

Kraftmessung an stromdurchflossenen Leitern im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten

Versuchsziele

- Messung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld in Abhängigkeit von der Stromstärke
- Messung der Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld in Abhängigkeit von der Leiterlänge
- Messung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Magnetfeld und Stromrichtung
- Berechnung des Magnetfeldes

Grundlagen

Die magnetische Induktion oder einfacher das Magnetfeld \mathbf{B} ist eine vektorielle Größe. Auf eine Ladung q , die sich mit der Geschwindigkeit \mathbf{v} im Magnetfeld \mathbf{B} bewegt, wirkt eine Kraft \mathbf{F} , die von Größe und Richtung der Geschwindigkeit und von Stärke und Richtung des Magnetfeldes abhängt. Es gilt:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (I)$$

Die sog. *Lorentz-Kraft* \mathbf{F} ist ebenfalls eine vektorielle Größe und steht senkrecht auf der Ebene, die von \mathbf{v} und \mathbf{B} aufgespannt wird.

Die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld kann man auffassen als die Summe der Einzelkräfte auf die bewegten Ladungsträger, die den Strom bilden. Auf jeden einzelnen Ladungsträger q , der sich mit der Driftgeschwindigkeit \mathbf{v} bewegt, wirkt gemäß (I) die *Lorentz-Kraft* \mathbf{F} . Bei einem geraden Leiter resultiert daraus die Gesamtkraft

$$\mathbf{F} = q \cdot nAs \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (II),$$

denn die Anzahl der Ladungsträger im Leiter ist das Produkt aus Ladungsträgerdichte n , Leiterquerschnitt A und der Länge s des im Magnetfeld befindlichen Leiterabschnitts.

Es ist üblich, den Vektor \mathbf{s} einzuführen, der in Richtung des Leiterabschnitts zeigt. Außerdem entspricht das Produkt $qnAv$ der Stromstärke I . Damit ist die Kraft eines Magnetfeldes auf einen geraden stromdurchflossenen Leiterabschnitt gegeben durch

$$\mathbf{F} = I \cdot (\mathbf{s} \times \mathbf{B}) \quad (III)$$

bzw. der Betrag der Kraft durch

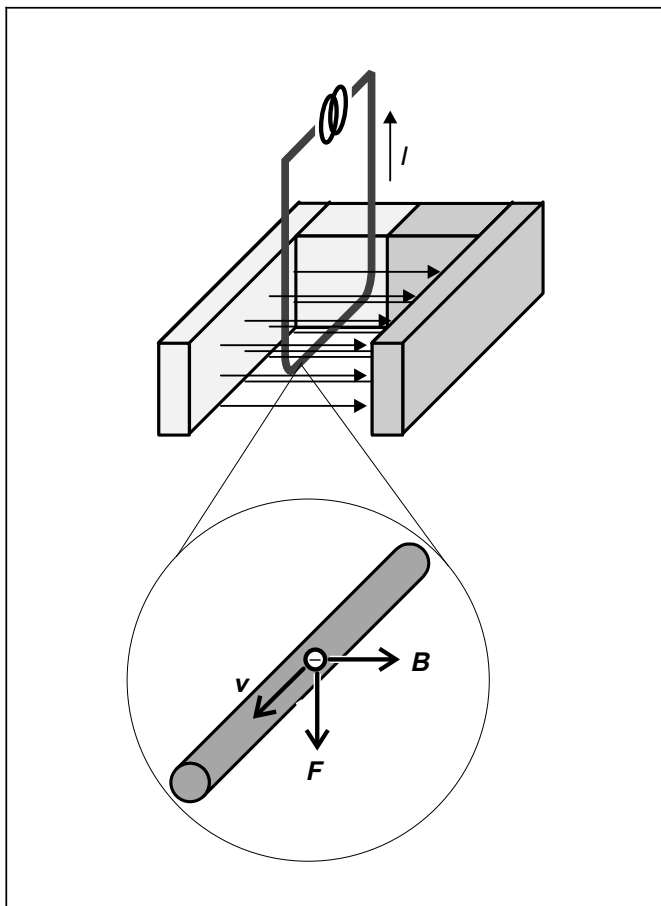
$$F = I \cdot s \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (IV),$$

wobei α der Winkel zwischen Magnetfeld und Stromrichtung ist.

