E45 Wirbelstrombremse	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert. (Version: 18. November 2024)

Versuchsziel und Versuchsmethode:

1.) Welche Wirkung hat ein Magnetfeld auf ein bewegtes Elektron? Wie lautet die dazugehörige Merkregel?

2.) Wann treten Wirbelströme auf? (Beispiele!)

3.) Wo finden Wirbelstrombremsen eine Anwendung?

4.) Welche Vorteile besitzt eine Wirbelstrombremse?

5.) Warum benötigt ein mit Wirbelströmen gebremstes Fahrzeug eine zusätzliche Bremse?

6.) Wie ist der Drehmomentvektor definiert? Skizze!

7.) Wie kann man mit einer Waage Kräfte messen?

8.) Warum muss bei der Messung zur Energiebetrachtung eine Stromfehlerschaltung verwendet werden? Hinweis: Innenwiderstände betrachten!

E Elektrizitätslehre

E45 Wirbelstrombremse

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

[1] *Kapitel* 4 Zeitlich veränderliche Felder. In: Demtröder, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer, 2013. – E-Book

[2] *Kapitel* 25 Die magnetische Induktion. In: Tipler, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book

[3] *Kapitel* 3 Statische Magnetfelder. In: Demtröder, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer, 2013. – E-Book

[4] *Kapitel* 22 Elektrischer Strom: Gleichstromkreise. In: Tipler, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book

[5] *Kapitel* 5 Elektrotechnische Anwendungen. In: Demtröder, W.: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer, 2013. – E-Book

[6] *Kapitel* Widerstände, Ohm'sches Gesetz. In: Eichler, H.-J.: *Das neue Physikalische Grundpraktikum*. Springer, 2016. – E-Book

[7] *Kapitel* 8 Drehbewegungen. In: Tipler, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book

Stichworte

Induktionsgesetz [1][2], Lenzsche Regel [1][2], Hysteresekurve [3], Lorentzkraft [3], spezifische Leitfähigkeit [4], Wirkungsgrad von Motoren [5], Strom-/Spannungsfehlerschaltung [6], Drehmoment [7]

Theoretische Grundlagen

Induktion

Bewegt sich ein Teilchen der Ladung q mit der Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ durch ein Magnetfeld der Stärke $\boldsymbol{B}$, so wirkt auf dieses Teilchen die Lorentzkraft $\boldsymbol{F}_\mathrm{L}$. Für diese gilt:

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{L} = q\,(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) = I\,(\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B})\,. \tag{E45-1}$$

Diese Kraft wirkt sowohl zur Geschwindigkeit als auch zum Magnetfeld senkrecht. Für positiv geladene Teilchen gilt die Dreifingerregel der rechten Hand. Als „Eselsbrücke“ merke man sich „FBI“: der Mittelfinger weist in Richtung der Kraft (F), wenn der Zeigefinger in Richtung des Feldes (B) und der Daumen in Richtung des Stroms (I) zeigt. Entsprechend gilt für negative Ladungsträger (Elektronen) die Dreifingerregel der linken Hand. Bewegt man einen geraden Leiter der Länge l senkrecht zu seiner Längsrichtung und senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld $\boldsymbol{B}$, so werden durch die Lorentzkraft die Ladungsträger zu einem Leiterende bewegt. Dies geschieht so lange, bis das durch die Ladungstrennung entstehende elektrische Feld die Lorentzkraft kompensiert. Folglich gilt:

$$\boldsymbol{F}_{\text{Coulomb}} = \boldsymbol{F}_{\text{Lorentz}} \tag{E45-2}$$

Im Falle unseres Leiters ergibt sich hierfür:

$$E \cdot q = \frac{U_{\text{ind}}}{l} \cdot q = qvB \tag{E45-3}$$

$$U_{\text{ind}} = vlB \tag{E45-4}$$

Für praktische Anwendungen wird häufig eine Leiterschleife betrachtet, die durch ein statisches Magnetfeld geführt wird (Generatorprinzip) oder die einem sich änderndem Magnetfeld ausgesetzt ist (z.B. Transformatorprinzip). In beiden Fällen ändert sich der magnetische Fluss $\Phi = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{A} = B \cdot A \cdot \cos\alpha$, wobei A die vom Feld durchsetzte Fläche ist. Das Induktionsgesetz lautet daher in allgemeiner Form:

$$U_{\text{ind}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\dot{\Phi} \tag{E45-5}$$

