

## U10371 Elektromagnetisches Versuchsgerät

### Bedienungsanleitung

9/04 MH

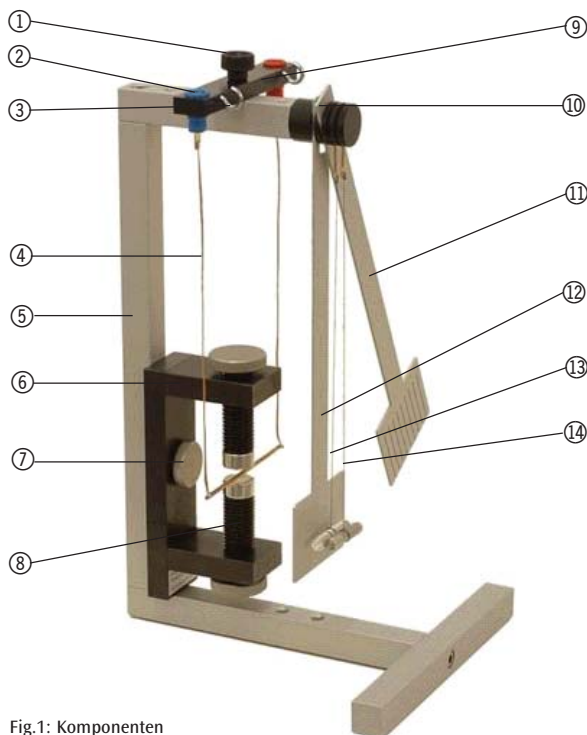


Fig.1: Komponenten

- ① Rändelschraube zur Querträgerbefestigung
- ② Gewindelöcher (5x) zur Querträgerbefestigung
- ③ Querträger
- ④ Leiterschaukel
- ⑤ Stativ
- ⑥ Rändelschraube M8x20 zur Magnetbefestigung
- ⑦ Magnet U10370 (nicht im Lieferumfang)
- ⑧ Gewindelöcher zur Magnetbefestigung
- ⑨ Leiterschaukel-Ablage
- ⑩ Pendel-Aufnahme
- ⑪ Geschlitztes Pendel
- ⑫ Volles Pendel
- ⑬ Glasstab mit Schnur und Haken
- ⑭ Aluminiumstab mit Schnur und Haken

Mit dem elektromagnetischen Versuchsgerät können Versuche zur Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter, zu induzierten Wirbelströmen und zum Dia- bzw. Paramagnetismus durchgeführt werden.

#### 1. Sicherheitshinweise

- Bei Verwendung des Magneten U10370 sind die dort angegebenen Sicherheitshinweise strikt einzuhalten. Z. B. Achtung bei Herzschrittmachern!
- Stromschlaggefahr! Die maximale Ausgangs-Spannung des verwendeten Netzgerätes darf 40 V nicht überschreiten.
- Verletzungsgefahr! Der Glasstab ⑬ ist zerbrechlich und daher vorsichtig zu handhaben. Scharfkantige Bruchstellen bergen ein erhebliches Verletzungsrisiko.

#### 2. Beschreibung, technische Daten

Das elektromagnetische Versuchsgerät besteht aus einem wackelfreien Aluminium-Stativ mit vorgegebenen Magnet-Positionen und Zubehör-Aufnahmen. Dadurch

entfallen zeitaufwendige Justierarbeiten. Weiterhin können alle Zubehörteile zur Aufbewahrung am Stativ befestigt werden. Dabei sollten die Pendel (⑪, ⑫) in den mittleren beiden Schlitzen der Pendel-Aufnahme und der Glas bzw. Aluminiumstab (⑬ bzw. ⑭) in den beiden äußeren Schlitzen hängen, damit sich die Schnüre nicht verheddern. Die Leiterschaukel hängt an einem Querträger, in dem Buchsen für Sicherheitsstecker (4 mm) angebracht sind. Der maximale Strom in der Leiterschaukel sollte 6 A nicht überschreiten.

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| Höhe des Stativs:          | 345 mm         |
| Pendel:                    | 290 x 70 mm    |
| Schlitzbreite:             | max. 1 mm      |
| Breite der Leiterschaukel: | 100 mm         |
| Stäbe:                     | 40 mm x 8 mm Ø |

#### 3. Bedienung und Wartung

- Zunächst ist das Stativ gemäß Fig. 1 zusammenzuschrauben. Dabei ist darauf zu achten, dass das Gerät senkrecht steht (Geodreieck).

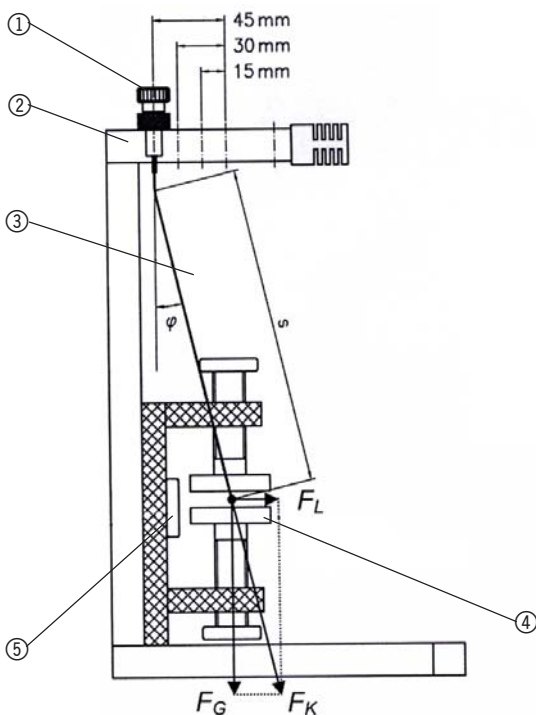
- Das geflochtene Kupferband der Leiterschaukel sollte glatt nach unten hängen und den Kupferdraht parallel zum Querträger halten. Ggf. kann das Kupferband zwischen zwei Fingern vorsichtig glatt gezogen werden. Im Bereich der Lötstellen sollte das Kupferband nicht gebogen werden (Bruchgefahr).
- Der Glas- und der Aluminiumstab hängen an jeweils einem dünnen Faden, der möglicherweise etwas verdreht ist. Vor einem Versuch sollten die Stäbe solange einzeln am Stativ hängen, bis sie sich nicht mehr verdrehen.
- **Wartung:** Das elektromagnetische Versuchsgerät ist prinzipiell wartungsfrei. Zur Reinigung kann es feucht (Wasser mit Spülmittel) abgewischt werden. Lösungsmittel wie Aceton, Waschbenzin oder Ethanol (Spiritus) können, außer im Bereich der Aufkleber, verwendet werden.
- Sollten sich die Schnüre des Glas- oder Aluminiumstabes verknotet oder verheddert haben, kann als Ersatz dünne Nähseide verwendet werden. Die Nähseide wird zunächst ca. 3-mal um den jeweiligen Stab gelegt und verknotet. Dann wird der Stab aufgehängt und horizontal ausbalanciert, indem die Nähseide auf dem Stab verschoben wird. Zum Schluss kann die Nähseide mit Sekundenkleber auf dem Stab fixiert werden (Sicherheitshinweise des Kleber-Herstellers beachten).

#### 4. Versuchsdurchführung und Auswertung

##### 4.1 Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld

###### 4.1.1 Versuchsaufbau

- Die beiden möglichen Versuchsaufbauten sind in Fig. 2 zu sehen.



- Der Versuchsaufbau gemäß Fig. 2 (rechts) dient zum Nachweis, dass die Lorentzkraft weder in Richtung des Magnetfeldes noch in Stromrichtung wirkt. Im ersten Fall würde die Leiterschaukel nach rechts oder links schwingen, im zweiten Fall müsste sie in die Zeichenebene hinein oder aus ihr heraus schwingen.
- Mit dem Versuchsaufbau gemäß Fig. 2 (links) kann die Lorentzkraft qualitativ und quantitativ nachgewiesen werden. Zum qualitativen Nachweis wird die Leiterschaukel senkrecht über den Polen des Magneten aufgehängt. Wird jetzt der Strom eingeschaltet, ist eine Auslenkung zu beobachten, die mit steigender Stromstärke größer wird.
- Zur quantitativen Bestimmung der Lorentzkraft dienen die 3 Gewindebohrungen, die gegenüber der Senkrechten um 15, 30 und 45 mm nach links verschoben sind. Wird die Leiterschaukel beispielsweise – wie in der Abbildung – um 45 mm nach links verschoben montiert und der Strom durch die Leiterschaukel so eingestellt, dass sich der dicke Kupferdraht genau mittig im Magnetfeld befindet, dann beträgt die Auslenkung der Leiterschaukel aus der Vertikalen auch genau 45 mm und die Lorentzkraft entspricht der Rückstellkraft, die die Leiterschaukel durch die Erdanziehung erfährt (siehe auch Versuchsauswertung).

###### 4.1.2 Versuchsdurchführung

- Bei den Messungen ist es zweckmäßig, folgende Größen zu notieren:
  - die Versuchsnummer,
  - den Polschuhabstand  $a$ ,
  - die Polschuhbreite in Leiterrichtung  $b$ ,
  - die Auslenkung  $c$  und
  - den Strom  $I$ , der bei mittlerer Lage<sup>1)</sup> des Kupferdrahtes fließt.

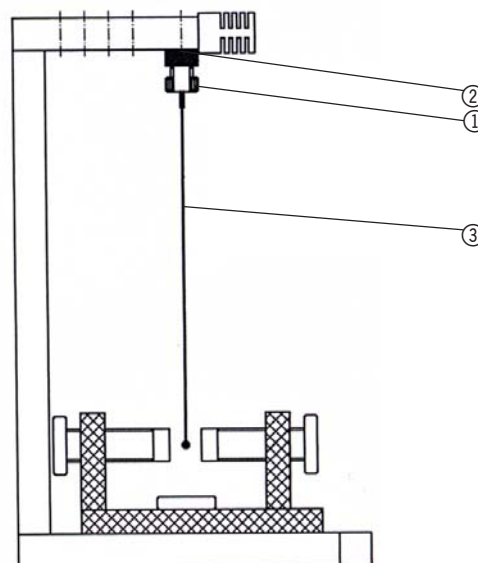


Fig. 2: Versuchsaufbau „Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld“.

① Rändelschraube, ② Querträger, ③ Leiterschaukel, ④ Polschuh, ⑤ Flachkopfrändelschraube

1) ggf. den horizontalen Abstand Kupferdraht - Rändelschraube (5) mit einem unmagnetischen Lineal messen

- Beispiel einer Versuchsreihe:

| Vers.-Nr. | Polschuhabstand $a$ [mm] | Polschuhbreite $b$ [mm] | Auslenkung $c$ [mm] | Strom $I$ [A] |
|-----------|--------------------------|-------------------------|---------------------|---------------|
| 1         | 10                       | 50                      | 15                  | 0,57          |
| 2         | 10                       | 50                      | 30                  | 1,20          |
| 3         | 10                       | 50                      | 45                  | 1,87          |
| 4         | 10                       | 20                      | 15                  | 1,16          |
| 5         | 10                       | 20                      | 30                  | 2,36          |
| 6         | 10                       | 20                      | 45                  | 3,57          |

#### 4.1.3 Versuchsauswertung

- Die Leiterschaukel wird vereinfachend als mathematisches Pendel betrachtet, d.h. die Masse der geflochtenen Kupferbänder wird vernachlässigt und der Kupferdraht wird als Punktmasse ( $m = 6,23$  g) angesehen. Die wirksame Pendellänge  $s$  ist etwas kleiner als die Länge der Kupferbänder, da diese im oberen Bereich nicht scharfkantig umknicken, wenn die Leiterschaukel ausgelenkt wird. Die Länge  $s$  ergibt sich daher aus dem gedachten Schnittpunkt der linear verlängerten Kupferbänder mit der Vertikalen (vergl. Fig. 2). In etwa gilt:  $s = 200$  mm.
- Die resultierende Kraft im Kupferband  $F_K$ , die sich aus der Lorentzkraft  $F_L$  und der Gewichtskraft  $F_G$  zusammensetzt ist um den Winkel  $\varphi$  geneigt, da das Kupferband (praktisch) keine Querkräfte aufnimmt. Daher gilt:

$$\frac{F_L}{F_G} = \tan \varphi$$

$$\Leftrightarrow F_L = mg \frac{\frac{c}{s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{s}\right)^2}} \quad (1)$$

- In der Versuchsreihe wurden die Polschuhe bei den Versuchen 4 - 6 im Vergleich zu den Versuchen 1 - 3 um  $90^\circ$  gedreht. Dadurch hat sich die Leiterlänge, die in das Magnetfeld eintaucht, geändert. Bei der Auswertung dürfen jetzt aber nicht die wahren Polschuhmaße zugrunde gelegt werden, da das Magnetfeld an den Rändern „herausquillt“ (vergl. Fig. 3).