Im Versuch werden rechteckige Leiterschleifen, durch die Ströme bis zu 20 A fließen, in das horizontale Magnetfeld eines Hufeisenmagneten gebracht. Gemessen wird die Kraft auf den horizontalen Teil einer Leiterschleife. Die Kräfte auf die beiden senkrechten Abschnitte der Leiterschleife heben sich gegenseitig auf.

Die Leiterschleifen sind an einem Kraftsensor befestigt. Er enthält ein Biegeelement, auf dem Dehnungsmeßstreifen angeordnet sind, die bei Belastung ihren elektrischen Widerstand ändern. Die Widerstandsänderung ist proportional zur verursachenden Kraft. Ein angeschlossenes Newtonmeter mißt die Widerstandsänderung und zeigt die dazugehörige Kraft an.

Titelbild: Schema zur Erläuterung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld



Geräte

1 Hufeisenmagnet mit Joch	510 21
1 Kraftsensor	314 261
1 Satz Leiterschleifen für Kraftmessung	516 34
1 Leiterschleifenhalter	314 265
1 Newtonmeter	314 251
1 Verbindungskabel, 6polig, 1,5 m lang	501 16
1 Hochstrom-Netzgerät	521 55
1 Kleiner Stativfuß, V-förmig	300 02
1 Stativstange, 47 cm lang, Ø 12 mm	300 42
1 Leybold-Muffe	301 01
Experimentierkabel mit Leiterquerschnitt 2,5 mm ²	

Aufbau und Durchführung

Hinweise:

Weil die Meßgröße sehr klein ist, wird die Messung leicht durch störende Umgebungseinflüsse beeinflusst: Umgebungserschütterungen, Luftzug und Temperaturschwankungen vermeiden.

Das Newtonmeter muß vor Versuchsbeginn mindestens 15 min warmlaufen:

Dazu Newtonmeter mit angeschlossenem Kraftsensor am Netzschalter auf der Geräterückseite einschalten.

Leiterschleifenhalter und Leiterschleifen nur kurzzeitig (wenige Minuten) mit 20 A belasten.

Das Magnetfeld des Hufeisenmagneten ist inhomogen: Leiterschleife bei allen Messungen mittig zwischen den Magnetschenkeln anordnen, damit das Magnetfeld möglichst gleich bleibt.

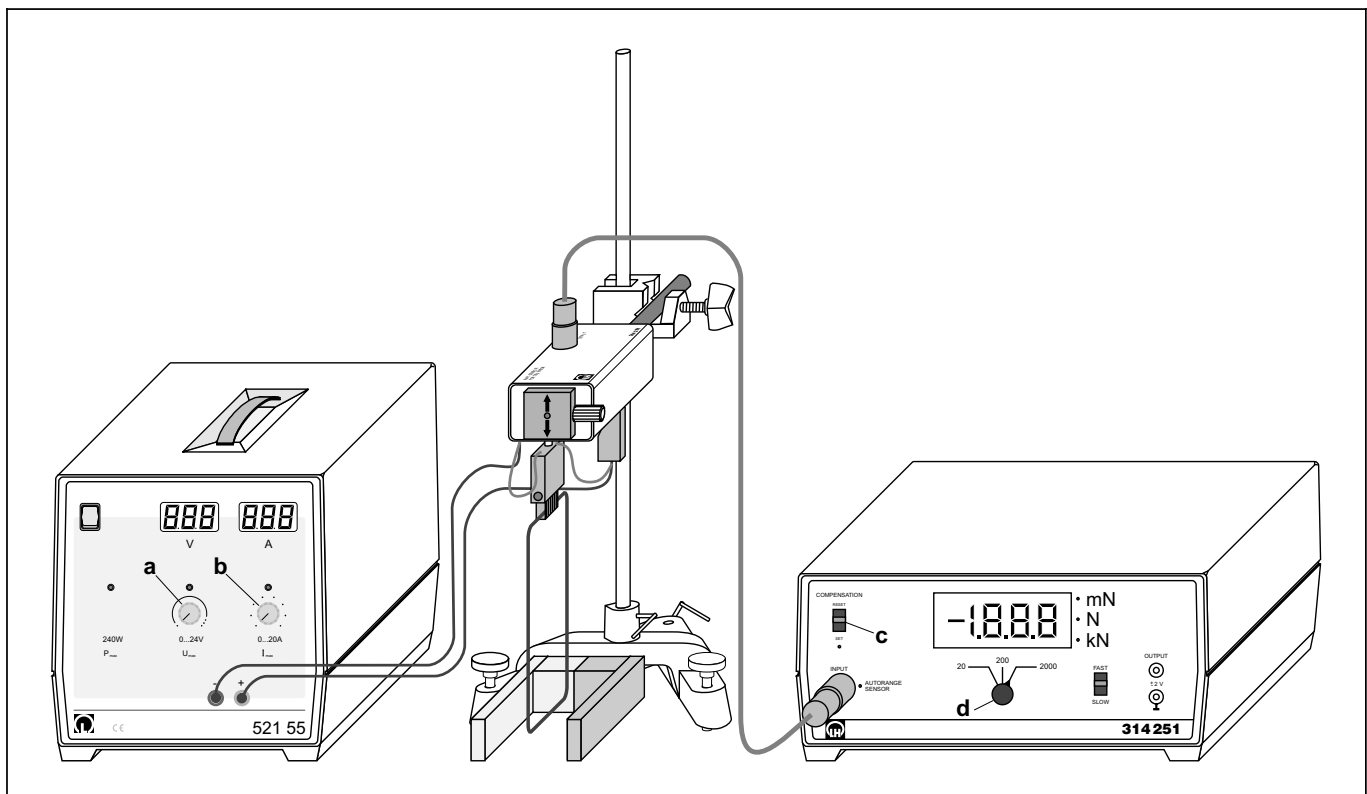
- Versuch entsprechend der Darstellung in Fig. 1 aufbauen.
- Zur Vermeidung eines Kurzschlusses darauf achten, daß die nicht isolierten Kabelabschnitte des Leiterschleifenhalters sich nicht berühren.
- Meßbereichsschalter (**d**) des Newtonmeters auf 2000 stellen.