Bewegt man eine geschlossene Leiterschleife durch ein räumlich begrenztes Magnetfeld, so führt die induzierte Spannung $U(t)$ zu einem Stromfluss $I(t)$, der von der Leitfähigkeit des Leitermaterials abhängt. Die dabei erzeugte elektrische Energie

$$W_{\text{el}} = \int_{t1}^{t2} U(t)I(t)dt \tag{E45-6}$$

wird aufgebracht durch die mechanische Arbeit, die beim Bewegen der Leiterschleife um eine Strecke s gegen die Kraft F verrichtet wird:

$$W_{\text{mech}} = \int_{s1}^{s2} \boldsymbol{F}(\boldsymbol{s})d\boldsymbol{s} \tag{E45-7}$$

Da die induzierte Spannung nach Gl. (E45-4) von v abhängt, wird bei einer schnelleren Bewegung der Leiterschleife eine höhere Spannung induziert und eine größere Kraft erforderlich (Sie kennen das vom Fahrraddynamo).

Wirbelstrombremse

Häufig werden Induktionsströme in Leiterschleifen oder Spulen erzeugt. Dieses Prinzip lässt sich auch auf flächenhaft ausgebildete Leiter erweitern. Eine Flussänderung erzeugt dann Kreisströme im Inneren von Metallstücken wie z.B. dem Kern von Transformatoren oder der sich drehenden Metallscheibe im Versuch. Solche Kreisströme bezeichnet man als Wirbelströme. In den meisten Fällen sind Wirbelströme unerwünscht, da sie elektrische Verluste erzeugen. Man kann sie jedoch weitgehend unterbinden, indem man das Material schlitzt oder - wie im Fall eines Transformatorkerns - diesen aus voneinander isolierten Blechlamellen zusammensetzt.

Eine im Magnetfeld rotierende Scheibe kann betrachtet werden wie eine unendliche Folge von Leiterschleifen, die kontinuierlich durch das Feld bewegt werden. Es tritt daher eine konstante Bremskraft gegen die Rotation auf. Zur näherungsweisen Berechnung dieser Bremskraft betrachten wir vereinfachend ein gerades Leiterstück mit elektrischem Widerstand R, das mit der Geschwindigkeit v in ein Magnetfeld der Breite b und der Feldstärke B in senkrechter Richtung eintaucht. Nach Gl. (E45-4) beträgt die induzierte Spannung:

$$U = vbB \tag{E45-8}$$

Für die Stromstärke folgt nach dem ohmschen Gesetz

$$I = \frac{U}{R} = \frac{vbB}{R} \tag{E45-9}$$

Nach der bereits oben angestellten Energiebetrachtung wird die elektrische Wirbelstromleistung durch die mechanische Antriebsleistung aufgebracht:

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{el}} \tag{E45-10}$$

$$\frac{Fs}{t} = Fv = UI \tag{E45-11}$$

$$F = \frac{UI}{v} \tag{E45-12}$$

Hierin ist s die Länge des Kreisbogens, den ein Punkt am Ort r (Feldmitte, siehe Abb. E45-1) auf der rotierenden Scheibe in der Zeit t durchläuft. Die Geschwindigkeit v an diesem Ort ist aus der Drehzahl N zu berechnen.
Nach Einsetzen der Ausdrücke für U und I folgt:

$$\begin{aligned} F &= \frac{(vbB)^2}{Rv} \\ &= \frac{b^2B^2v}{R} = \frac{b^2B^2 2\pi r N}{R} \end{aligned} \tag{E45-13}$$

Die Bremskraft ist also proportional zur Geschwindigkeit v, zum Quadrat der Feldstärke B und der Feldbreite b und umgekehrt proportional zum Widerstand R des betrachteten

Leiterstücks. Bei fester Geometrie ist der Widerstand R proportional zum spezifischen Widerstand ρ bzw. F proportional zur spezifischen Leitfähigkeit σ. Für unterschiedliche Feldbreiten b wächst R linear mit b an, so dass sich die Bremskraft F proportional zu b verhalten sollte. Eine exakte Berechnung der Wirbelströme und der auftretenden Kräfte erfordert eine aufwändige numerische Integration, auf die hier verzichtet wird.

