  $N_1 = 200$  und  $N_1 = 300$  der Spule 1 wiederholen

c) Messung der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von  $di/dt$



■ Einstellungen laden

- Spule 1 ( $N_1 = 300$  Windungen) in der großen Feldspule an  $\mu\text{V}$ -Box anschließen
- Messung mit  durchführen
- Messung mit verkleinertem maximalen Strom  $I_{\text{max}}$  bzw.  $di/dt$  wiederholen; dazu den Zeiger des Anzeigeinstruments mit der Maus auf die gewünschte Position verschieben

### Alternativ (ohne Power-CASSY)



a) Messung der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von der Fläche  $A$  der Induktionsspulen

■ Einstellungen laden

- Spule 1 ( $A = 0,0025 \text{ m}^2$ ,  $N_1 = 300$  Windungen) in große Feldspule legen und an  $\mu\text{V}$ -Box anschließen
- Spannungsstellknopf des Dreieckstrom-Netzgeräts auf Rechtsanschlag drehen, Stromstellknopf soweit aufdrehen, dass Leistungsbegrenzung (LED  $P_{\text{max}}$ ) gerade noch nicht aktiv ist
- Mittlere  $di/dt$ -Einstellung wählen und Taster zum Einschalten des Dreieckstrommodus drücken
- Messung mit  starten (Messwertaufnahme beginnt bei steigender Flanke der Induktionsspannung  $U_{B1}$ , evtl. [Trigger](#) abschalten)
- Nach einigen Stromperioden wieder mit  stoppen
- Messung mit den Spulen 2 ( $A = 0,0015 \text{ m}^2$ ) und 3 ( $A = 0,0010 \text{ m}^2$ ) wiederholen



b) Messung der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von der Anzahl  $N_1$  der Spulenwindungen

■ Einstellungen laden

- Spule 1 ( $N_1 = 100$  Windungen) in der großen Feldspule an  $\mu\text{V}$ -Box anschließen
- Spannungsstellknopf des Dreieckstrom-Netzgeräts auf Rechtsanschlag drehen, Stromstellknopf soweit aufdrehen, dass Leistungsbegrenzung (LED  $P_{\text{max}}$ ) gerade noch nicht aktiv ist
- Mittlere  $di/dt$ -Einstellung wählen und Taster zum Einschalten des Dreieckstrommodus drücken
- Messung mit  starten (Messwertaufnahme beginnt bei steigender Flanke der Induktionsspannung  $U_{B1}$ , evtl. [Trigger](#) abschalten)
- Nach einigen Stromperioden wieder mit  stoppen
- Messung mit  $N_1 = 200$  und  $N_1 = 300$  der Spule 1 wiederholen

c) Messung der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von der Erregerfeldfrequenz

■ Einstellungen laden

- Spule 1 ( $N_1 = 300$  Windungen) in der großen Feldspule an  $\mu\text{V}$ -Box anschließen
- Spannungsstellknopf des Dreieckstrom-Netzgeräts auf Rechtsanschlag drehen, Stromstellknopf soweit aufdrehen, dass Leistungsbegrenzung (LED  $P_{\text{max}}$ ) gerade noch nicht aktiv ist
- $di/dt = 0,2 \text{ A/s}$  wählen und Taster zum Einschalten des Dreieckstrommodus drücken
- Messung mit  starten (Messwertaufnahme beginnt bei steigender Flanke der Induktionsspannung  $U_{B1}$ , evtl. [Trigger](#) abschalten)
- Während der Messung  $di/dt$  in Schritten von etwa  $0,4 \text{ A/s}$  erhöhen
- Messung wieder mit  stoppen

## Auswertung

Je nach Versuchsteil kann nach der Messung in die passenden Darstellung (**Fläche**, **Windungszahl** oder **dl/dt** mit der Maus anklicken) gewechselt werden. Hier wird eine weitere Tabelle gefüllt, indem zum jeweiligen Parameter A,  $N_1$  oder dl/dt (über Tastatur in Tabelle eingeben, dl/dt kann durch eine [Geradenanpassung](#) bestimmt werden) die Induktionsspannung U ermittelt wird. Die Induktionsspannung U ergibt sich z. B. aus einer [Mittelwertbildung](#). Sie kann danach mit der Maus aus der [Statuszeile](#) in die Tabelle gezogen werden (Drag & Drop). Bereits während der Tabelleneingabe entsteht das gewünschte Diagramm.

Alle drei Diagramme bestätigen die Proportionalitäten zwischen Induktionsspannung U und Fläche A, Windungszahl  $N_1$  sowie dl/dt.

Im Beispiel ergibt sich als Proportionalitätsfaktor  $U/A = 101 \text{ mV/m}^2$  (bzw.  $129 \text{ mV/m}^2$  ohne Power-CASSY) zwischen der Induktionsspannung U und dem Spulenquerschnitt A. Die Theorie fordert den Proportionalitätsfaktor

$$\frac{U}{A} = - \frac{dI}{dt} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_2}{L} \cdot N_1.$$

Zum Vergleich folgt aus den Windungszahlen  $N_1 = 300$  der Induktionsspule und  $N_2 = 120$  der Luftspule, aus der Länge  $L = 0,41 \text{ m}$  der Luftspule, aus dem ermittelten Anstieg des Stroms  $dI/dt = 1,00 \text{ A/s}$  (bzw.  $1,19 \text{ A/s}$ ) und der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$  der Proportionalitätsfaktor  $U/A = -110 \text{ mV/m}^2$  (bzw.  $-131 \text{ mV/m}^2$ ), was sich mit dem experimentellen Ergebnis deckt. Das Vorzeichen hängt von den beiden Wicklungssinnen und dem Anschluss an die  $\mu\text{V}$ -Box ab.

## Anmerkungen

Die  $\mu\text{V}$ -Box kann einen kleinen Offset haben, der in den [Einstellungen UB](#) durch **Korrigieren**, Sollwert 0 mV, **Offset korrigieren** behoben werden kann; dazu jedoch vorher den Stromkreis der Luftspule unterbrechen.

Das Power-CASSY kann auch eine deutlich höhere Frequenz ausgeben und damit die  $\mu\text{V}$ -Box überflüssig machen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Stromregelung des Power-CASSYs bei höheren Frequenzen und induktiven Lasten zu kleinen Überschwingern neigt, die sich jedoch in der induzierten Spannung (1. Ableitung des Stroms) un- schön bemerkbar machen. Abhilfe schafft ein in Reihe geschalteter ohmscher Widerstand von etwa  $10 \Omega$ .