

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E2
Institut für Physik	Elektromagnetische Induktion	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1. Die in einer festen Spule durch einen rotierenden Magneten induzierte Spannung ist als Funktion der Rotationsfrequenz zu messen.
- 1.2. Die ballistische Empfindlichkeit eines Spiegelgalvanometers ist zu bestimmen.
- 1.3. Mit Hilfe dieses Spiegelgalvanometers ist der magnetische Fluss eines Dauermagneten zu bestimmen.

2. Grundlagen

Unter elektromagnetischer Induktion versteht man den Effekt, dass zeitlich veränderliche Magnetfelder elektrische Spannungen in Leitern erzeugen. Wird beispielsweise eine Leiterschleife, die sich in einem Magnetfeld befindet, dort herausgezogen, so ist eine Spannung zwischen den beiden Leiterenden messbar. Diese Induktionsspannung U_{ind} ist davon abhängig wie viele Feldlinien durch die Fläche A der Leiterschleife ursprünglich hindurchtraten. Quantitativ ausgedrückt, lautet das Induktionsgesetz:

$$U_{ind} = \oint_S \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int_A B dA \cos \varphi(\vec{B}, d\vec{A}). \quad (1)$$

Ändert sich also innerhalb eines Flächenstücks der magnetische Fluss $\Phi = \int_A \vec{B} d\vec{A}$ zeitlich, erhält man nach Integration der elektrischen Feldstärke \vec{E} längs des diese Fläche umschließenden Weges s eine elektrische Spannung U_{ind} . Im konkreten Fall einer Spule mit Windungszahl N gilt für die induzierte Spannung:

$$U_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Lässt man eine Rechteckspule, die die Fläche A umschließt und eine Windungszahl N hat, in einem homogenen Magnetfeld der Stärke B_0 mit der Frequenz f rotieren, dann ist der die Spule durchsetzende magnetische Fluss gemäß Gl. (1) eine Funktion der Zeit:

$$\Phi(t) = B_0 A \cos \alpha = \Phi_0 \cos(\omega t). \quad (3)$$

α ist hierbei der aktuelle Drehwinkel der Spule und $\omega = 2\pi f$ deren Winkelgeschwindigkeit.

Nach Gl. (2) erhält man für die induzierte Spannung:

$$U_{ind}(t) = N \omega \Phi_0 \sin(\omega t) \quad (4)$$

mit einem zur Kreisfrequenz der Spule proportionalen Effektivwert

$$U_{ind,eff} = \frac{N \omega \Phi_0}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Galvanometer sind empfindliche Drehspulmessinstrumente zur Messung von kleinen Strömen. Die Drehspule ist dabei drehbar gelagert mit einer Spiralfeder, die das rücktreibende Moment bewirkt. Fließt durch das Galvanometer ein kurzer Stromstoß, so wird der Zeiger ausgelenkt und vollführt dann eine

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E2
Institut für Physik	Elektromagnetische Induktion	Seite 2

gedämpfte Schwingung. Ist die Dauer des Impulses kleiner als ein Viertel der Periodendauer, so ist der anfängliche, maximale Auslenkwinkel φ_m proportional zur transportierten Ladung Q :

$$\varphi_m = k \int_0^{t_m} i(t) dt = kQ \quad (6)$$

Die Konstante k hängt von konstruktiven Galvanometerparametern und der durch den äußeren Widerstand R des Stromkreises bestimmten Dämpfung des Instrumentes ab (Wirbelstrombremse).

Zur Erhöhung der Ablesegenauigkeit wird an der Spulenachse ein Spiegel befestigt und der mechanische Zeiger durch einen Lichtzeiger ersetzt. Zum Drehwinkel φ_m der Spule gehören nach dem Reflexionsgesetz der Drehwinkel des Lichtzeigers $\alpha_m = 2\varphi_m$ und der Ausschlag $a_m = l \tan \alpha_m$ auf einer ebenen Skala im Abstand l vom Drehspiegel des Galvanometers. Bei nicht zu großen Auslenkwinkeln kann $\tan \alpha_m \approx \alpha_m$ gesetzt werden und der beobachtete Maximalausschlag hängt wie folgt von der transportierten Ladung ab:

$$a_m = 2klQ = cIQ. \quad (7)$$

Die Konstante $c = \frac{a_m}{lQ}$ nennt man *ballistische Empfindlichkeit* des Galvanometers. Sie wird in der Einheit $\frac{mm}{mAs}$ oder auch einfach in $(As)^{-1}$ angegeben.