Versuchsaufbau

In diesem Versuch wird eine drehbar gelagerte Scheibe aus leitfähigem Material mit Hilfe eines Motors in Rotationsbewegung versetzt. Mit dem frei drehbar gelagerten Motorgehäuse ist ein horizontaler Ausleger der Länge l_0 fest verbunden, welcher auf eine Waage drückt. Die Auflagekraft setzt sich zusammen aus der Komponente der Gewichtskraft des Auslegers und der durch das Antriebs-Drehmoment $\boldsymbol{M}_1$ des Motors entstehenden Kraft $\boldsymbol{F}$.

$$\boldsymbol{M}_1 = \boldsymbol{l}_0 \times \boldsymbol{F} \tag{E45-14}$$

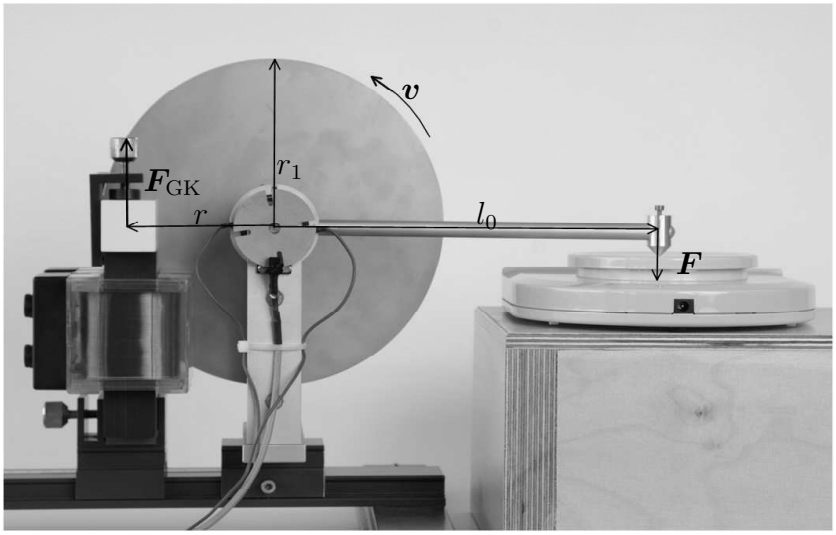

Abb. E45-1: Kräftedarstellung in der Versuchsanordnung.

Wie in Abbildung E45-1 dargestellt ist, sind zusätzlich beidseitig der Scheibe Polschuhe eines Elektromagneten angebracht, sodass bei eingeschaltetem Elektromagneten ein homogenes magnetisches Feld $\boldsymbol{B}$ einen Teil der Scheibe senkrecht zur Scheibenebene durchdringt.
Entsprechend der obigen Herleitung entsteht am Ort des Magnetfeldes, im Abstand r von der Drehachse, durch die Wirbelströme eine Bremskraft $\boldsymbol{F}_{\mathrm{GK}}$ ("Gegenkraft"), welche die Bewegung der Scheibe abbremst. Die der ursprünglichen Bewegung entgegenwirkende Kraft $\boldsymbol{F}_{\mathrm{GK}}$ führt zu einem Drehmoment $\boldsymbol{M}_2$:

$$\boldsymbol{M}_2 = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}_{\mathrm{GK}} \tag{E45-15}$$

das im Sinne von „actio = reactio“ vom Betrag gleich $\boldsymbol{M}_1$ ist.

