

77D 03801

## MJ03801 Stromwaage

### I) Allgemeines

Mit dieser Stromwaage können elektromagnetische Kraftwirkungen eines stromdurchflossenen, geradlinigen Leiters in einem homogenen Magnetfeld gemessen werden. Ihre Funktion basiert auf dem Prinzip des Laplace-Gesetzes.

Durch einen geradlinigen Leiter mit der Länge  $L$  fließt ein Strom mit der Stromstärke  $I$ . Der Leiter ist von einem homogenen Magnetfeld  $B$  umgeben.

Um die auf den Leiter wirkende Kraft  $F$  zu berechnen, gilt dann:

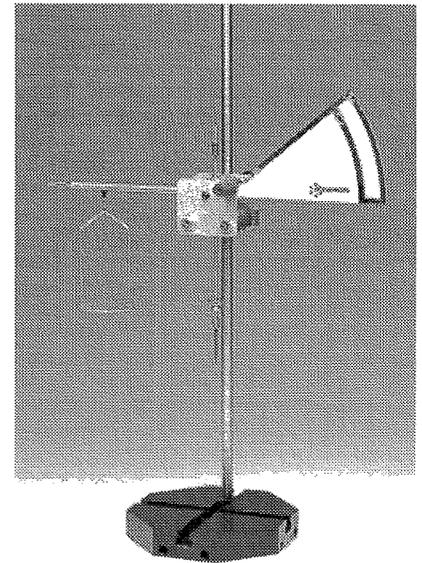
$$F = I \cdot L \cdot \Delta B \quad (L \text{ in Stromrichtung})$$

Eigenschaften von  $F$

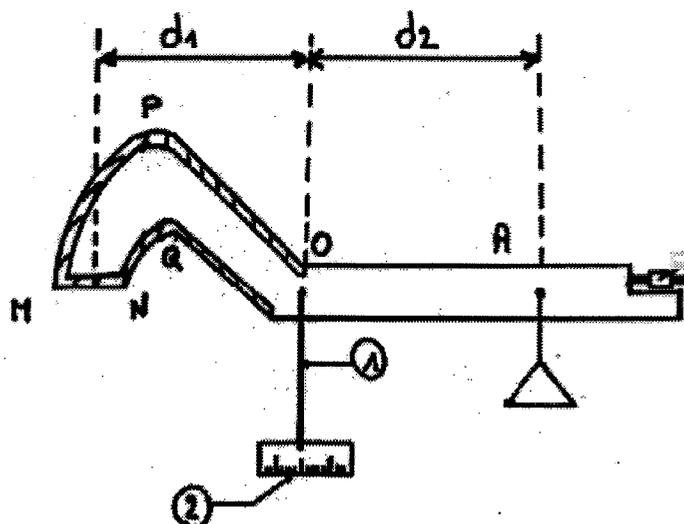
- Angriffspunkt: in der Mitte des Leiters.
- Richtung: orthogonal zu der Fläche, die aus Leiter und Magnetfeld gebildet werden
- Flussrichtung des Induktionstroms: nach der "Rechten-Hand-Regel"
- Formel:  $F = B \cdot L \cdot I \sin(L, B)$

Bemerkung:

Sind die Feldlinien orthogonal zum Leiter dann gilt:  $F = B \cdot I \cdot L$



### II) Beschreibung



$$M - N = L$$

Die Stromwaage besteht aus einem asymmetrischen, starren Waagebalken der aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt ist:

- Links: Stromelement O-P-M-N-Q, in Form einer gedruckten Schaltung.
- Rechts: Ein Hebelarm, der mit einem Wägeteller und einer Stellschraube zum Austarieren des Gerätes ausgestattet ist.

Die Kraftwirkung kann über einen Zeiger (1), der am Waagebalken angebracht ist, an einer Skala (2) abgelesen werden.

Zwei Stellschrauben ermöglichen eine einfache Höheneinstellung des Waagebalkens und der Skala am Stab.

### III) Eigenschaften

- Zulässige Stromstärke: - 5 A im Dauerbetrieb  
- 7 A max. Stromstärke, kurzzeitig
- Empfindlichkeit der Waage: 0,002 g
- $d_2 = (114 \pm 1)$  mm
- $d_1 = (152 \pm 1)$  mm
- $L = (25 \pm 1)$  mm
- Abmessungen der Grundplatte: 100 x 160 mm
- Gesamtgewicht: 1,2 kg

### IV) Messprinzip und Theorie

Man bringt das Teilstück M - N der gedruckten Schaltung derart in ein homogenes Magnetfeld B, dass dieses senkrecht zur Ebene liegt, welche durch die Leiterbahn O-P-M-N-Q gebildet wird.