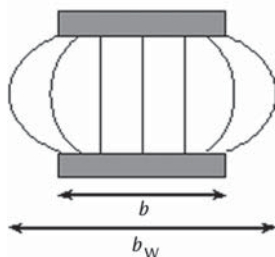


Fig. 3: Randeffekte an den Polschuhkanten

- Die wirksame Leiterlänge im Magnetfeld ergibt sich näherungsweise zu:

$$b_w = b + a \quad (2)$$

- Die Auswertung der Versuchsreihe unter Verwendung der Gln. 1 und 2 liefert:

| Vers.-Nr. | Wirksame Leiterlänge $b_w$ [mm] | Lorentzkraft $F_L$ [mN] | Strom $I$ [A] |
|-----------|---------------------------------|-------------------------|---------------|
| 1         | 60                              | 4,60                    | 0,57          |
| 2         | 60                              | 9,27                    | 1,20          |
| 3         | 60                              | 14,1                    | 1,87          |
| 4         | 30                              | 4,60                    | 1,16          |
| 5         | 30                              | 9,27                    | 2,36          |
| 6         | 30                              | 14,1                    | 3,57          |

- Das Ergebnis ist auch in Fig. 4 dargestellt. Es ist unmittelbar zu erkennen, dass die Lorentzkraft proportional zum Strom ist. Eine Auswertung der Geradensteigungen zeigt weiterhin, dass die Lorentzkraft auch zur wirksamen Leiterlänge proportional ist. Also gilt:

$$F_L \propto b_w I$$

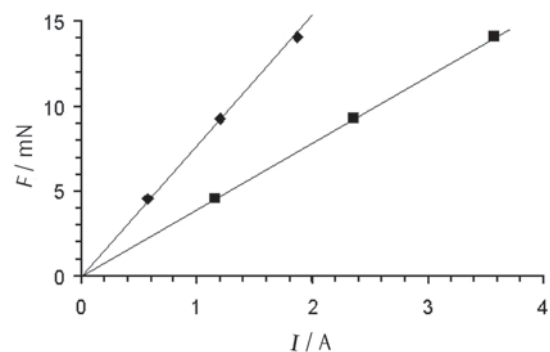


Fig. 4: Lorentzkraft als Funktion des Stromes im Leiter. Quadratische Symbole:  $b_w = 60$  mm, Rauten:  $b_w = 30$  mm

#### 4.2 Induzierte Wirbelströme

- Der Versuchsaufbau ist in Fig. 5 dargestellt. Der Polabstand beträgt etwa 10 - 30 mm und wird variiert. Werden beide Pendel zusammen um den gleichen

Winkel ausgelenkt und losgelassen, dann wird das volle Pendel sehr schnell abgebremst, während das geschlitzte Pendel einige Schwingungen ausführt.

- Erklärung: Bei den Versuchen im Abschnitt 4.1 floss ein Strom durch die Leiterschaukel. Dadurch wurden Ladungen (Elektronen) in einem Magnetfeld bewegt, was offenbar zu einer messbaren Kraft (der Lorentzkraft) auf die Elektronen führte.



Fig. 5: Versuchsaufbau „Induzierte Wirbelströme“

- Auch in diesem Versuch werden Ladungen - freie Elektronen im Aluminium – in einem Magnetfeld bewegt, wobei die Bewegung hier mechanischer Natur ist. Durch diese Bewegung wirkt auch hier die Lorentzkraft auf die Elektronen, was einen Elektronenfluss, also einen Strom, im Aluminium zur Folge hat, der in diesem Versuch je nach Pendelbewegungsrichtung vertikal von oben nach unten oder umgekehrt fließt.
- In dem vollen Pendel kommt es nun zum „Kurzschluss“, da der induzierte Strom in den Pendelbereichen außerhalb des Magnetfeldes zurückfließen kann. Auf diese Weise entsteht ein Wirbelstrom, der sehr hoch sein kann und zu einer Erwärmung des Aluminiums führt. Die Pendelenergie wird also zunächst in elektrische Energie und dann in Wärme umgewandelt.
- In dem geschlitzten Pendel kann sich der Wirbelstrom nicht ausbilden, da durch die Schlitze die Aluminium-Bereiche außerhalb des Magnetfeldes von den Bereichen innerhalb isoliert sind. Zwar werden die Elektronen zunächst auch in eine Richtung verschoben, doch wenn sich viele Elektronen

oben oder unten im Pendel angesammelt haben stoßen sie sich gegenseitig ab und die so entstehende Spannung steht mit der Lorentzkraft ohne Stromfluss im Gleichgewicht. Die Pendelenergie wird also nicht in Wärme umgewandelt.

#### 4.3 Dia- und Paramagnetismus

- Der Versuchsaufbau entspricht prinzipiell Fig. 5. Statt der Pendel wird jetzt entweder der Aluminium- oder der Glasstab in das Magnetfeld gehängt (vorher ist ein eventueller Faden-Drall zu beseitigen, siehe Abschnitt 3). Der Glasstab wird sich zunächst noch etwas hin- und herdrehen, während der Aluminiumstab sich nur sehr langsam (induzierte Wirbelströme, siehe letzter Abschnitt) in seine Endposition bewegt. Nach einiger Zeit stellen sich die Stäbe wie in Fig. 6 gezeigt ein.

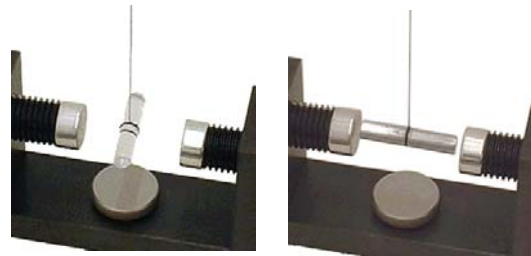


Fig. 6: Glasstab (links) und Aluminiumstab (rechts) im Magnetfeld

- Durch Lösen der Rändelschraube, die den Magneten hält, und langsames Drehen des Magneten kann gezeigt werden, dass die Ausrichtung der Stäbe relativ zum Magneten bestehen bleibt und daher nicht auf die rein mechanisch bedingte Ruheposition (kein Fadendrall) zurückzuführen ist.
- Erklärung: Obwohl weder Glas noch Aluminium magnetisch sind, richten sich beide Stäbe im Magnetfeld aus. Die entscheidende Größe dabei ist die relative Permeabilität  $\mu_r$ , die angibt, um wie viel das betreffende Material die Flussdichte eines magnetischen Feldes gegenüber dem Vakuum vervielfacht. Erstaunlicherweise – und anders als bei der Dielektrizitätskonstanten – kann die relative Permeabilität größer oder kleiner als 1 sein. Bei Aluminium beträgt sie<sup>2)</sup>  $= 1,000023$  und bei Glas  $= 0,99999$ . Bei Aluminium wird die Flussdichte also verstärkt und der Stab dreht sich in Feldrichtung. Dieser Effekt wird als Paramagnetismus bezeichnet. Bei Glas ist es umgekehrt. Der Stab dreht sich aus dem Feld und der Effekt wird Diamagnetismus genannt.

<sup>2)</sup> Grimsehl, Physik II, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1955

## U10371 Electromagnetic experiment apparatus

### Instruction sheet

9/04 MH

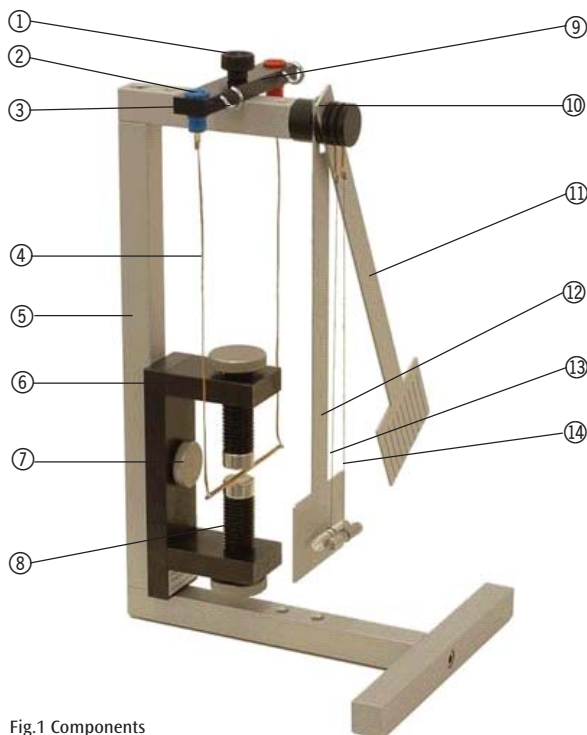


Fig.1 Components

- ① Knurled screws to fasten the cross bar
- ② Threaded holes (5x) to mount the cross bar
- ③ Cross bar
- ④ Conductor swing
- ⑤ Stand
- ⑥ M8x20 knurled screws for attaching magnet
- ⑦ Magnet U10370 (not included in scope of delivery)
- ⑧ Threaded holes to fasten magnet
- ⑨ Conductor swing suspenders
- ⑩ Pendulum axle mount
- ⑪ Slotted pendulum
- ⑫ Smooth pendulum
- ⑬ Glass rod with cord and hook
- ⑭ Aluminium rod with cord and hook

Using the electromagnetic experiment apparatus you can conduct experiments on the force on a current-carrying conductor, on induced eddy currents and on dia- or paramagnetism.

#### 1. Safety instructions

- When using the magnet U10370, strict compliance with the safety instructions specified for this device is imperative, e.g. warning against use by persons with cardiac pacemakers!
- Electric shock hazard! The maximum output voltage of the mains power supply unit being used may not exceed 40 V.
- Burn hazard! The glass rod ⑬ is fragile and must consequently be handled with care. Sharp edges of broken glass give rise to a considerable risk of injury.

#### 2. Description, technical data

The electromagnetic experiment apparatus consists of a rigid aluminium stand with preset magnet positions

and accessory mounts. This cuts out time-consuming adjustment work. Furthermore all accessory components can be fastened onto the stand for ease of storage. The pendulums (⑪, ⑫) should be suspended in the middle of the two slots of the pendulum mount and glass or aluminium rods (⑬ and ⑭) that the cords do not become tangled. The conductor swing hangs from a cross bar equipped with sockets for attaching safety plugs (4 mm). The maximum current flowing in the conductor swing should not exceed 6 A.

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| Height of stand:          | 345 mm         |
| Pendulum:                 | 290 x 70 mm    |
| Slot width:               | max. 1 mm      |
| Width of conductor swing: | 100 mm         |
| Rods:                     | 40 mm x 8 mm Ø |

#### 3. Operation and maintenance

- First the stand is screwed together as specified in Fig. 1. Make sure here that the apparatus is standing upright (triangular protractor).
- The braided copper strands of the conductor swing should hang smoothly down and the copper wire



should be held parallel to the cross bar. If necessary the copper strands can be carefully pulled between two fingers until they are smoothed out. In the region of the soldering points the copper strands should not be bent (danger of breakage).

- The glass and aluminum rod are each suspended on a thin thread, which might get somewhat twisted. Before starting an experiment the rods should hung individually on the stand until they are no longer twisted.
- Maintenance: the electromagnetic experiment apparatus is basically maintenance-free. To clean simply wipe over it with soap and water. Solvents like acetone, petroleum ether or ethanol (white spirit or alcohol) can be used except in the area of the label.
- If the cord of the glass or aluminium rod have become knotted or shredded, thin sewing silk can be used as a substitute. The sewing silk thread is first wrapped around the respective rod approx. 3 times and then tied in a knot. Then the rod is suspended and balanced out horizontally by moving the sewing silk thread along the rod. Finally the sewing silk thread is permanently attached to the rod using fast-acting adhesive (observe the safety instructions of the glue manufacturer).

#### 4. Experiment procedure and evaluation

##### 4.1 Current-carrying conductor in a magnetic field

###### 4.1.1 Experiment setup

- The two possible experiment set-ups can be seen in Fig. 2.

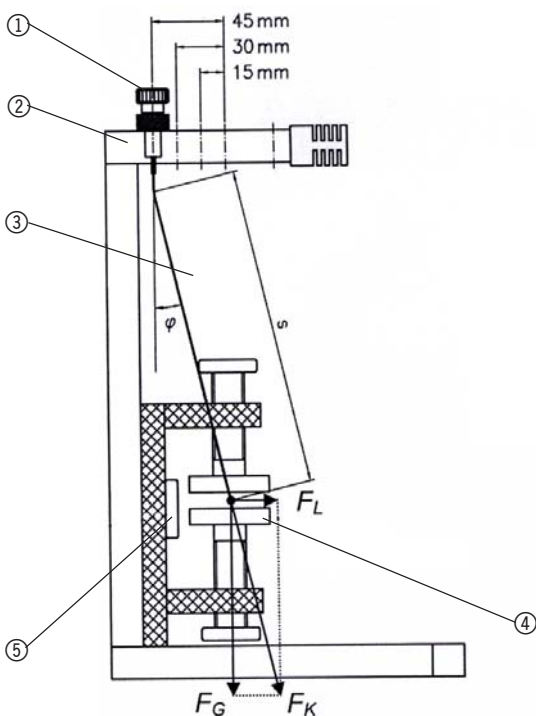


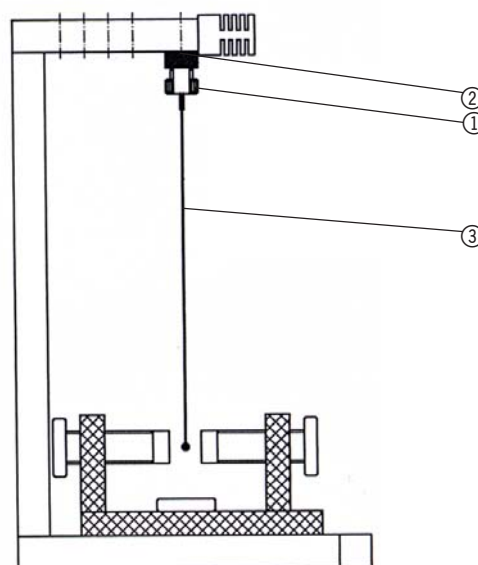
Fig. 2: Experiment setup "current carrying conductor in a magnetic field".