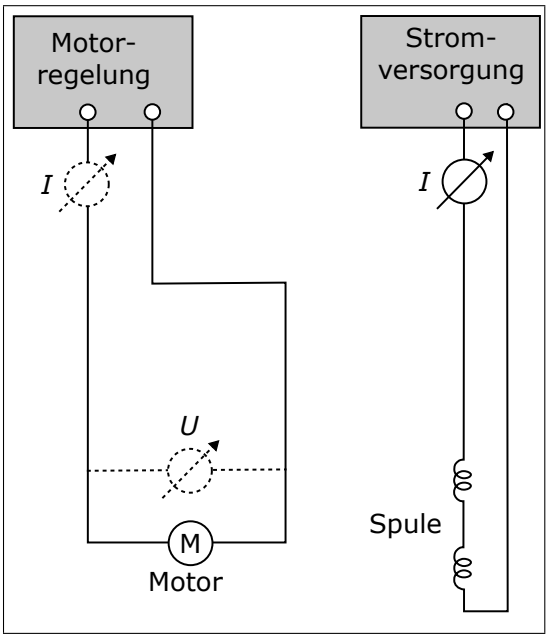

Abb. E45-1

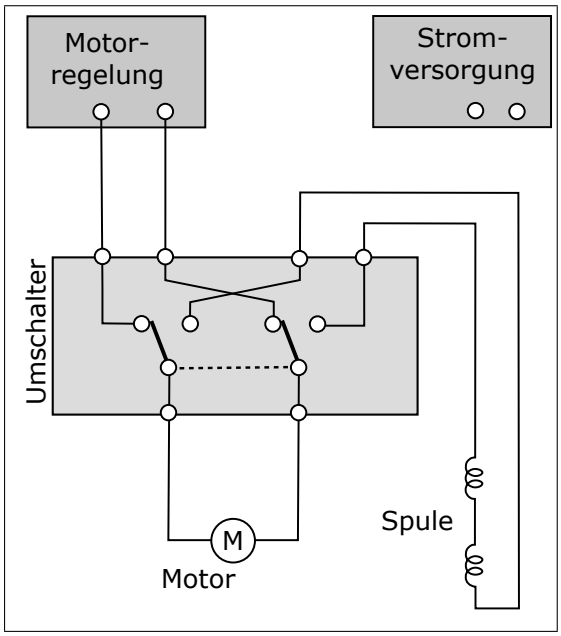

Abb. E45-2

Abb. E45-3: **Links:** Verdrahtungsplan für Versuchsteil 1-4. Verwenden Sie für Versuchsteil 1-3 das Multimeter um den Spulenstrom exakter zu bestimmen. Für die Messung des Wirkungsgrades müssen die Messgeräte wie gestrichelt dargestellt angeschlossen werden. **Rechts:** Verdrahtungsplan für Versuchsteil 5.

Versuchsaufbau und Vorbereitungen

Hinweise:
Die Scheiben (Radius $r_1 = 100\,\mathrm{mm}$) sind stets sorgfältig zu montieren. Achten Sie darauf, dass die beiden kleinen Löcher in der Mitte der Scheibe in die beiden Nasen das Motos einrasten und ziehen Sie die Mutter gut fest. Überprüfen Sie vor Einschalten des Motors von Hand, ob sich die Scheiben symmetrisch und reibungsfrei bewegen. Falls Änderungen an den elektrischen Anschlüssen vorgenommen werden, müssen zuvor alle Geräte abgeschaltet werden. Die elektrischen Verbindungen sind dem Schaltplan entsprechend herzustellen. Zum Schutz des Motors ist in den Drehzahlregler eine Strombegrenzung eingebaut. Wird diese erreicht, so erscheint in der Anzeige unten rechts ein Punkt. Bei weiterer Belastung des Motors fällt die Drehzahl. Der jeweils gemessene Spulenstrom ist proportional zum B-Feld, mit einem **Faktor von 0,5** $\mathbf{\frac{T}{A}}$.

Prüfen Sie bei **abgeschaltetem** Spulenstrom mit Hilfe der Montagelehre die symmetrische Anordnung der Polschuhe (10 mm x 10 mm Polfläche) bei einem Luftspalt von 5 mm. Achten Sie auf eine symmetrische Position der Scheibe im Luftspalt.

Alle Messungen werden mit einem Abstand $r = 70\,\mathrm{mm}$ der Magnetfeldmitte von der Drehachse durchgeführt (Spulen am rechten Rand auf die Skala ausrichten)!

Vorsicht: Der Magnet darf nur bei stillstehender Scheibe verschoben werden.

Der mit dem Motorgehäuse verbundene Ausleger hat ein Länge von **222 mm**.

Tarierung der Waage

Montieren Sie die Messingscheibe auf die Motorachse und schieben Sie die Magnetfeldspulen in eine Position außerhalb der Scheibe. Tarieren Sie nun bei **abgehobenem** Ausleger die Waage durch **kurzes** Drücken der ON/TARE Taste. Da die Tarierung der Waage über längere Zeit nicht stabil bleibt, **muss** vor jeder Messreihe die Tarierung bei abgehobenem Ausleger wiederholt werden.
Stellen Sie eine Drehzahl N von $1000\,\mathrm{min}^{-1}$ ein und messen Sie die Grundbelastung der Waage, die sich aus dem Auflagegewicht des Auslegers und dem Luftwiderstand der Scheiben sowie sonstigen Reibungskräften zusammensetzt. Dieser Wert ist bei allen nachfolgenden Messungen der Bremskraft, die ebenfalls bei $1000\,\mathrm{min}^{-1}$ durchgeführt werden, vom Anzeigewert abzuziehen.