Führt man in eine festgehaltene Spule einen Stabmagneten mit dem magnetischen Fluss Φ_0 ein, so ändert sich der von der Spule umfasste Fluss während der Messzeit t_m von $\Phi = 0$ auf $\Phi = \Phi_0$. Die Verhältnisse kehren sich um, wenn der Magnet wieder entfernt wird. Ist die Spule elektrisch mit einem Galvanometer verbunden, so ruft die in ihr erzeugte Induktionsspannung $u_i(t)$ einen Strom $i(t)$ hervor. Mit dem Gesamtwiderstand des Messstromkreises $R_{ges} = R + R_i$ (R - Außenwiderstand, R_i - Innenwiderstand des Galvanometers) wird

$$i(t) = \frac{u_i(t)}{R_{ges}} = -\frac{N}{R_{ges}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8)$$

Für die Ladungsmenge Q , die während der Messzeit transportiert wird, erhält man

$$Q = \int_0^{t_m} i(t) dt = -\frac{N}{R_{ges}} \int_0^{\Phi_0} d\Phi = -\frac{N}{R + R_i} \Phi_0. \quad (9)$$

Das negative Vorzeichen in Gl. (9) kann man für die Auswertung dieses Versuches ignorieren. Sollte das Galvanometer in die falsche Richtung ausschlagen, polt man einfach die Messkabel um.

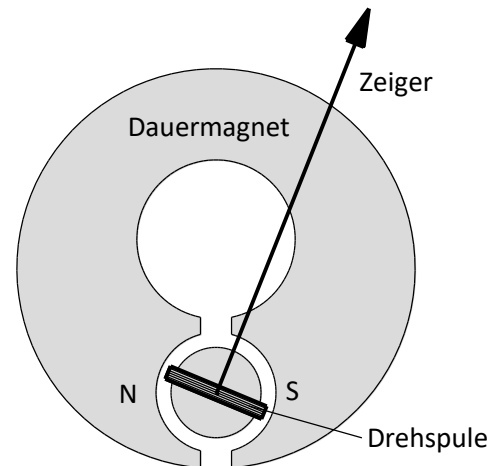


Abb. 1: Drehspulmesswerk

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E2
Institut für Physik	Elektromagnetische Induktion	Seite 3

3. Messanleitung und Auswertung

1. Rotierender Magnet

Der Versuch ist wie in Abb. 2 bereits am Versuchsplatz aufgebaut. Das Oszilloskop und das Multimeter sind ggf. mit der Spule für die Messung zu verbinden. Durch Drücken des Start-Knopfes wird der Magnet in Rotation versetzt und die Rotationsfrequenz kann mit Hilfe des Drehknopfs „Antrieb“ variiert werden.

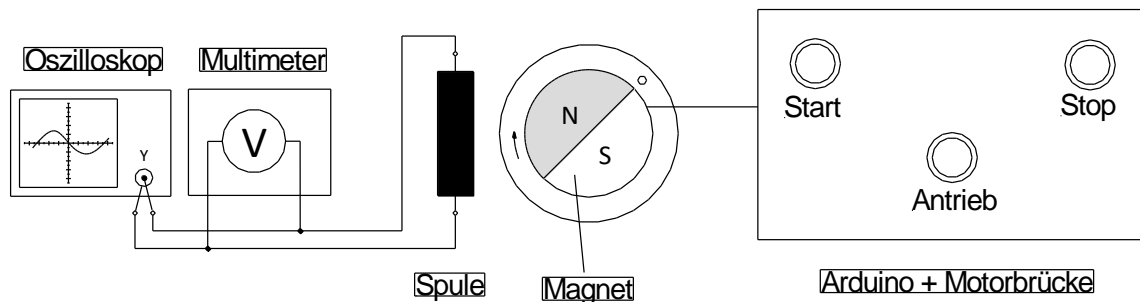


Abb. 2: Versuchsanordnung zu 3.1

Im Gegensatz zu dem im Grundlagenteil diskutierten Fall, ist hier die Spule ortsfest und ein diametral magnetisierter Permanentmagnet rotiert um seine Längsachse. Vereinfachend kann angenommen werden, dass der Zeitverlauf des die Spule durchsetzenden Flusses eine harmonische Funktion nach Gl. (3) ist. Demnach ist auch die induzierte Spannung eine harmonische Funktion, die man sich am Oszilloskop anzeigen lassen kann. Mit Hilfe des „Measure“-Menüs kann man sich u.a. die Frequenz bzw. die Periodendauer als auch den Effektivwert (RMS) der induzierten Spannung ausgeben lassen. Für mindestens 10 verschiedene Rotationsfrequenzen misst man $U_{ind,eff}$ und f und trägt die Wertepaare in einem Diagramm gegeneinander auf. Die Linearität des Zusammenhanges ist zu überprüfen.