Die Versuche werden nur mit den Leiterschleifen ohne Verengung durchgeführt. Die Stromstärke wird am einfachsten nur durch Benutzung des Stromstärke-Stellknopfes (**b**) gestellt. Der Spannungs-Stellknopf (**a**) wird dazu auf Rechtsanschlag gestellt.

a) Messung in Abhängigkeit von der Stromstärke:

- Zunächst die 8 cm breite Leiterschleife am Kraftsensor befestigen.
- Stromstärke-Stellknopf (**b**) auf Linksanschlag und Spannungs-Stellknopf (**a**) auf Rechtsanschlag einstellen, anschließend Hochstromnetzgerät einschalten.

Fig. 1 Versuchsaufbau zur Kraftmessung an stromdurchflossenen Leitern in einem Magnetfeld



- Zur Nullpunkt-Kompensation des Newtonmeters den Taster COMPENSATION (c) auf SET stellen.
- Strom am Stromstärkestellknopf (b) jeweils um 2 A bis auf 20 A erhöhen und zu den entsprechenden Stromstärken die Kräfte am Newtonmeter ablesen und notieren.
- Stromstärke $I = 0$ A einstellen und Nullpunkt der Kraftanzeige kontrollieren

b) Messung in Abhängigkeit von der Leiterlänge:

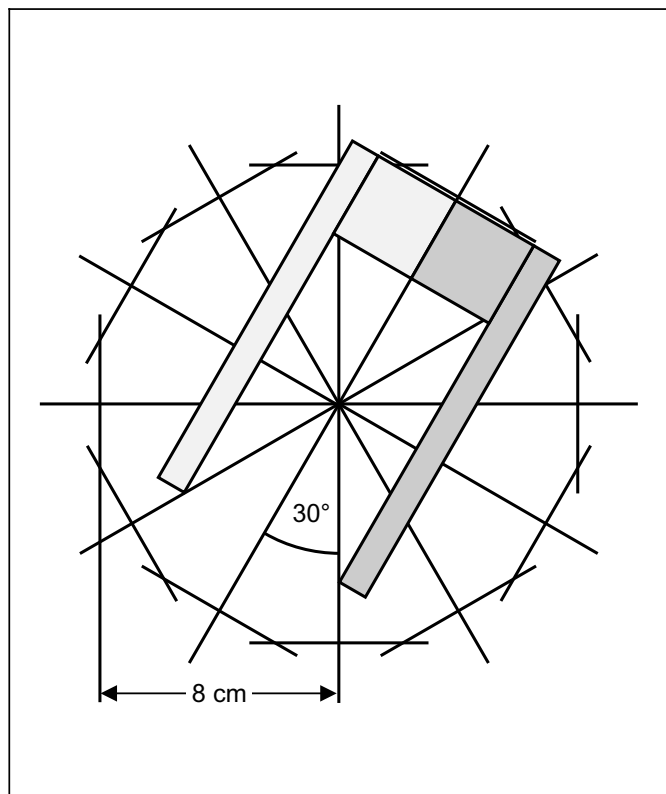
- Die 4 cm breite Leiterschleife am Kraftsensor befestigen.
- Zur Nullpunkt-Kompensation des Newtonmeters den Taster COMPENSATION (c) auf SET stellen.
- Stromstärke $I = 20$ A einstellen und Kraft am Newtonmeter ablesen und notieren.
- Stromstärke $I = 0$ A einstellen und Nullpunkt der Kraftanzeige kontrollieren.
- Messung mit der 2 cm und der 1 cm breiten Leiterschleife wiederholen.