Vor dem Einschalten des Stromes ( $I = 0$  A) bringt man die Stromwaage mit Hilfe der Stellschraube ins Gleichgewicht.

Anschließend schaltet man den Strom ein. Seine Richtung sollte so eingestellt werden, dass die auf das Leiterstück ausgeübte Kraft nach unten zeigt. Die Stromwaage ist nun nicht mehr im Gleichgewicht. Mit Hilfe von geeichten Massen, welche auf den Wägeteller gelegt werden, wird das Gleichgewicht wieder hergestellt.

#### Bemerkung

Es wird auf das Leiterstück O - P, O - Q sowie auf die Kreisbögen M - P und M - Q ebenfalls eine Kraft ausgeübt, jedoch:

- O - P und O - Q sind parallel und der Strom in den Leitungen fließt entgegengesetzt. Die Kraftwirkungen heben sich auf.
- Die Kräfte, welche auf die Kreisbögen wirken, gehen durch O.
- Ihr Moment in Bezug auf die Drehachse ergibt Null, sie besitzen folglich keinen Einfluss auf das Drehmoment.

Unabhängig davon sollte man versuchen, die Wirkung des Magnetfeldes B nur auf das Leiterstück M - N einwirken zu lassen.

#### Beziehungen bei Gleichgewicht

Die Kraft, welche in der Mitte des Leiterstücks angreift, hat einen Abstand  $d_1$  zur Achse. Diese Kraft verursacht ein Moment  $M_1$  in Bezug auf O, so dass:

$$M_1 = F \cdot d_1$$

Das Gewicht P der Massen ( $m$ ), welche auf dem Wägeteller liegen, haben den Abstand  $d_2$  zwischen ihrem Angriffspunkt und der Achse.

Sie verursachen ein Moment  $M_2$  in Bezug auf die Achse, so dass:

$$M_2 = m \cdot g \cdot d_2$$

Im Gleichgewicht gilt:

$$M_1 = M_2$$

$$m \cdot g \cdot d_2 = F \cdot d_1$$

(Wobei m die Masse darstellt, welche benötigt wird, um das Gleichgewicht wieder herzustellen)

Für die Kraft ergibt sich:  $F = \frac{m \cdot g \cdot d_2}{d_1}$

### Berechnung des Magnetfeldes B:

Die Anwendung des Laplace-Gesetzes ergibt:

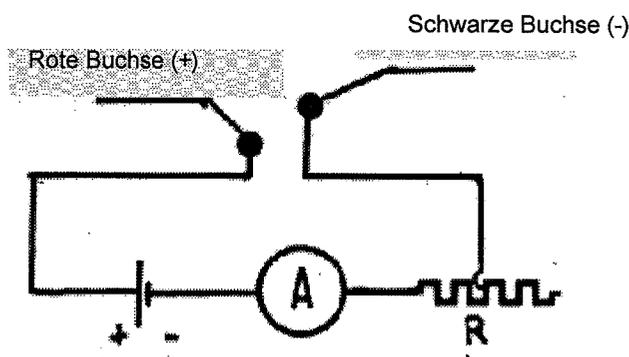
$$F = B \cdot I \cdot L$$

$$B = \frac{F}{I \cdot L}$$

$$B = \frac{m \cdot g \cdot d_2}{d_1 \cdot I \cdot L}$$

## V) Versuch

### A) Aufbau



Erforderliche Geräte:

- Stromversorgungsgerät 6 V - 10 A , z. B. CL01010 oder CL01011
- Amperemeter 5 A, z. B. CL01140A
- Schiebewiderstand 10  $\Omega$  - 5,7 A, z. B. MT04035

Das Schiebewiderstand ermöglicht das Verändern der Stromstärke I des Stromes, der den Leiter M - N durchfließt.

Die Messung dieser Stromstärke erfolgt mit dem Amperemeter A, eingestellt im 5 A-Bereich.

### ACHTUNG

Aufgrund der Grösse des benötigten Stroms (bis 5 A) sollte die Versorgungsspannung stets erst nach eingehender Prüfung des korrekten Schaltungsaufbaus eingeschaltet werden.