Messprogramm

1. Messen Sie die **Bremskraft in Abhängigkeit von der Drehzahl** N in Schritten von $250\,\mathrm{min}^{-1}$ von $250 - 2000\,\mathrm{min}^{-1}$ jeweils **mit** und **ohne** Spulenstrom ($I = 200\,\mathrm{mA}$). Fertigen Sie ein Diagramm für die durch die Wirbelströme hervorgerufenen Bremsdrehmomente in N m unter Berücksichtigung der Reibungskräfte an.

2. Messen Sie die **Bremskraft in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke**, bei Spulenströmen von $I = 50\,\mathrm{mA}$ bis zum maximal möglichen Spulenstrom, bei dem die Drehzahl erhalten bleibt ($\approx 650\,\mathrm{mA}$), in Schritten von $50\,\mathrm{mA}$ ($N = 1000\,\mathrm{min}^{-1}$). Beenden Sie die Messreihe, wenn im Display des Drehzahlreglers der kleine Punkt erscheint. Fertigen Sie ein Diagramm für die durch die Wirbelströme hervorgerufenen Bremsdrehmomente in N m unter Berücksichtigung der Reibungskräfte an. Folgt der Verlauf dem theoretisch erwarteten?

3. Messen Sie die **Bremskraft in Abhängigkeit vom Scheibenmaterial** bei miteinander vergleichbaren Bedingungen für alle Scheiben (Aluminium, Edelstahl und Messing) und bei einer Drehzahl von $N = 1000\,\mathrm{min}^{-1}$. Stellen Sie hierfür für das Material mit der besten Leitfähigkeit (Aluminium) die größtmögliche Bremskraft ein und messen Sie mit diesen Einstellungen die Stahlscheibe und zuletzt die Messingscheibe. Bestimmen Sie die **Verhältnisse** der Leitfähigkeiten der verwendeten Materialien und vergleichen Sie diese mit Literaturwerten. Woher könnten die Abweichungen rühren?

4.1. Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. E45-1 um, um gleichzeitig Strom und Spannung am Motor messen zu können (**Schaltung prüfen lassen!**). Verwenden Sie die Messingscheibe und eine Drehzahl von $N = 1000\,\mathrm{min}^{-1}$. Schalten Sie den

Motor ein und messen Sie **ohne** bremsendes Magnetfeld Strom und Spannung am Motor. Die so ermittelte elektrische Leistung P_0 wird durch Reibungskräfte (Lager, Luft...) und Leitungsverluste im Motor verbraucht. Notieren Sie die dazu gehörende Grundbelastung m_0 der Waage.

4.2. Bestimmen Sie nun **den Wirkungsgrad des Motors** bei 4 Magnetfeldstärken ($I = 100 - 400\,\mathrm{mA}$) gemäß

$$\eta = \frac{P_{\mathrm{mech}}}{P_{\mathrm{el}} - P_0}. \tag{E45-1}$$

Messen Sie hierzu wieder Strom und Spannung am Motor sowie die Belastung der Waage und berechnen dann jeweils den **Zuwachs** an mechanischer Bremsleistung (aus F_{GK} und v) und den **Zuwachs** an elektrischer Antriebsleistung für den Motor. Berechnen Sie aus diesen Werten den Wirkungsgrad.

Welcher Trend ist erkennbar? Wie ist dieser zu erklären?

5. Verwenden Sie den **Motor als Stromgenerator** (elektrodynamischer Retarder). Bauen Sie hierzu die Schaltung nach Abbildung E45-2 auf (**Schaltung prüfen lassen!**) und untersuchen Sie die Bremswirkung der damit betriebenen Wirbelstrombremse. Stellen Sie dazu den Motor auf eine Drehzahl von $2000\,\mathrm{min}^{-1}$ und schalten Sie danach auf Generatorbetrieb um. Stoppen Sie die Zeit bis zum Erreichen von $500\,\mathrm{min}^{-1}$. Vergleichen Sie dies mit dem Fall ohne Wirbelstrombremse. Entfernen Sie hierzu einfach bei stillstehender Scheibe die Leitungen zur Spule. Wiederholen Sie die Messung für mit und ohne Spule je 3x, um Messfehler zu reduzieren. Wohin "verschwindet" die Rotationsenergie?

Bauen Sie die Scheibe aus und entfernen Sie alle Verbindungskabel.