- ① Knurled screw, ② Cross bar, ③ Conductor swing, ④ Pole piece, ⑤ Flat headed knurled screw

- The experiment setup as specified in Fig. 2 (right) is used to verify that the Lorentz force acts neither in the direction of the magnetic field nor in the direction of current flow. In the first case the conductor swing would swing to the right or to the left, in the second case it would be forced to swing into or out of the plane of the drawing.
- Using the experiment setup specified in Fig. 2 (left) the Lorentz force can be demonstrated qualitatively and quantitatively. For the qualitative verification the conductor swing is suspended vertically above the poles of the magnet. When the current is switched on, we then observe deflection which gains in magnitude the more the current increases.
- For the quantitative determination of the Lorentz force the 3 threaded bore holes are used which are shifted at distances of 15, 30 and 45 to the left of the perpendicular holes. If, for example – as shown in the figure, the conductor swing is mounted shifted to the left by 45 mm and the current flowing through the conductor swing is set so that the copper wire is right in the middle of the magnetic field, then the swing's deflection from the vertical also amounts to precisely 45 mm and the Lorentz force corresponds to the returning force, which the conductor swing experiences due to the earth's gravity (see also experiment evaluation).

###### 4.1.2 Experiment procedure

- During the measurements it is expedient to note down the following variables:
  - the experiment number,
  - the pole piece separation  $a$ ,
  - the pole piece width in the conductor direction  $b$ ,
  - the deflection  $c$  and
  - the current  $I$ , which flows when the copper wire is positioned in the middle<sup>1)</sup>.



1) If necessary, measure the horizontal distance between the copper wire and the knurled screw (5) with a non-magnetic ruler

- Example of an experiment sequence:

| Exp. no. | Pole piece separation $a$ [mm] | Pole shoe width $b$ [mm] | Deflection $c$ [mm] | Current $I$ [A] |
|----------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| 1        | 10                             | 50                       | 15                  | 0.57            |
| 2        | 10                             | 50                       | 30                  | 1.20            |
| 3        | 10                             | 50                       | 45                  | 1.87            |
| 4        | 10                             | 20                       | 15                  | 1.16            |
| 5        | 10                             | 20                       | 30                  | 2.36            |
| 6        | 10                             | 20                       | 45                  | 3.57            |

#### 4.1.3 Experiment evaluation

- The conductor swing is considered as a simple mathematical pendulum, i.e. the weight of the braided copper strands is neglected and the copper wire is seen as a point mass ( $m = 6.23$  g). The effective pendulum length  $s$  is somewhat smaller than the length of the copper strands, due to the fact that these do not fold cleanly at the upper edges, when the conductor swing is deflected. The length  $s$  is thus the result from the theoretical point where the elongation of the linear copper strands intersects with the verticals (cf. Fig. 2). In approximate terms:  $s = 200$  mm.
- The resulting force on the copper strand  $F_k$  is comprised of the Lorentz force  $F_L$  and the weight  $F_G$  and is inclined at an angle  $\varphi$  because the copper strand is (virtually) subject to no lateral forces. Consequently it is true that:

$$\frac{F_L}{F_G} = \tan \varphi$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = mg \frac{\frac{c}{s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{s}\right)^2}} \quad (1)$$

- In the above experiment sequence the pole pieces in experiments 4 - 6 were rotated by  $90^\circ$  in comparison to experiments 1 - 3. As such the conductor length which protrudes into the magnetic field changes. During the evaluation however, the true pole piece size may not be used as the basis because the magnetic field “bulges out” beyond the edges (see Fig. 3).

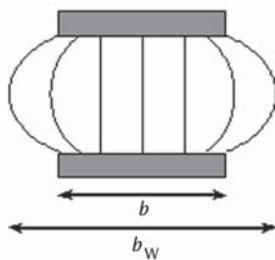


Fig. 3: Bulging effects at the edges of the pole pieces

- The resulting effective length within the magnetic field is approximately:
- $$b_w = b + a \quad (2)$$
- The evaluation of the experiment series using Equations 1 and 2 yields the following:

| Exp. no. | Effective conductor length $b_w$ [mm] | Lorentz force $F_L$ [mN] | Current $I$ [A] |
|----------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1        | 60                                    | 4.60                     | 0.57            |
| 2        | 60                                    | 9.27                     | 1.20            |
| 3        | 60                                    | 14.1                     | 1.87            |
| 4        | 30                                    | 4.60                     | 1.16            |
| 5        | 30                                    | 9.27                     | 2.36            |
| 6        | 30                                    | 14.1                     | 3.57            |

- The result is also depicted in Fig. 4. It is immediately discernible that the Lorentz force is proportional to the current. An evaluation of the linear gradients shows furthermore that the Lorentz force is also proportional to the effective conductor length. Consequently it holds true that:

$$F_L \propto b_w I$$

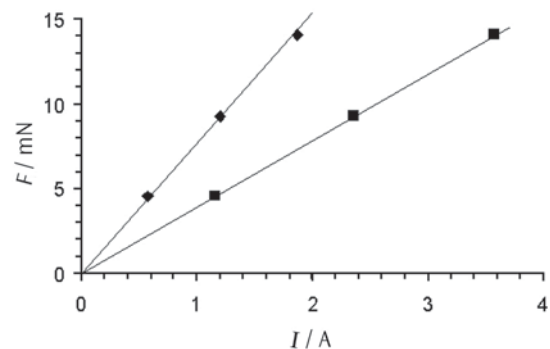


Fig. 4: Lorentz force as a function of the current flowing in the conductor. Square symbols:  $b_w = 60$  mm, rhombuses:  $b_w = 30$  mm

#### 4.2 Induced eddy currents

- The experiment set up is depicted in Fig. 5. The pole gap amounts to approximately 10 - 30 mm and is varied. If both pendulums are jointly displaced by the same angle and then released, the

solid pendulum's swing is rapidly damped (braking) to a stop, whereas the slotted pendulum undergoes several swings first.

- Explanation: in the experiments in section 4.1 a current was flowing through the conductor swing. This brought about a movement of charges (electrons) in a magnetic field, which evidently led to a measurable force (the Lorentz force) acting on the electrons.



Fig. 5: Experiment set up for "induced eddy currents"

- In this experiment too, charges – free electrons in aluminum – are set in motion in a magnetic field, whereby the motion here is of a mechanical nature. Through this motion the Lorentz force also acts on the electrons, leading to a flow of electrons, i.e. a current flowing in the aluminium, which in this experiment flows vertically from top down or vice versa depending on the motion of the pendulum.
- In the solid pendulum there is a kind of "short-circuit" due to the fact that the induced current can flow back through the parts of the pendulum outside the magnetic field. This is how an eddy current arises, which can be very high and can lead to the build up of heat in the aluminium. The pendulum energy is initially converted into electrical energy and then into heat.
- In the slotted pendulum eddy currents cannot build up because the slots isolate the aluminium area outside the magnetic field from the area inside the field. Indeed the electrons here are also initially pushed in one direction or the other but once a great many electrons have collected at the

top or bottom of the pendulum they repulse each other with the result that the voltage generated is in equilibrium with the Lorentz force and current does not flow. Thus the pendulum energy is not converted into heat.

#### 4.3 Dia- and paramagnetism

- The experiment setup corresponds in principle with Fig. 5. But now instead of suspending the pendulum we suspend either the aluminum or the glass rod in the magnetic field (prior to this please smooth out any twisted threads, see Section 3). The glass rod first starts to turn one way and then the other while the aluminium rod only very slowly (due to induced eddy currents, see last section) into its final position. After some time has elapsed the rods settle in the positions shown in Fig. 6.

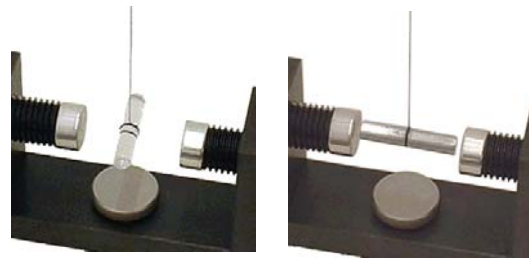


Fig. 6: Glass rod (left) and aluminium rod (right) in the magnetic field

- By loosening the knurled screw which holds the magnets and slowly turning the magnet it can be demonstrated that the orientation of the rods remain aligned relative to the magnets and that consequently the position cannot be attributed to the rest position emerging mechanically (caused by twisted threads).
- Explanation: although neither glass nor aluminium are magnetic, both rods align themselves in the magnetic field. The decisive variable here is the relative permeability  $\mu_r$ . This specifies the factor by which the flux density of the magnetic field is multiplied within the material concerned, as compared to the flux in a vacuum. Surprisingly – and in contrast to dielectric constants – the relative permeability can be greater or smaller than 1. In aluminum = 1.000023<sup>2)</sup> and in glass = 0.99999. Thus in aluminum the flux density is amplified and the rod turns in the field direction. This effect is referred to as paramagnetism. In glass we have the opposite effect. The rod rotates out of the field and the effect is called diamagnetism.

<sup>2)</sup> Grimsehl, Physik II, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1955



## U10371 Appareil d'expérimentation électromagnétique

### Instructions d'utilisation

9/04 MH

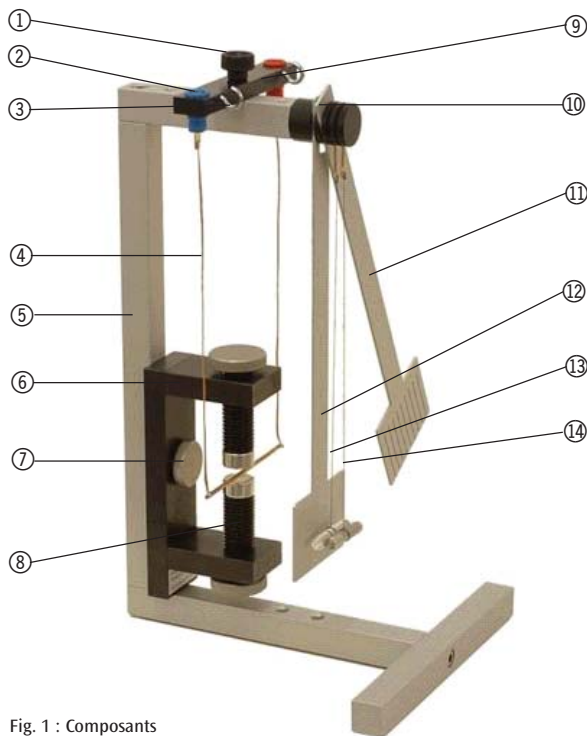


Fig. 1 : Composants

- ① Vis moletée pour fixer le support transversal
- ② Cinq trous filetés pour fixer le support transversal
- ③ Support transversal
- ④ Balançoire
- ⑤ Support
- ⑥ Vis moletée M 8x20 pour fixer l'aimant
- ⑦ Aimant U10370 (non fourni)
- ⑧ Trous filetés pour fixer l'aimant
- ⑨ Réception de balançoire
- ⑩ Logement du pendule
- ⑪ Pendule à fentes
- ⑫ Pendule entier
- ⑬ Barre en verre avec cordon et crochet
- ⑭ Barre en aluminium avec cordon et crochet

L'appareil d'expérimentation électromagnétique permet de réaliser des expériences sur la force exercée sur un conducteur traversé par du courant, sur les courants de Foucault induits ainsi que sur le diamagnétisme et le paramagnétisme.

#### 1. Consignes de sécurité

- En cas d'emploi de l'aimant U10370, respecter rigoureusement les consignes de sécurité indiquées. Par ex., ne jamais l'utiliser avec un stimulateur cardiaque !
- Risque de choc électrique ! La tension de sortie maximale du bloc d'alimentation ne doit pas dépasser 40 V.
- Risque de blessure ! La barre en verre ⑬ est fragile et doit être manipulée avec prudence. Les bris à bords tranchants constituent un risque de blessure accru.