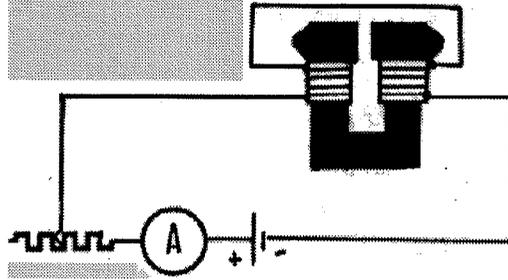
Vor einer Änderung des Schaltungsaufbaus sollte ebenso zuerst die Versorgungsspannung abgeklemmt werden.

Um eine Beschädigung des Amperemeters zu vermeiden, sollte man folgendes berücksichtigen:

- Beachten der Polarität beim Anschliessen des Amperemeters.
- Verwendung der 5 A-Buchse

Bevor die Spannungsversorgung eingeschaltet wird, sollte sich der Abgriff des Schiebewiderstandes in dessen Mitte befinden, um einen Kurzschluss zu vermeiden.

b) Aufbau eines Elektromagneten



Erforderliche Geräte:

- Aufbautransformator mit Polschuhen, z. B. CL08200 mit CL08201
- 2 Spulen 72 Windungen CL08207
- Stromversorgungsgerät 6 V - 10 A , z. B. CL01010 oder CL01011
- Amperemeter 5 A, z. B. MT01312
- Schiebewiderstand 10 Ω - 5,7 A, z. B. MT04035

Durch eine Veränderung der Stromstärke  $I$  im Stromkreis des Elektromagneten, wird eine Veränderung des Magnetfeldes zwischen den beiden Spulen erzeugt. Es besteht folgende Abhängigkeit:

$$B = K \cdot N \cdot I \quad K = \text{Konstante des Elektromagneten}$$

$$N = \text{Anzahl der Wicklungen}$$

**1) Einleitender Versuch: Justieren der Stromwaage**

Benutzen Sie die Stellschraube um die Stromwaage vor dem Einschalten des Stromes ins Gleichgewicht zu bringen.

Bemerkung: Um eine Parallaxenverschiebung zu vermeiden, sollte man sich beim Ablesen der Skala direkt vor die Stromwaage setzen und bei den nun folgenden Messungen stets denselben Sichtwinkel beibehalten.

**2) Bestätigung des Laplace-Gesetzes**

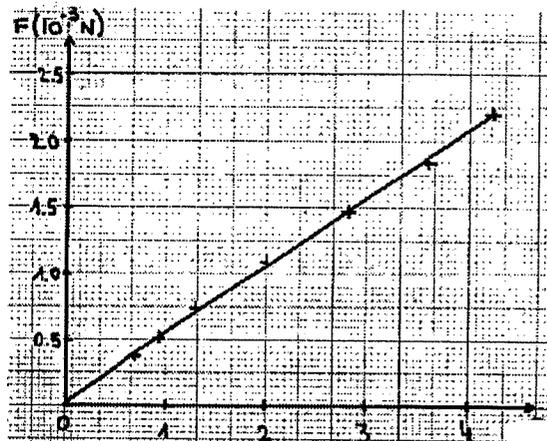
Man erzeugt ein hinreichend grosses B-Feld im Elektromagnet. Anschliessend variiert man die Masse  $m$  auf dem Wägeteller. Für jeden dieser Werte wird der Strom  $I$  mit Hilfe des Schiebewiderstandes derart verändert, dass sich wiederum ein Gleichgewicht an der Stromwaage einstellt.

Durch die Überlagerung der Magnetfelder vom Elektromagneten (Kontakt) und dem Stromleiter  $MN$  (variabel) hat der Verlauf der vorliegenden Feldlinien Kraftwirkungen hervorgerufen.

Bemerkung: Am Zeiger befinden sich 2 verschiebbare Massen. Sie ermöglichen die Empfindlichkeits-einstellung der Stromwaage. Für die Versuche ist es vorteilhaft, wenn man diese in ihrer Mittelstellung belässt.

**Messbeispiel: Zeichnung der Kurve  $F = f(I)$**

$I$ (A)	$m$ (g)	$F$ $10^{-3} N$	$F$ $10^{-4} T$
0,70	0,05	0,37	211
0,95	0,07	0,52	217
1,30	0,10	0,74	227
2,00	0,15	1,11	221
2,80	0,20	1,48	211
3,60	0,25	1,84	205
4,20	0,30	2,20	211



Die oben stehenden Messergebnisse sind bei einem Strom von  $I = 4 \text{ A}$  in den Wicklungen des Elektromagneten gemessen worden. Der Funktionsverlauf zeigt deutlich, dass die Laplace-Kraft dem Gesetz  $F = a \cdot I$  gehorcht, wobei  $a$  der Steigung der erhaltenen Gerade entspricht.