2. Ballistische Empfindlichkeit eines Spiegelgalvanometers

Zur Bestimmung der ballistischen Empfindlichkeit des Spiegelgalvanometers wird die Schaltung nach Abb. 3 aufgebaut und vor Inbetriebnahme vom Versuchsbetreuer überprüft. Eine separate Verbindung zwischen Erdbuchse des Netzgerätes und dem Bezugspotential der Messschaltung vermeidet Störungen durch elektrostatische Aufladungen.

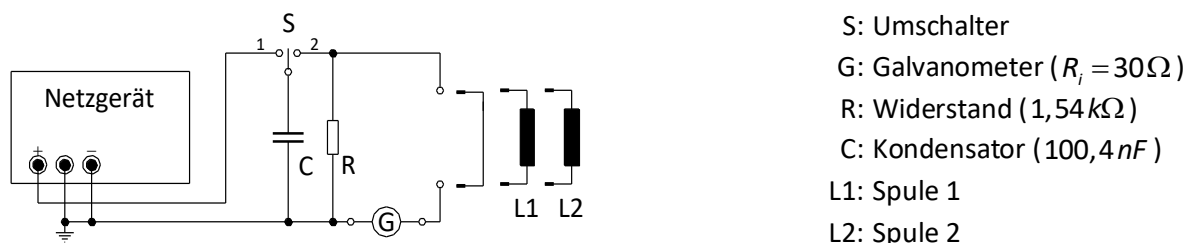


Abb. 3: Elektrische Schaltung für die Versuchsteile 3.2 und 3.3

Vorsicht beim Umgang mit dem empfindlichen Galvanometer! Das Galvanometer darf nicht direkt an die Ausgangsbuchsen des Netzgerätes angeschlossen werden!

Das Galvanometer muss lotrecht stehen und sein Spiegel hat einen Abstand $l = 2,61\ m$ von der Projektionswand des Lichtzeigers. Mit dem Umschalter wird in der Stellung 1 der Kondensator C mit der am

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E2
Institut für Physik	Elektromagnetische Induktion	Seite 4

Netzgerät eingestellten Spannung U aufgeladen, in Stellung 2 über das Galvanometer und den äußeren Widerstand R entladen und der Maximalausschlag a_m an der Skala registriert. Zwischen 2V und 30V ist in 2V-Abständen der Ausschlag zu notieren. In einem Diagramm wird a_m/I über der Ladung Q aufgetragen, die durch das Galvanometer geflossen ist. Sie ergibt sich nach der Stromteilerregel aus der Ladung Q_c des Kondensators und den bekannten Widerständen:

$$Q = Q_c \frac{R}{R + R_i} = CU \frac{R}{R + R_i}. \quad (10)$$

Ohm'sche Widerstände von Zuleitungen und Spulen können vernachlässigt werden. Der Anstieg der Ausgleichsgeraden durch den Koordinatenursprung liefert nach Gl. (7) die ballistische Empfindlichkeit c des Galvanometers. Diese ist mit ihrer Unsicherheit anzugeben.

3. Magnetischer Fluss eines Stabmagneten

Die Messung des magnetischen Flusses eines *axial magnetisierten* Stabmagneten erfolgt ebenfalls mit der Messanordnung nach Abb. 3. Der zur Bestimmung der Galvanometerempfindlichkeit benutzte Kondensator darf sich nicht im Stromkreis befinden (Umschalter in Position 1). Bei abgezogener Zuleitung zum Galvanometer wird der Magnet vorsichtig in die Spule eingeführt, die Verbindung wieder hergestellt und nach Rückkehr des Galvanometers in die Nullstellung ruckartig herausgezogen. Der Maximalausschlag des Lichtzeigers wird registriert, für jede der Spulen L1 und L2 ist die Messung 10-mal durchzuführen (Windungszahlen sind dem Aufdruck zu entnehmen). Mit Gl. (7) und (9) erhält man den Fluss des Stabmagneten. Die Ergebnisse sind einschließlich ihrer berechneten kombinierten Unsicherheiten für beide Spulen anzugeben und miteinander zu vergleichen.

1. Kontrollfragen

1. Was versteht man unter elektromagnetischer Induktion?
2. Wovon hängt die Größe der induzierten Spannung ab?
3. Wie funktioniert ein Drehspulmesswerk?