#### 2. Description, caractéristiques techniques

L'appareil d'expérimentation électromagnétique est constitué d'un support en aluminium stable avec des

positions prédéfinies de l'aimant et des logements pour des accessoires. De longs travaux d'ajustage sont superflus. En outre, tous les accessoires destinés au rangement peuvent être fixés au support. Les pendules (⑪, ⑫) doivent être suspendus dans les deux fentes médianes du logement de pendules et les barres en verre et en aluminium (⑬ et ⑭) dans les deux fentes extérieures, afin que les cordons ne s'emmêlent pas. La balançoire est suspendue à un support transversal présentant des douilles pour la fiche de sécurité (4 mm). Le courant maximum de la balançoire ne doit pas dépasser 6 A.

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| Hauteur du support :       | 345 mm         |
| Pendule :                  | 290 x 70 mm    |
| Largeur de fente :         | max. 1 mm      |
| Largeur de la balançoire : | 100 mm         |
| Barres :                   | 40 mm x 8 mm Ø |

#### 3. Manipulation et entretien

- Assembler tout d'abord le support (Fig. 1). Veiller à ce que l'appareil soit en position verticale (utiliser une équerre).

- La bande de cuivre de la balançoire doit pendre vers le bas et le fil de cuivre être parallèle au support transversal. Le cas échéant, lisser la bande entre deux doigts. La bande de cuivre ne doit pas être pliée au niveau des points de brasage (risque de cassure).
- Les barres en verre et en aluminium pendent à un fil fin qui peut être quelque peu torsadé. Avant de commencer une expérience, laisser les barres pendues chacune au support, jusqu'à ce qu'elles ne tournent plus.
- Entretien : fondamentalement, l'appareil d'expérimentation électromagnétique ne nécessite aucun entretien. Pour le nettoyer, on peut l'essuyer avec de l'eau et un produit de rinçage. On peut utiliser des solvants, comme l'acétone, la ligroïne ou l'éthanol, sauf au niveau des étiquettes.
- Si les cordons de la barre en verre ou en aluminium se nouent ou s'emmêlent, on peut utiliser de la soie à coudre fine. Celle-ci est alors enroulée env. 3 fois autour de la barre, puis nouée. Ensuite, accrocher et équilibrer la barre en position horizontale en déplaçant la soie sur la barre. Pour terminer, la soie peut être fixée à la barre avec une colle rapide (observer les consignes de sécurité du fabricant de colle).

#### 4. Réalisation et évaluation des expériences

##### 4.1 Conducteur traversé par du courant dans le champ magnétique

###### 4.1.1 Montage de l'expérience

- Les deux montages de l'expérience sont illustrés dans la figure 2.

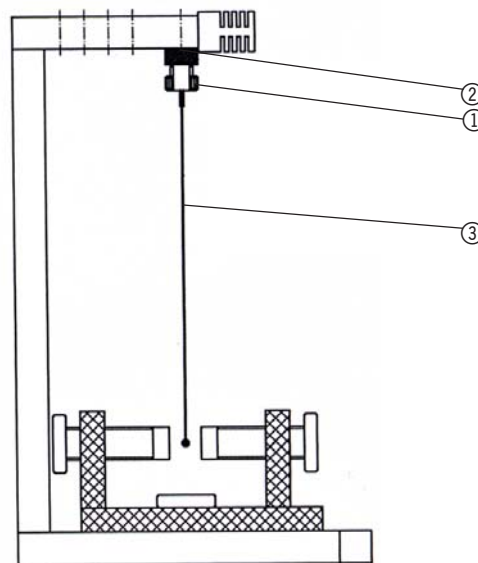
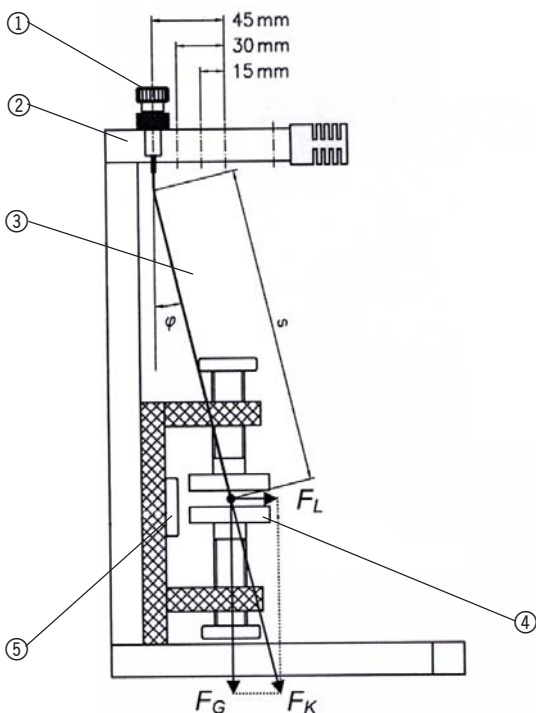


Fig. 2 : Conducteur traversé par du courant dans le champ magnétique

① vis moletée, support transversal, ③ balançoire, ④ épanouissement polaire, ⑤ vis moletée à tête plate

1) au besoin, mesurer l'écart horizontal entre le fil de cuivre et la vis moletée (5) avec une règle non magnétique

- Le montage de la figure 2 (à droite) permet de démontrer que la force de Lorentz agit ni dans le sens du champ magnétique, ni dans le sens du courant. Dans le premier cas, la balançoire oscillerait à droite ou à gauche, dans le second, elle oscillerait vers ou hors du plan du dessin.
- Le montage de la figure 2 (à gauche) permet une démonstration qualitative et quantitative de la force de Lorentz. Pour la démonstration qualitative, la balançoire est suspendue verticalement au-dessus des pôles de l'aimant. Si l'on applique maintenant du courant, on peut observer une déviation qui augmente au fur et à mesure qu'augmente l'intensité du courant.
- Pour la démonstration quantitative de la force de Lorentz, on se sert des trois trous filetés qui sont décalés de 15, 30 et 45 mm à gauche par rapport à la verticale. Si la balançoire est montée décalée à gauche par exemple de 45 mm (cf. la figure) et que le courant la traversant est réglé de telle sorte que le gros fil en cuivre se trouve très précisément au centre du champ magnétique, la balançoire dévie alors de la verticale de très exactement 45 mm et la force de Lorentz correspond à la force de rappel à laquelle est soumise la balançoire par l'attraction terrestre (voir aussi l'évaluation de l'expérience).

###### 4.1.2 Réalisation de l'expérience

- Pour les mesures, il est judicieux de noter les grandeurs suivantes :
  - numéro de l'expérience,
  - écart d'épanouissements  $a$ ,
  - largeur d'épanouissement dans le sens du conducteur  $b$ ,
  - déviation  $c$  et
  - courant  $I$ , qui, en position centrale<sup>1</sup>, traverse le fil de cuivre.

- Exemple d'une série d'expériences :

| N° d'exp. | Ecart d'épanouissements $a$ [mm] | Largeur d'épanouissement $b$ [mm] | Déviations $c$ [mm] | Courant $I$ [A] |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------|
| 1         | 10                               | 50                                | 15                  | 0,57            |
| 2         | 10                               | 50                                | 30                  | 1,20            |
| 3         | 10                               | 50                                | 45                  | 1,87            |
| 4         | 10                               | 20                                | 15                  | 1,16            |
| 5         | 10                               | 20                                | 30                  | 2,36            |
| 6         | 10                               | 20                                | 45                  | 3,57            |

#### 4.1.3 Evaluation de l'expérience

- Simplifiée, la balançoire est considérée comme un pendule mathématique, c'est-à-dire que la masse des bandes en cuivre est négligée et le fil de cuivre est considéré comme une masse ponctuelle ( $m = 6,23$  g). La longueur utile du pendule  $s$  est un peu plus petite que la longueur des bandes de cuivre, car celles-ci, dans la partie supérieure, ne se plient pas en bords vifs lorsque la balançoire est déviée. La longueur  $s$  résulte donc du point d'intersection imaginaire formé par le prolongement linéaire des bandes de cuivre et la droite perpendiculaire (cf. Fig. 2). On a à peu près la valeur suivante :  $s = 200$  mm.
- La force résultante dans la bande de cuivre  $F_R$ , composée de la force de Lorentz  $F_L$  et de la force pondérale  $F_G$ , est inclinée dans un angle  $\varphi$ , car la bande de cuivre n'absorbe (pratiquement) aucune force transversale. On a alors l'équation suivante :

$$\frac{F_L}{F_G} = \tan \varphi$$

$$\Leftrightarrow F_L = mg \frac{\frac{c}{s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{s}\right)^2}} \quad (1)$$

- Dans la série d'expériences susnommées, les épanouissements polaires des expériences 4 - 6, comparés aux expériences 1 - 3, sont inclinés de  $90^\circ$ . Ainsi la longueur du conducteur qui plonge dans le champ magnétique est-elle modifiée. Mais lors de l'évaluation, il ne faut pas se baser sur les véritables dimensions des épanouissements polaires, car le champ magnétique « dépasse » sur les bords (cf. Fig. 3).

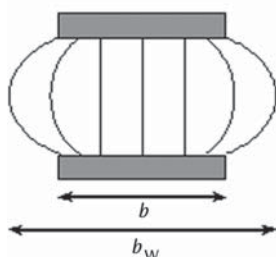


Fig. 3: Effets sur les bords des épanouissements polaires

- La longueur utile approximative du conducteur dans le champ magnétique résulte de l'équation suivante :

$$b_w = b + a \quad (2)$$

- L'évaluation des expériences avec les équations 1 et 2 donne :

| N° d'exp. | Longueur de conducteur utile $b_w$ [mm] | Force de Lorentz $F_L$ [mN] | Courant $I$ [A] |
|-----------|---|-----------------------------|-----------------|
| 1         | 60                                      | 4,60                        | 0,57            |
| 2         | 60                                      | 9,27                        | 1,20            |
| 3         | 60                                      | 14,1                        | 1,87            |
| 4         | 30                                      | 4,60                        | 1,16            |
| 5         | 30                                      | 9,27                        | 2,36            |
| 6         | 30                                      | 14,1                        | 3,57            |

- Le résultat est illustré dans la figure 4. On observe que la force de Lorentz est proportionnelle au courant. Une évaluation des pentes des droites montre en outre que la force de Lorentz est également proportionnelle à la longueur utile du conducteur. On a donc l'équation suivante :

$$F_L \propto b_w I$$

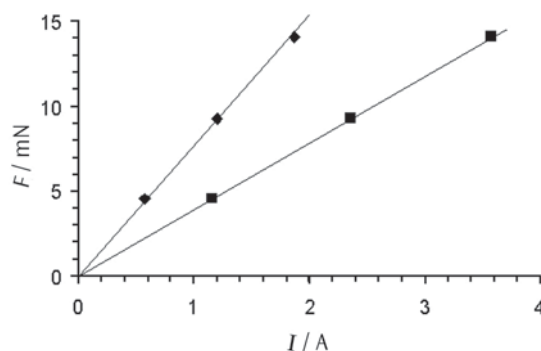


Fig. 4 : Force de Lorentz comme fonction du courant dans le conducteur. Symboles carrés :  $b_w = 60$  mm, losanges :  $b_w = 30$  mm

#### 4.2 Courants de Foucault induits

- Le montage de l'expérience est illustré dans la figure 5. L'écart polaire est d'env. 10 - 30 mm et peut être varié. Si les deux pendules sont déviés ensemble dans le même angle, puis relâchés, le

pendule entier freinera plus rapidement, tandis que le pendule à fentes exécutera quelques oscillations.

- Explication : au cours des expériences du paragraphe 4.1, un courant a traversé la balançoire. Puis, des charges (électrons) ont été mises en mouvement dans un champ magnétique, ce qui a eu pour effet qu'une force mesurable (force de Lorentz) s'est exercée sur les électrons.



Fig. 5 : Courants de Foucault induits

- Dans cette expérience, des charges (électrons libres dans l'aluminium) ont également été mises en mouvement dans un champ magnétique, le mouvement étant cette fois de nature mécanique. Par ce mouvement, la force de Lorentz agit également sur les électrons, ce qui entraîne dans l'aluminium un flux d'électrons, donc un courant circulant dans cette expérience soit verticalement de haut en bas, soit inversement, selon le sens de déplacement du pendule.
- Dans le pendule entier, on observe un « court-circuit », car le courant induit dans les zones du pendule peut retourner hors du champ magnétique. Un courant de Foucault se forme alors, qui peut être très élevé et entraîner un réchauffement de l'aluminium. L'énergie du pendule est donc transformée d'abord en énergie électrique, puis en chaleur.
- Dans le pendule à fentes, le courant de Foucault ne peut pas se former, car, par les fentes, les zones en aluminium hors du champ magnétique sont isolées par les zones situées à l'intérieur. Les élec-

trons sont d'abord déplacés dans un sens, mais lorsqu'un grand nombre s'est accumulé en haut ou en bas dans le pendule, ils se repoussent et la tension ainsi formée est en équilibre avec la force de Lorentz sans flux de courant. L'énergie du pendule n'est donc pas convertie en chaleur.