Berechnung des Mittelwertes für B:  $Bm = 215 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Fehlerbetrachtung:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta I}{I} \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta d_2}{d_2} + \frac{\Delta d_1}{d_1} = 7\%$$

$$= \frac{0,125}{I} + 4\% + 7\%$$

Berechnung der Steigung  $a$ :

Eine zweite Möglichkeit, um das Magnetfeld  $B$  zu berechnen:

Man hat  $a = B \cdot I$       daraus folgt:  $B = \frac{a}{I}$

Aus den bestehenden Messwerten findet man  $a = 5,17 \cdot 10^{-4} \text{ N/A}$  (Methode der kleinsten Quadrate),

Für das Magnetfeld ergibt sich:  $B = 207 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Bemerkung: Diesen Versuch hätte man auch mit einem hinreichend kräftigen U-Magneten durchführen können (z.B. MT3722).

### B) Versuche mit dem Elektromagnet

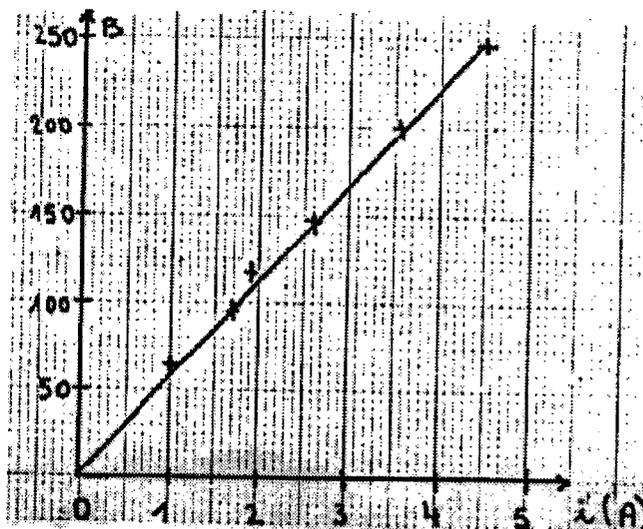
Wir wollen zeigen, dass das Magnetfeld, welches durch den Elektromagneten erzeugt wird, folgender Gesetzmässigkeit gehorcht:

$$B = K \cdot N \cdot I \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} K: \text{Konstante des Elektromagneten} \\ N: \text{Anzahl der Wicklungen} \\ I: \text{Strom in den Wicklungen} \end{array}$$

Man variiert den Strom zwischen 0 und 5 A. Für jeden Messpunkt von  $I$  wird die Stromwaage ins Gleichgewicht gebracht. Dieses Verfahren ermöglicht es, das B-Feld zu bestimmen.

Messbeispiel und Zeichnung der Kurven der Funktion  $B = f(I)$ :

$I \text{ (A)}$	$m \text{ (g)}$	$B(10^{-4} \text{ T})$
1	0,07	69
1,7	0,1	98
1,9	0,12	118
2,6	0,15	148
3,6	0,2	197
3,9	0,22	216
4,5	0,25	246



Die Messungen wurden bei einem Strom  $I = 3 \text{ A}$  in der Stromwaage durchgeführt.

Fehlerbetrachtung:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{0,125}{I} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{0,125}{I} + 11 \%$$

Beispiel:

$$I = 2 \text{ A}; \frac{\Delta B}{B} 17\%; \Delta B = 20 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

Die resultierende Kurve ergibt eine Gerade mit der Steigung

$$b = k \cdot N$$

- Berechnung von  $b$
- Berechnung der Konstante  $k$  des Elektromagneten

Mit den vorstehenden Messergebnissen findet man:

$$b = 5,09 \cdot 10^{-3} \text{ A / T (Methode der kleinsten Quadrate)}$$

$$k = 7,7 \cdot 10^{-5}$$

- Bestimmung von  $k$  mit Hilfe der Messergebnisse vom vorhergehenden Versuch:

gegeben war  $I = 4 \text{ A}; B_m = 217 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

es ergibt sich: 
$$k = \frac{B}{N \cdot I} = \frac{217 \cdot 10^{-4}}{66 \cdot 4} = 8,2 \cdot 10^{-5}$$

Unter Berücksichtigung der Messfehler stellt man fest, dass beide Werte für  $k$  nahezu identisch sind.