c) Messung in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Magnetfeld und Stromrichtung:

Empfehlung: Wegen der Inhomogenität des Magnetfeldes und zur Einstellung der Drehwinkel ist die Anfertigung einer Schablone hilfreich (siehe Fig. 2). Die Positionierung des Hufeisenmagneten kann dann schneller und genauer durchgeführt werden.

- Stromstärkestellknopf auf Linksanschlag einstellen und die 4 cm breite Leiterschleife am Leiterschleifenhalter befestigen.
- Schablone so unter der Leiterschleife plazieren, daß sich der Schablonenmittelpunkt genau unter dem Mittelpunkt des waagerechten Abschnittes der Leiterschleife befindet

Fig. 2 Verwendung einer Schablone als Positionierhilfe für den Hufeisenmagneten



und eine Schablonenhilfslinie parallel zu diesem Leiterabschnitt verläuft.

- Hufeisenmagnet so anlegen, daß Magnetfeld und Leiterabschnitt parallel verlaufen.
- Zur Nullpunkt-Kompensation des Newtonmeters den Taster COMPENSATION (c) auf SET stellen.
- Stromstärke $I = 10$ A einstellen.
- Magnet in 30°-Schritten um 360° drehen und zum jeweiligen Drehwinkel die Kraft am Newtonmeter ablesen.
- Stromstärke 0 A einstellen und Nullpunkt der Kraftanzeige kontrollieren.

Meßbeispiel und Auswertung

a) Messung in Abhängigkeit von der Stromstärke:

Tab. 1: Kraft F in Abhängigkeit von der Stromstärke I ($s = 8$ cm)

$\frac{I}{A}$	$\frac{F}{mN}$
0	0,0
2	4,5
4	9,3
6	13,5
8	18,0
10	22,5
12	27,0
14	31,4
16	35,9
18	40,4
20	45,6

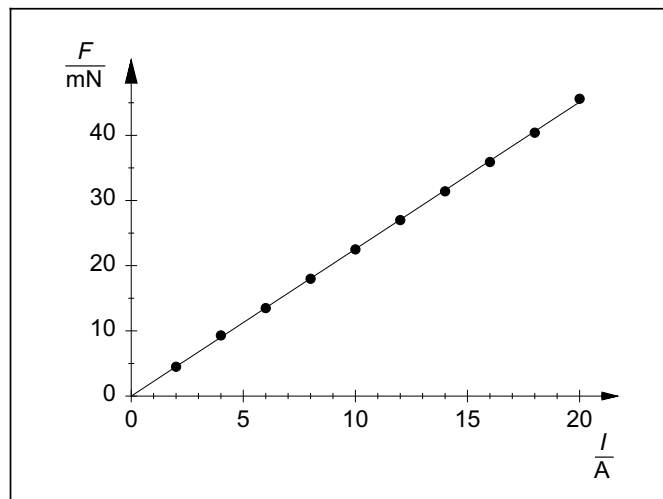


Fig. 3 Kraft F auf einen stromdurchflossenen Leiter in Abhängigkeit von der Stromstärke I (vgl. Tab. 1)

In Fig. 3 liegen die Meßwerte in guter Näherung auf einer Ursprungsgeraden mit der Steigung

$$\frac{F}{I} = 2,26 \frac{mN}{A}$$

Mit (IV) erhält man wegen $\sin 90^\circ = 1$ für das Magnetfeld

$$B = \frac{F}{I \cdot s} = \frac{2,26 \text{ mN}}{A \cdot 0,08 \text{ m}} = 28,5 \text{ mT}$$