#### 4.3 Diamagnétisme et paramagnétisme

- Le montage de l'expérience correspond dans son principe à la figure 5. A la place du pendule, on accroche à présent dans le champ magnétique la barre en aluminium ou en verre (éliminer auparavant l'éventuelle torsion du fil, cf. paragraphe 3). La barre en verre oscillera encore un peu, tandis que la barre en aluminium ne prendra que très lentement sa position finale (courants de Foucault induits, voir au paragraphe précédent). Après un certain temps, les barres se positionneront comme le montre la figure 6.

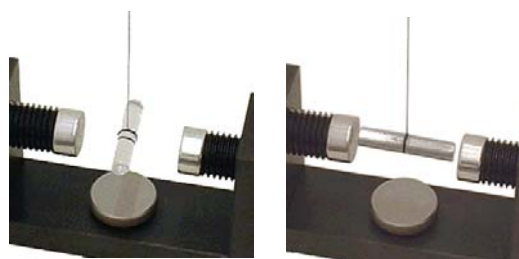


Fig. 6 : Barre en verre (à gauche) et barre en aluminium (à droite) dans un champ magnétique

- En desserrant la vis moletée qui retient l'aimant et en tournant lentement ce dernier, on peut montrer que l'orientation des barres par rapport à l'aimant ne change pas et ne résulte donc pas de la position de repos purement mécanique (pas de torsion de fil).
- Explication : bien que ni le verre ni l'aluminium ne soient magnétiques, les deux barres s'orientent dans le champ magnétique. La perméabilité relative  $\mu_r$ , qui indique de combien le matériau multiplie la densité de flux d'un champ magnétique par rapport au vide, constitue la grandeur déterminante. Il est surprenant que la perméabilité relative puisse être supérieure ou inférieure à 1, contrairement aux constantes diélectriques. Avec l'aluminium, elle est de <sup>2)</sup>  $1,000023$ , et avec le verre, de  $0,99999$ . Avec l'aluminium, la densité est donc amplifiée et la barre tourne dans le sens de la flèche. On appelle cet effet le « paramagnétisme ». Avec le verre, c'est l'inverse. La barre s'écarte du champ et l'effet est appelé le « diamagnétisme ».

<sup>2)</sup> Grimsehl, Physik II, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1955

## U10371 Apparecchio per esperimenti elettromagnetici

### Istruzioni per l'uso

9/04 MH

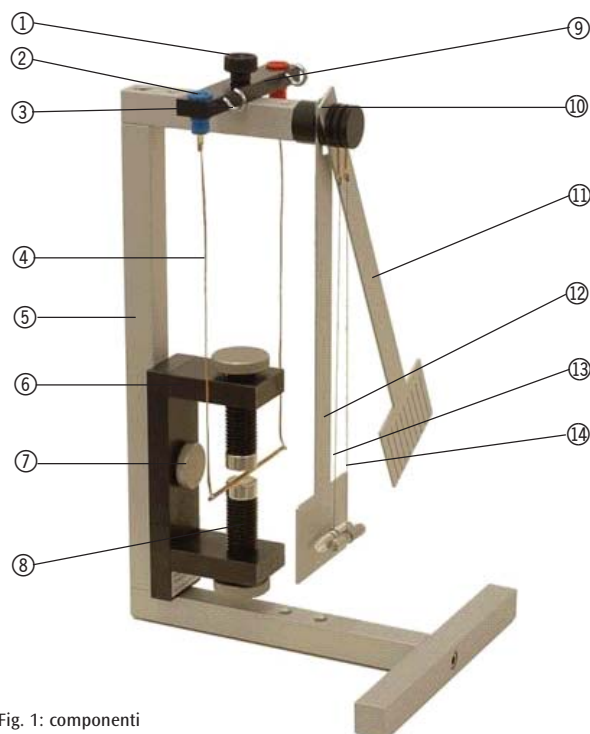


Fig. 1: componenti

- ① Vite a testa zigrinata per il fissaggio della traversa
- ② Fori filettati (5x) per il fissaggio della traversa
- ③ Traversa
- ④ Bilancino conduttore
- ⑤ Supporto
- ⑥ Vite a testa zigrinata M 8x20 per il fissaggio del magnete
- ⑦ Magnete U10370 (non fornito in dotazione)
- ⑧ Fori filettati per il fissaggio del magnete
- ⑨ Appoggio bilancino conduttore
- ⑩ Sede del pendolo
- ⑪ Pendolo intagliato
- ⑫ Pendolo intero
- ⑬ Asta di vetro con corda e gancio
- ⑭ Asta di alluminio con corda e gancio

Con l'apparecchio per esperimenti elettromagnetici possono essere eseguiti esperimenti relativi alla forza su un conduttore percorso da corrente, alle correnti di Foucault indotte e al diamagnetismo e/o al paramagnetismo.

#### 1. Avvertenze per la sicurezza

- Durante l'utilizzo del magnete U10370 devono essere strettamente osservate le avvertenze per la sicurezza qui indicate. Ad es.: fare attenzione in caso di pace-maker!
- Pericolo di scosse elettriche! La tensione max. in uscita dell'alternatore utilizzato non deve superare i 40 V.
- Pericolo di lesioni! L'asta di vetro ⑬ è fragile, quindi movimentarla con cautela. I punti di rottura con spigoli vivi costituiscono un rischio di lesioni elevato.

#### 2. Descrizione, dati tecnici

L'apparecchio per esperimenti elettromagnetici è composto da un supporto di alluminio stabile con posizioni del magnete preimpostate e alloggiamenti per gli accessori. In tal modo non sono necessari gli inter-

venti di regolazione dispendiosi in termini di tempo. Inoltre tutti gli accessori possono essere fissati, per la conservazione, allo stativo. I pendoli (⑪, ⑫) dovrebbero essere appesi alle due fessure centrali della sede del pendolo e l'asta di vetro e/o alluminio (⑬ e/o ⑭) nelle due fessure esterne: in tal modo le due corde non si ingarbugliano. Il bilancino conduttore è appeso a una traversa nella quale sono applicate prese per le spine di sicurezza (4 mm). La corrente max. nel bilancino conduttore non dovrebbe superare i 6 A.

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| Altezza del supporto:               | 345 mm         |
| Pendolo:                            | 290 x 70 mm    |
| Larghezza della fessura:            | max. 1 mm      |
| Larghezza del bilancino conduttore: | 100 mm         |
| Aste:                               | 40 mm x 8 mm Ø |

#### 3. Uso e manutenzione

- Innanzitutto avvitare il supporto, come da fig. 1, facendo attenzione che l'apparecchio si trovi in posizione verticale (squadra).
- Il nastro di rame intrecciato del bilancino conduttore dovrebbe essere appeso verso il basso in modo



che risulti disteso e tenere il filo di rame parallelo alla traversa. Se necessario, il nastro di rame può essere tirato con cautela tenendolo tra due dita per distenderlo. Nella zona dei punti saldati il nastro di rame non dovrebbe essere piegato (pericolo di rottura).

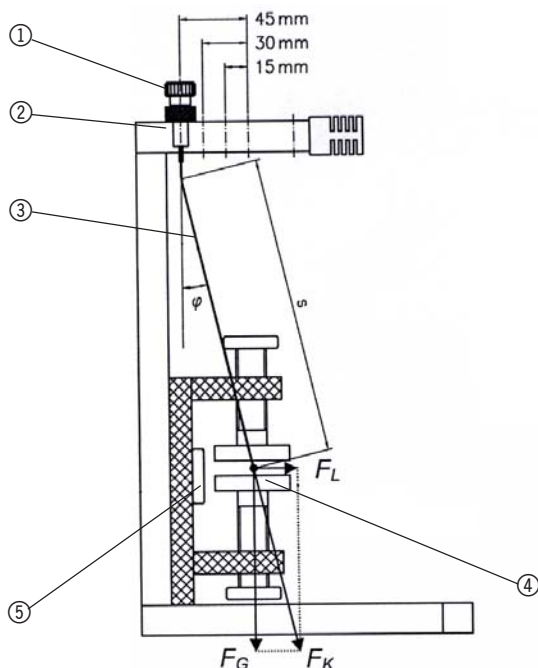
- L'asta di vetro e l'asta di alluminio sono appese ciascuna a un filo sottile, che potrebbe risultare leggermente attorcigliato. Prima di eseguire l'esperimento, le aste dovrebbero essere appese singolarmente al supporto, fino a quando non si arrotolano più.
- Manutenzione: l'apparecchio per gli esperimenti elettromagnetici in linea di principio non richiede manutenzione. Per quanto riguarda la pulizia, può essere pulito a umido (acqua con detergente). Fatta eccezione per la zona degli adesivi, possono essere utilizzati solventi quali acetone, benzina solvente o etanolo (alcool).
- Se le corde dell'asta di vetro e dell'asta di alluminio si sono annodate o ingarbugliate, in sostituzione può essere utilizzata seta per cucire sottile. La seta viene innanzitutto arrotolata circa 3 volte intorno alla corrispondente asta e annodata. Quindi l'asta viene appesa e allineata in modo orizzontale, spingendo la seta sull'asta. Infine la seta può essere fissata sull'asta con un adesivo istantaneo (rispettare le avvertenze per la sicurezza del produttore di adesivo).

#### 4. Esecuzione dell'esperimento e analisi

##### 4.1 Conduttore percorso da corrente nel campo magnetico

###### 4.1.1 Struttura dell'esperimento

- Le due possibili strutture dell'esperimento sono visibili in fig. 2.



- La struttura dell'esperimento, come da fig. 2 (destra) serve per dimostrare che la forza di Lorentz non agisce né in direzione del campo magnetico né in direzione della corrente. Nel primo caso il bilancino conduttore oscillerebbe verso destra o verso sinistra, nel secondo caso dovrebbe oscillare dentro e fuori dal piano di progettazione.
- Con la struttura dell'esperimento, come da fig. 2 (sinistra) può essere dimostrata qualitativamente e quantitativamente la forza di Lorentz. Per la prova qualitativa il bilancino conduttore viene appeso verticalmente sui poli del magnete. Se ora viene attivata la corrente, si può osservare una deviazione, che aumenta con l'incremento dell'intensità della corrente.
- Per la determinazione quantitativa della forza Lorentz servono i 3 fori filettati, che rispetto alle verticali si sono spostati verso sinistra di 15, 30 e 45 mm. Se ad esempio il bilancino conduttore viene montato spostato verso sinistra di 45 mm, come mostrato in figura, e la corrente che percorre il bilancino conduttore è impostata in modo tale che il filo di rame spesso si trova proprio al centro del campo magnetico, allora anche la deviazione del bilancino conduttore dalla verticale è esattamente di 45 mm e la forza di Lorentz corrisponde alla forza di richiamo, a cui è sottoposto il bilancino conduttore in seguito alla gravità (ved. anche analisi dell'esperimento).

###### 4.1.2 Esecuzione dell'esperimento

- Durante le misurazioni è opportuno annotarsi le seguenti grandezze:
  - il numero di esperimento,
  - la distanza tra i poli  $a$ ,
  - la larghezza delle espansioni polari in direzione del conduttore  $b$ ,
  - la deviazione  $c$  e
  - la corrente  $I$ , che scorre al centro<sup>1)</sup> del filo di rame.

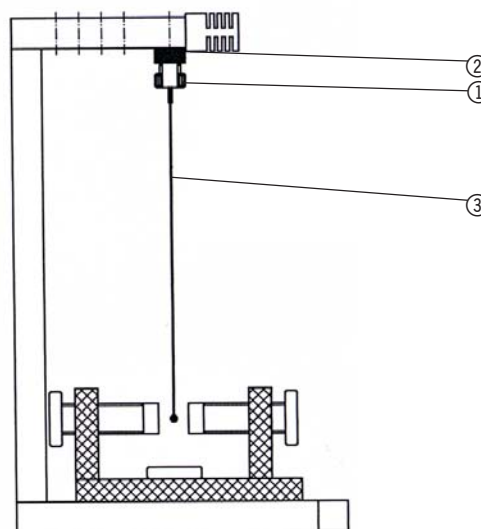


Fig. 2: Struttura dell'esperimento, "Conduttore percorso da corrente nel campo magnetico".