Der in (III) und (IV) formulierte lineare Zusammenhang zwischen Kraft und Stromstärke bei konstanter Leiterlänge wird bestätigt.

b) Messung in Abhängigkeit von der Leiterlänge:

Tab. 2: Kraft F in Abhängigkeit von der Länge s ($I = 20\text{ A}$)

$\frac{s}{\text{cm}}$	$\frac{F}{\text{mN}}$
8	45,6
4	23,0
2	11,7
1	6,2

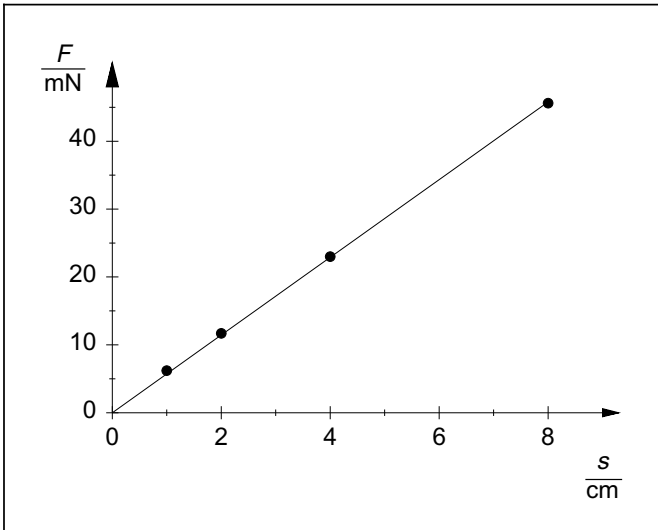


Fig. 4 Kraft F auf stromdurchflossene Leiter in Abhängigkeit von der Leiterlänge s (vgl. Tab. 2)

In Fig. 4 liegen die Meßwerte ebenfalls guter Näherung auf einer Ursprungsgeraden. Deren Steigung ist

$$\frac{F}{s} = 572 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$$

Man erhält für das Magnetfeld

$$B = \frac{F}{s \cdot I} = \frac{572 \text{ mN}}{\text{m} \cdot 20 \text{ A}} = 28,6 \text{ mT}$$

Der in (III) und (IV) formulierte lineare Zusammenhang zwischen Kraft und Leiterlänge bei konstanter Stromstärke wird bestätigt.

c) Messung in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Magnetfeld und Stromrichtung:

Tab. 3: Kraft F in Abhängigkeit vom Winkel α ($s = 4\text{ cm}$, $I = 10\text{ A}$)

α	$\frac{F}{\text{mN}}$
0	0,0
30	5,6
60	9,9
90	11,6
120	10,4
150	6,3
180	0,1
210	-5,8
240	-9,9
270	-11,5
300	-10,1
330	-6,0
360	0,1

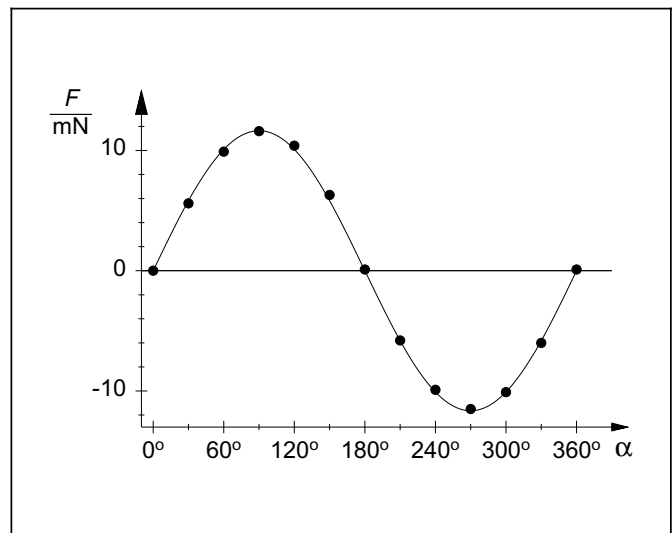


Fig. 5 Kraft F auf einen stromdurchflossenen Leiter in Abhängigkeit vom Winkel α zwischen Magnetfeld und Stromrichtung (vgl. Tab. 3)

Die Meßwerte in Fig. 5 liegen in guter Näherung auf einer Sinuskurve, die gemäß (IV) mit einem Magnetfeld $B = 28,5\text{ mT}$ berechnet wurde.