① vite a testa zigrinata, ② traversa, ③ bilancino conduttore, ④ espansione polare, ⑤ vite a testa zigrinata piatta

1) eventualmente misurare la distanza orizzontale tra il filo di rame e la vite a testa zigrinata (5) con una riga non magnetica

- Esempio di una serie di esperimenti:

| N. vers. | Distanza tra le espansioni polari $a$ [mm] | Larghezza delle espansioni polari $b$ [mm] | Deviazione $c$ [mm] | Corrente $I$ [A] |
|----------|--|--|---------------------|------------------|
| 1        | 10   | 50   | 15                  | 0,57             |
| 2        | 10   | 50   | 30                  | 1,20             |
| 3        | 10   | 50   | 45                  | 1,87             |
| 4        | 10   | 20   | 15                  | 1,16             |
| 5        | 10   | 20   | 30                  | 2,36             |
| 6        | 10   | 20   | 45                  | 3,57             |

#### 4.1.3 Analisi dell'esperimento

- Per semplificare il bilancino conduttore viene considerato un pendolo matematico, ossia viene trascurato il peso dei nastri di rame intrecciati e il filo di rame viene considerato come peso puntiforme ( $m = 6,23$  g). La lunghezza efficace del pendolo  $s$  è leggermente inferiore alla lunghezza dei nastri di rame, poiché questi non si spezzano formando spigoli vivi nella zona superiore, se il bilancino conduttore viene deviato. La lunghezza  $s$  si ottiene pertanto dal punto di taglio ipotizzato dei nastri di rame allungati in modo lineare con la verticale (cfr. fig. 2). Vale indicativamente:  $s = 200$  mm.
- La forza risultante nel nastro di rame  $F_R$ , composta dalla forza di Lorentz  $F_L$  e dalla forza del peso  $F_G$ , è inclinata intorno all'angolo  $\varphi$ , poiché il nastro di rame non presenta (praticamente) alcuna forza trasversale. Quindi vale:

$$\frac{F_L}{F_G} = \tan \varphi$$

$$\Leftrightarrow F_L = mg \frac{\frac{c}{s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{s}\right)^2}} \quad (1)$$

- Nella serie summenzionata di esperimenti, le espansioni polari negli esperimenti 4-6 erano state ruotate di circa  $90^\circ$  rispetto agli esperimenti 1-3. In tal modo è stata modificata la lunghezza del conduttore, che viene introdotta nel campo magnetico. Durante l'analisi tuttavia non devono ora essere prese in considerazione le dimensioni delle vere espansioni polari, poiché il campo magnetico "fuoriesce" in corrispondenza dei bordi (cfr. fig. 3).

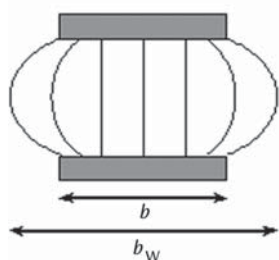


Fig. 3: Effetti di bordo sui bordi delle espansioni polari

- La lunghezza efficace del conduttore nel campo magnetico si ottiene approssimativamente con:
$$b_w = b + a \quad (2)$$
- La valutazione della serie di esperimenti viene fornita utilizzando le equazioni 1 e 2:

| N. vers. | Lunghezza efficace del $b_w$ conduttore [mm] | Forza di Lorentz $F_L$ [mN] | Corrente $I$ [A] |
|----------|--|-----------------------------|------------------|
| 1        | 60   | 4,60                        | 0,57             |
| 2        | 60   | 9,27                        | 1,20             |
| 3        | 60   | 14,1                        | 1,87             |
| 4        | 30   | 4,60                        | 1,16             |
| 5        | 30   | 9,27                        | 2,36             |
| 6        | 30   | 14,1                        | 3,57             |

- Il risultato è rappresentato anche in fig. 4. Si riconosce immediatamente che la forza di Lorentz è proporzionale alla corrente. Un'analisi degli incrementi lineari mostra inoltre che la forza di Lorentz è anche proporzionale alla lunghezza efficace del conduttore. Pertanto vale:

$$F_L \propto b_w I$$

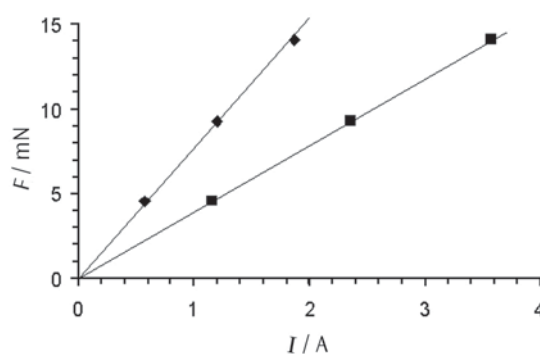


Fig. 4: Forza di Lorentz in funzione della corrente nel conduttore. Simboli quadrati:  $b_w = 60$  mm, rombi:  $b_w = 30$  mm

#### 4.2 Correnti di Foucault indotte

- La struttura dell'esperimento è rappresentata in fig. 5. La distanza tra i poli è di circa 10-30 mm e viene modificata. Se i due pendoli vengono deviati assieme intorno allo stesso angolo e rilasciati, il pendolo intero viene frenato molto rapida-

mente, mentre il pendolo intagliato esegue alcune oscillazioni.

- Spiegazione: durante gli esperimenti indicati al paragrafo 4.1 il bilancino conduttore era percorso da una corrente. In tal modo venivano spostate cariche (elettroni) in un campo magnetico, che portò chiaramente a una forza misurabile (la forza di Lorentz) sugli elettroni.



Fig. 5 : Struttura dell'esperimento "Correnti di Foucault indotte"

- Anche in questo esperimento vengono spostate cariche (elettroni liberi nell'alluminio) in un campo magnetico, dove lo spostamento è di natura meccanica. In seguito a questo spostamento, anche in questo caso, la forza di Lorentz agisce sugli elettroni, determinando un flusso di elettroni, ossia una corrente, nell'alluminio: in questo esperimento tale corrente scorre verticalmente dall'alto verso il basso o viceversa, in base alla direzione del movimento del pendolo.
- Nel pendolo intero si determina ora un "cortocircuito", poiché la corrente indotta nei settori del pendolo può tornare a scorrere al di fuori del campo magnetico. In tal modo si produce una corrente di Foucault, che può essere estremamente elevata e che porta a un riscaldamento dell'alluminio. L'energia del pendolo viene pertanto commutata innanzitutto in energia elettrica, quindi in calore.
- Nel pendolo intagliato la corrente di Foucault non può formarsi, poiché attraverso le fessure i settori in alluminio presenti al di fuori del campo magnetico sono isolati dai settori interni. Ossia se gli elettrodi vengono spostati inizialmente in una direzione, se tuttavia si sono raggruppati molti elet-

troni sopra e sotto nel pendolo, si urtano reciprocamente e la tensione che ne deriva è in equilibrio con la forza di Lorentz in assenza di flusso di corrente. L'energia del pendolo non viene quindi convertita in calore.

#### 4.3 Diamagnetismo e paramagnetismo

- La struttura dell'esperimento corrisponde in linea di principio alla fig. 5. Anziché il pendolo viene ora appesa nel campo magnetico l'asta di alluminio o l'asta di vetro (eliminare precedentemente un eventuale attorcigliamento del filo, ved. fig. 3). L'asta di vetro inizialmente continuerà a ruotare leggermente, mentre l'asta di alluminio ora si sposta solo molto lentamente (correnti di Foucault indotte, ved. ultimo paragrafo) nella sua posizione finale. Dopo un po' di tempo le aste si posizionano come mostrato in fig. 6.

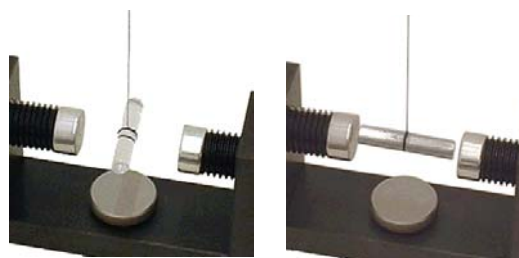


Fig. 6: Asta di vetro (sinistra) e asta di alluminio (destra) nel campo magnetico

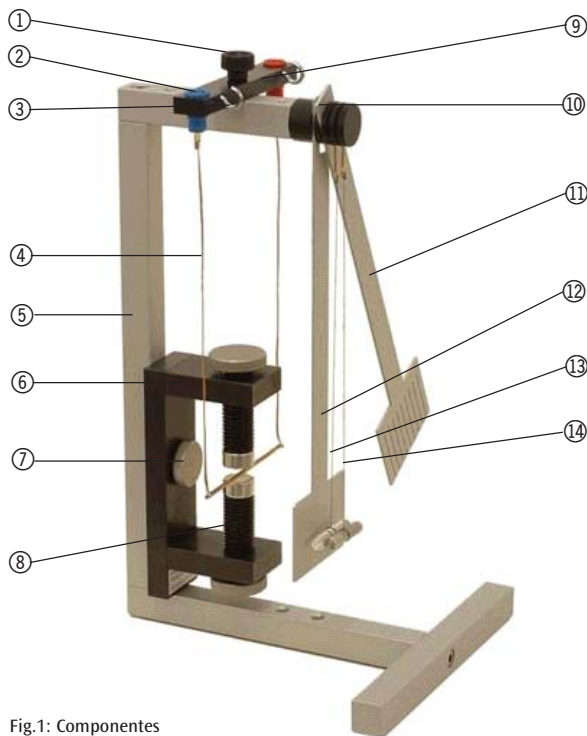
- Svitando la vite a testa zigrinata, che fissa il magnete, e avvitando lentamente il magnete si può dimostrare che l'allineamento delle aste rispetto al magnete rimane tale e quale, non tornando pertanto alla posizione di riposo determinata dalla pura meccanica (nessun attorcigliamento del filo).
- Spiegazione: sebbene né il vetro né l'alluminio siano magnetici, le due aste si allineano nel campo magnetico. La grandezza determinata in questo caso è la permeabilità relativa  $\mu_r$ , che indica di quanto il materiale interessato moltiplica la densità del flusso di un campo magnetico rispetto al vuoto. Sorprendentemente e diversamente da ciò che avviene con la costante dielettrica, la permeabilità relativa può essere maggiore o inferiore di 1. Nel caso dell'alluminio ammonta  $a^2) = 1,000023$  e nel caso del vetro  $a = 0,99999$ . Con l'alluminio quindi la densità del flusso aumenta e l'asta ruota in direzione del campo. Questo effetto è noto come paramagnetismo. Con il vetro è il contrario. L'asta ruota in direzione opposta al campo e l'effetto viene denominato diamagnetismo.

<sup>2)</sup> Grimsehl, Physik II, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1955

## U10371 Equipo electromagnético de experimentación

### Instrucciones de uso

9/04 MH



- ① Tornillo moleteado para fijación del soporte transversal
- ② Agujeros roscados (5x) para fijación del soporte transversal
- ③ Soporte transversal
- ④ Columpio conductor
- ⑤ Soporte
- ⑥ Tornillo moleteado M8x20 para fijación magnética
- ⑦ Imán U10370 (no forma parte del volumen de suministro)
- ⑧ Agujeros roscados para fijación de imán
- ⑨ Apoyo del columpio conductor
- ⑩ Alojamiento del péndulo
- ⑪ Péndulo ranurado
- ⑫ Péndulo llano
- ⑬ Barra de cristal con cuerda y gancho
- ⑭ Barra de aluminio con cuerda y gancho

Fig.1: Componentes

Con el equipo experimental electromagnético se pueden realizar experimentos sobre fuerza en un conductor sobre el que fluye una corriente eléctrica, al igual que sobre corrientes parásitas, diamagnetismo y paramagnetismo.

#### 1. Aviso de seguridad

- Si se emplean los imanes U10370, se deben observar estrictamente las notas de seguridad indicadas. Por ejemplo, ¡cuidado con los marcapasos!
- ¡Peligro de shock eléctrico! La máxima tensión de salida de la fuente de alimentación empleada no debe sobrepasar los 40 V.
- ¡Peligro de heridas! La barra de cristal ⑬ se puede quebrar, por lo cual se la debe manipular con cuidado. ¡Las partes quebradas cantos cortantes representan una considerable fuente de peligro!

#### 2. Descripción, datos técnicos

El equipo experimental electromagnético se compone de un soporte de aluminio libre de balanceo, con una posición predeterminada de imanes y alojamientos para los accesorios. De esta manera desaparecen

los costosos tiempos de ajuste. Además, las piezas accesorias se pueden fijar al soporte para efectos de almacenamiento. Para esto, los péndulos (⑪, ⑫) deben colgarse de ambas ranuras centrales del alojamiento para péndulos y la barra de vidrio, o bien la de aluminio (⑬ ó ⑭) en ambas ranuras exteriores, para que, de esta manera, las cuerdas no se retuerzan. El columpio conductor pende de un soporte transversal, en el cual se han implementado clavijeros de seguridad (4 mm). No se debe sobrepasar la corriente máxima de 6 A para el columpio conductor.

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Altura del soporte:           | 345 mm         |
| Péndulo:                      | 290 x 70 mm    |
| Ancho de ranura:              | máx. 1 mm      |
| Ancho del columpio conductor: | 100 mm         |
| Barras:                       | 40 mm x 8 mm Ø |

#### 3. Servicio y mantenimiento

- En primer lugar, se debe atornillar el soporte como se muestra en la Fig. 1. Al hacerlo se debe observar que el equipo se encuentre en posición vertical (emplear escuadra).

- La tira trenzada de cobre del columpio conductor debe pender lisamente hacia abajo, y el alambre de cobre debe permanecer paralelo al soporte transversal. Dado el caso, se puede alisar cuidadosamente la tira de cobre con los dedos. No se debe curvar la tira de hierro en las cercanías de los puntos de soldadura (peligro de que se quiebre).
- Las barras de vidrio y aluminio penden cada una de un hilo delgado, el mismo que podría encontrarse un poco torcido. Antes de un experimento, las barras deben pender individualmente del soporte hasta que ya no giren.
- Mantenimiento: En principio, el equipo experimental electromagnético no necesita mantenimiento. Para su limpieza, se lo puede frotar con un paño húmedo (agua con agente de limpieza.) Se pueden emplear soluciones tales como acetona, gasolina de lavado o etanol (alcohol), pero no sobre el lugar en donde se encuentran las etiquetas adhesivas.
- Si las cuerdas de la barra de vidrio o de aluminio se han anudado o retorcido, se puede emplear en su lugar seda fina para coser. En primer lugar, la seda para coser se enrolla 3 veces alrededor de la barra respectiva y se anuda. A continuación, se cuelga la barra y se la balancea horizontalmente, desplazando la seda de la que pende la barra. Para finalizar, se puede fijar la seda a la barra con pegamento instantáneo (tomar en cuenta las notas de seguridad del fabricante del pegamento).

- El montaje experimental de la Fig. 2 (derecha) sirve para comprobar que la fuerza de Lorentz no actúa en el sentido del campo magnético ni tampoco en el de la corriente. En el primer caso, el columpio oscilaría hacia la derecha o la izquierda; en el segundo caso, debería oscilar hacia el plano de proyección o alejarse de él.
- Por medio del montaje experimental de la Fig. 2 (izquierda) se puede demostrar cualitativa y cuantitativamente la fuerza de Lorentz. Para la demostración cualitativa, se cuelga el columpio conductor verticalmente sobre los polos del imán. Si ahora se conecta una corriente, se observará una desviación que se incrementará a medida que aumenta la intensidad de la corriente.
- Para la demostración cuantitativa de la fuerza de Lorentz, se emplean las 3 perforaciones roscadas que se han practicado hacia la izquierda, a 15, 30 y 45 mm en relación a las verticales. Si, por ejemplo, se monta el columpio conductor – como se muestra en la imagen – desplazado 45 mm hacia la izquierda, y se ajusta la corriente que fluye por el columpio de manera que el alambre de cobre grueso se encuentre exactamente en el centro del campo magnético, entonces, la desviación del columpio conductor desde las verticales es igual a exactamente 45 mm, y la fuerza de Lorentz corresponde a la fuerza antagonista que soporta el columpio debido a la atracción terrestre (véase también la evaluación del experimento).

#### 4. Ejecución del experimento y evaluación

##### 4.1 Conductor por el que fluye una corriente en un campo magnético

###### 4.1.1 Montaje experimental

- En la Fig. 2 se pueden observar los dos posibles arreglos experimentales.

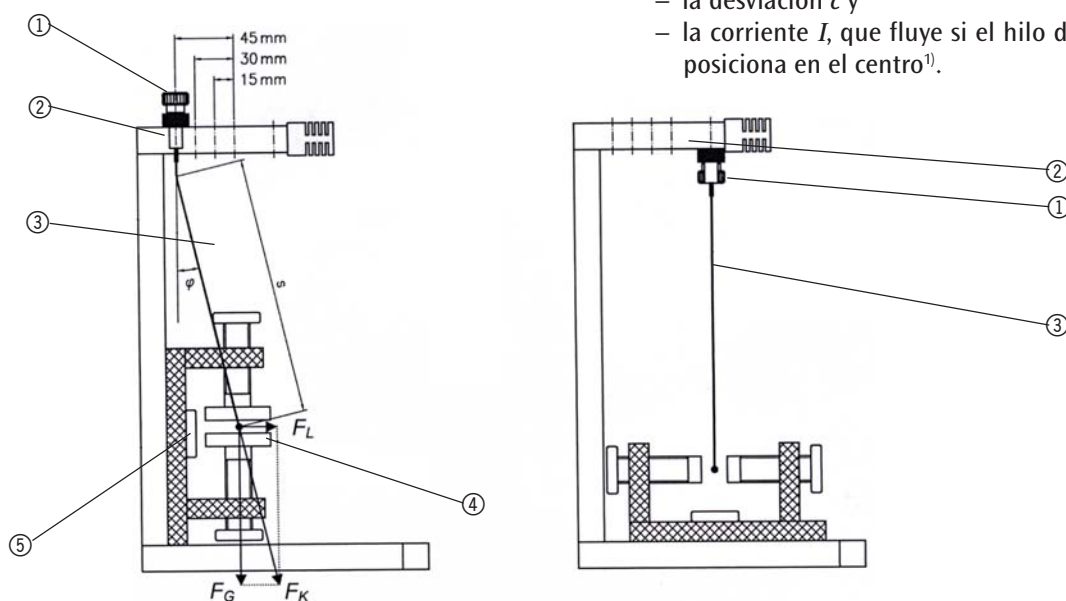


Fig. 2: Montaje experimental «Conductor por el que fluye una corriente en un campo magnético».

① tornillo moleteado, ② soporte transversal, ③ columpio conductor, ④ zapata polar, ⑤ tornillo moleteado de cabeza plana

1) dado el caso, se debe medir la distancia entre el alambre de cobre y el tornillo moleteado (5) con una regla no magnética



- Ejemplo de una serie experimental:

| Nº de exp. | Distancia $a$ entre zapatas polares [mm] | Ancho $b$ de zapatas polares [mm] | Desviación $c$ [mm] | Corriente $I$ [A] |
|------------|--|-----------------------------------|---------------------|-------------------|
| 1          | 10                                       | 50                                | 15                  | 0,57              |
| 2          | 10                                       | 50                                | 30                  | 1,20              |
| 3          | 10                                       | 50                                | 45                  | 1,87              |
| 4          | 10                                       | 20                                | 15                  | 1,16              |
| 5          | 10                                       | 20                                | 30                  | 2,36              |
| 6          | 10                                       | 20                                | 45                  | 3,57              |

#### 4.1.3 Evaluación del experimento

- El columpio conductor se asume simplificada-mente como un péndulo matemático, esto es, se desprecia el peso de las tiras trenzadas de cobre, y el alambre de cobre hace las veces de masa puntual ( $m = 6,23$  g). La longitud eficaz  $s$  del péndulo es algo menor que la longitud de las tiras de cobre, puesto que éstas, en la parte superior, no se pliegan en canto vivo cuando el columpio se desvía. La longitud  $s$  se obtiene, por tanto, del punto de corte imaginario de la prolongación lineal de las tiras de cobre con las verticales (véase Fig. 2). Aproximadamente, es válido:  $s = 200$  mm.
- La fuerza resultante  $F_R$ , en la tira de cobre, compuesta por la fuerza de Lorentz  $F_L$  y el peso  $F_G$ , está inclinada en el ángulo  $\varphi$ , puesto que la tira de cobre no soporta (prácticamente) ninguna fuerza transversal. Por tanto, es válido lo siguiente:

$$\frac{F_L}{F_G} = \tan \varphi \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow F_L = mg \frac{\frac{c}{s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{s}\right)^2}}$$

- En la serie experimental de más arriba, las zapatas polares, en los ensayos 4 y 5, giraron alrededor de  $90^\circ$  en relación con las pruebas 1 a 3. De esta manera, se modifica la longitud del conductor que se introduce en el campo magnético. Sin embargo, ahora, para la evaluación, no se deben tomar literalmente las verdaderas dimensiones de zapata polar, puesto que el campo magnético «se sale» por los lados (véase Fig. 3).

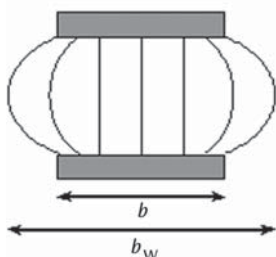


Fig. 3: Efectos de borde en los cantos de las zapatas polares

- La longitud eficaz de conducción, en el campo magnético, se obtiene aproximadamente a partir de:

$$b_w = b + a \quad (2)$$

- Utilizando las ecuaciones 1 y 2 para la serie de experimentos se obtiene lo siguiente:

| Nº de exp. | Longitud eficaz del conductor $b_w$ [mm] | Fuerza de Lorentz $F_L$ [mN] | Corriente $I$ [A] |
|------------|--|------------------------------|-------------------|
| 1          | 60                                       | 4,60                         | 0,57              |
| 2          | 60                                       | 9,27                         | 1,20              |
| 3          | 60                                       | 14,1                         | 1,87              |
| 4          | 30                                       | 4,60                         | 1,16              |
| 5          | 30                                       | 9,27                         | 2,36              |
| 6          | 30                                       | 14,1                         | 3,57              |

- El resultado se representa también en la Fig. 4. Se puede reconocer directamente que la fuerza de Lorentz es proporcional a la corriente. Además, una evaluación de la pendiente de las rectas muestra que la fuerza de Lorentz también es proporcional a la longitud efectiva de conducción. Por lo tanto, es válido lo siguiente:

$$F_L \propto b_w I$$

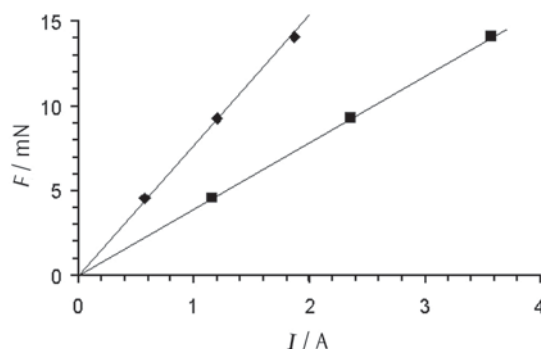


Fig. 4: Fuerza de Lorentz en función de la corriente que atraviesa el conductor. Rectángulos:  $b_w = 60$  mm, rombos:  $b_w = 30$  mm

#### 4.2 Corrientes parásitas inducidas

- El montaje experimental se representa en la Fig. 5. La distancia entre polos es aproximadamente de 10 a 30 mm y variará. Si se desvían ambos péndu-

los en el mismo ángulo y se los suelta, el polo no ranurado frenará muy rápidamente, mientras que el polo ranurado realizará algunas oscilaciones.

- Explicación: En los experimentos del apartado 4.1 fluía una corriente a través del columpio conductor. Por esta razón, se movían las cargas (electrones) en un campo magnético, lo cual, obviamente, condujo a la obtención de una fuerza mensurable (la fuerza de Lorentz).



Fig. 5 : Montaje experimental "Corrientes parásitas inducidas"

- También en este experimento se mueven cargas – los electrones libres del aluminio – en un campo magnético, pero aquí, dicho movimiento obedece a una razón de naturaleza mecánica. Por medio de este movimiento, también aquí la fuerza de Lorentz actúa sobre los electrones, lo cual tiene como consecuencia un flujo de electrones, esto es, una corriente que atraviesa el aluminio, la cual, en este experimento, de acuerdo con el sentido de oscilación del péndulo, fluye en vertical, de arriba hacia abajo o viceversa.
- En el caso del péndulo no ranurado se produce un «cortocircuito», puesto que la corriente inducida en el área del péndulo puede fluir en sentido de retorno por el exterior del campo magnético. De esta manera se origina una corriente parásita, la cual puede ser muy elevada, lo cual conduciría a un calentamiento del aluminio. La energía pendular se convierte, en primer lugar, en energía eléctrica y, a continuación, en calor.
- En el péndulo ranurado no se puede generar esta corriente parásita, puesto que, debido a las ranuras, la superficie de aluminio que se encuentra por fuera del campo magnético está aislada de la su-

perficie que se encuentra dentro de él. A saber, los electrones también son desplazados, en primer lugar, en una dirección, pero cuando se agrupan muchos electrones en la parte superior o inferior del péndulo, chocan entre sí, y la tensión que esto genera produce un equilibrio con la fuerza de Lorentz, en ausencia de flujo de corriente. La energía pendular, por tanto, no se convierte en calor.

### 4.3 Diamagnetismo y paramagnetismo

- El montaje experimental corresponde, en principio, a la Fig. 5. En lugar del péndulo se cuelga ahora la barra de aluminio, o la de cristal, sobre el campo magnético (antes, eventualmente, se debe alisar el alambre retorcido, véase apartado 3). La barra de cristal, en principio, girará un poco, mientras que la de aluminio adopta lentamente su posición final (corriente parásita inducida, véase último apartado). Después de algún tiempo, las barras se posicionan como se muestra en la Fig. 6.

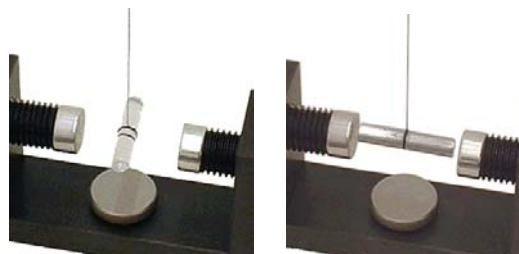


Fig. 6: Barra de cristal (izquierda) y de aluminio (derecha) en el campo magnético

- Si se afloja el tornillo moleteado que sostiene los imanes, tras un lento giro de éstos, se puede demostrar que la orientación de las barras continúa guardando relación con los imanes y, por tanto, no obedece a la posición de reposo determinada por la mecánica pura (ninguna torcedura del alambre).
- Explicación: Aunque ni el cristal ni el aluminio son magnéticos, ambas barras se orientan hacia el campo magnético. La magnitud decisiva, en este caso, es la permeabilidad  $\mu$ , la cual indica en cuánto se multiplica la densidad de flujo de un campo magnético por la acción del material en cuestión, en relación al vacío. Asombrosamente – y de una manera diferente a lo que ocurre con las constantes dieléctricas –, la permeabilidad relativa puede ser mayor o menor a 1. En el caso del aluminio, ésta es  $\mu_r = 1,000023$ , y para el vidrio es igual  $\mu_r = 0,99999$ . Por tanto, para el aluminio, la densidad de flujo se incrementa, y la barra gira en el sentido del campo. Este efecto se denomina paramagnetismo. En el caso del vidrio, ocurre lo contrario. La barra gira en sentido contrario al campo y el efecto se denomina diamagnetismo.

<sup>2)</sup> Grimsehl, Physik II, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1955

## U10371 Aparelho eletromagnético para experiências

### Manual de instruções

9/04 MH

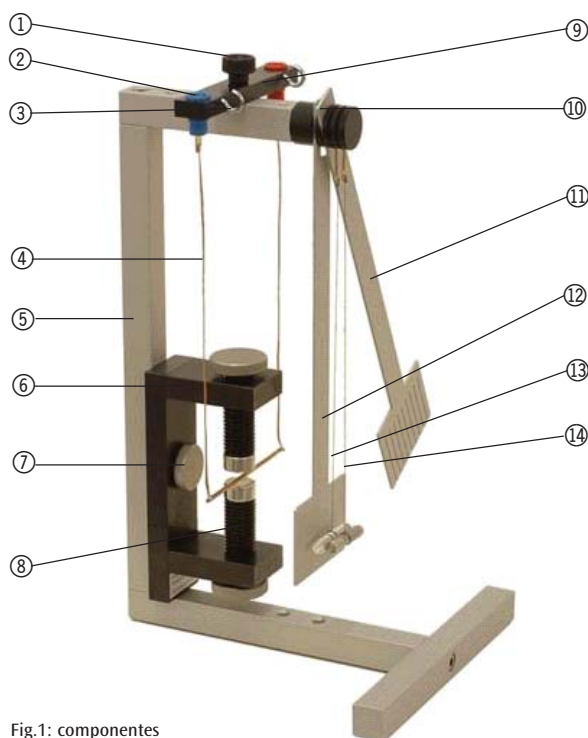


Fig.1: componentes

- ① Parafuso de dedo estriado de fixação na travessa
- ② Orifícios com rosca (5x) para a fixação da travessa
- ③ Travessa
- ④ Balouço do condutor
- ⑤ Pé
- ⑥ Parafuso de dedo estriado M8x20 para a fixação do ímã
- ⑦ Ímã U10370 (não incluído no fornecimento)
- ⑧ Agujeros roscados para fijación de imán
- ⑨ Orifícios com rosca para a fixação do ímã
- ⑩ Fixação do pêndulo
- ⑪ Pêndulo com fendas
- ⑫ Pêndulo cheio
- ⑬ Barra de vidro com corda e gancho
- ⑭ Barra de alumínio com corda e gancho

Com o aparelho eletromagnético para experiências podem ser realizadas experiências com a força num condutor eletrificado, com remoinhos induzidos e com diamagnetismo e paramagnetismo.

#### 1. Indicações de segurança

- Ao utilizar o ímã U10370 devem ser seguidas estritamente as indicações de segurança lá indicadas. Por exemplo, cuidado com os marca-passos!
- Perigo de choque elétrico! A tensão máxima de saída do aparelho de alimentação utilizado não deve passar de 40 V.
- Perigo de ferimentos! A barra de vidro ⑬ é frágil e portanto deve ser manuseada com cuidado. Partes quebradas com arestas cortantes representam um perigo considerável de ferimento.

#### 2. Descrição, dados técnicos

O aparelho eletromagnético para experiências consiste num pé estável de alumínio com posições pré-

estabelecidas para o ímã e recepção para acessórios. Por isto, evitam-se trabalhos de ajuste demorados. Além disso, todos os acessórios podem ser fixados no pé para o armazenamento. Sendo que o pêndulo (⑪, ⑫) deve ser pendurado nas duas fendas centrais da recepção do pêndulo e a barra de vidro ou de alumínio (⑬ ou ⑭) nas duas fendas exteriores, de modo que as cordas não se enrolem. O balouço do condutor fica pendurado na travessa, na qual se encontram tomadas para plugues de segurança (4 mm). A corrente máxima no balouço do condutor não deve passar de 6 A.

|                     |                |
|---------------------|----------------|
| Altura do pé:       | 345 mm         |
| Pêndulo:            | 290 x 70 mm    |
| Abertura da fenda:  | máx. 1 mm      |
| Largura do balouço: | 100 mm         |
| Barras:             | 40 mm x 8 mm Ø |

#### 3. Utilização e manutenção

- Primeiro, deve-se aparafusar o pé conforme a ilustração 1. Ao fazê-lo, deve-se prestar atenção para que o aparelho esteja na vertical (esquadro).

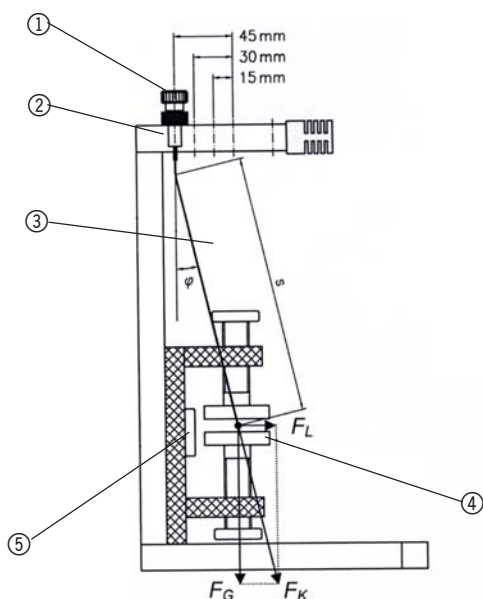
- A fita de cobre trançada do balouço do condutor deve estar pendurado reto para baixo e deve manter o fio de cobre na paralela da travessa. Caso seja necessário, pode-se puxar a fita de cobre cuidadosamente com os dedos para estica-la. Não se deve dobrar a fita na parte das soldas (há perigo que quebre).
- As barras de vidro e de alumínio estão penduradas cada uma num fio fino, o qual pode estar enrolado. Antes de uma experiência, as barras devem pender sós do pé o tempo suficiente para não girarem mais.
- Manutenção: o aparelho eletromagnético para experiências, em princípio, não precisa de manutenção. Para a limpeza, pode ser lavado com um pano úmido (água com detergente). Solventes, tais como acetona, benzina ou etanol (álcool) podem ser utilizados fora da área do filme auto-adesivo.
- Se as cordas da barra de vidro ou da de alumínio se enrolaram ou criaram um nó, pode-se utilizar alternativamente uma linha fina de seda. A linha de seda deve ser enrolada aprox. 3 vezes envolta da barra e fixada então com um nó. Logo pendura-se a barra e se estabelece o equilíbrio horizontal deslocando a linha sobre a barra. No fim, pode-se fixar a linha de seda na barra com cola expressa (seguir as indicações de segurança do fabricante da cola).

#### 4. Execução e análise da experiência

##### 4.1 Condutor eletrificado num campo magnético

###### 4.1.1 Montagem da experiência

- Ambas possibilidades de montagem da experiência são visíveis na Fig. 2.



- A montagem da experiência conforme a ilustração 2 (à direita) serve para comprovar que a força de Lorentz não age na direção do campo magnético nem na direção da corrente. No primeiro caso, o balouço do condutor balançaria à direita ou à esquerda, no segundo caso este deveria balançar aproximando-se da área de desenho ou afastando-se desta.
- Com a montagem segundo a ilustração 2 (à esquerda) pode-se comprovar a força de Lorentz de modo qualitativo e quantitativo. Para a comprovação qualitativa, pendura-se o balouço do condutor na vertical acima dos pólos do ímã. Quando agora a corrente é ligada, então observa-se uma inclinação, a qual aumenta com a força da corrente.
- Para a comprovação quantitativa da força de Lorentz, encontram-se as 3 perfurações com rosca que se encontram deslocadas para a esquerda em 15, 30 e 45 mm em relação às verticais. Se, por exemplo como na ilustração, o balouço do condutor for montado 45 mm à esquerda e a corrente através do balouço do condutor for ajustada de forma que o fio de cobre grosso se encontre exatamente no meio do campo magnético, então a inclinação pendular do balouço com relação à vertical também é de exatamente 45 mm, e a força de Lorentz corresponde à força de reconstituição que o balouço do condutor experimenta através da força de atração da Terra (veja também a análise da experiência).

###### 4.1.2 Execução da experiência

- Durante as medições, é de utilidade anotar as seguintes grandezas:
  - o número da experiência,
  - a distância entre as sapatas polares  $a$ ,
  - a largura da sapata polar na direção do condutor  $b$ ,
  - a inclinação  $c$  e
  - a corrente  $I$ , que flui na área central<sup>1)</sup> do fio de cobre.

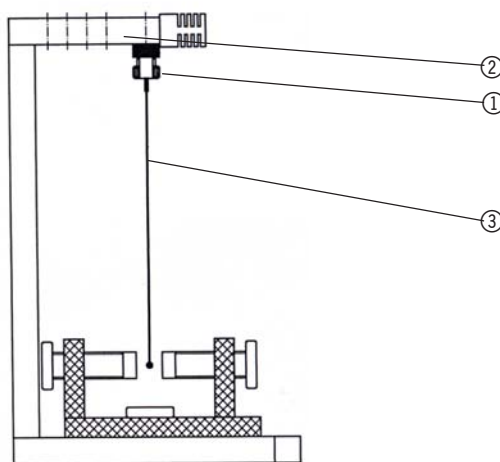


Fig. 2: montagem da experiência "condutor eletrificado num campo magnético".

① parafuso de dedo, ② travessa, ③ balouço do condutor, ④ sapata polar, ⑤ parafuso de dedo de cabeça chata

1) Caso necessário, medir com uma régua não magnética a distância entre fio de cobre e o parafuso de dedo (5)

- Exemplo de uma série de experiências:

| Exp.-Nº | Distância entre sapatas polares [mm] | Largura $b$ das sapatas [mm] | Inclinação $c$ [mm] | Corrente $I$ [A] |
|---------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|------------------|
| 1       | 10                                   | 50                           | 15                  | 0,57             |
| 2       | 10                                   | 50                           | 30                  | 1,20             |
| 3       | 10                                   | 50                           | 45                  | 1,87             |
| 4       | 10                                   | 20                           | 15                  | 1,16             |
| 5       | 10                                   | 20                           | 30                  | 2,36             |
| 6       | 10                                   | 20                           | 45                  | 3,57             |

#### 4.1.3 Análise da experiência

- O balouço do condutor será visto simplificada como um pêndulo matemático, ou seja, as massas das fitas de cobre trançadas serão ignorados e o fio de cobre é visto como uma massa pontual ( $m = 6,23$  g). O comprimento efetivo do pêndulo  $s$  é algo menor do que o comprimento das fitas de cobre, já que estas na sua parte superior não se dobram precisamente quando o balouço é inclinado. O comprimento  $s$  resulta portanto do ponto de corte ideal das fitas de cobre prolongadas linearmente com a vertical (compare ilustr. 2). Aproximadamente, é válido:  $s = 200$  mm.
- A força resultante na fita de cobre  $F_k$ , que é composta da força de Lorentz  $F_L$  e da força do peso  $F_G$  está inclinada num ângulo de  $\varphi$ , já que a fita de cobre (quase) não absorve forças contrárias. Por isso é válido:

$$\frac{F_L}{F_G} = \tan \varphi \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow F_L = mg \frac{\frac{c}{s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{s}\right)^2}}$$

- Na série de experiências acima, as sapatas polares foram giradas nas experiências 4 - 6 em  $90^\circ$  em relação às experiências 1 - 3. Por isso, o comprimento do condutor que penetra o campo magnético foi mudado. Para a análise, porém, não se deve utilizar as verdadeiras massas das sapatas polares, já que o campo magnético “extrapola” as suas bordas (compare Fig. 3).

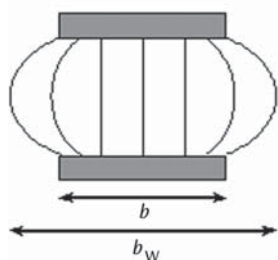


Fig. 3: efeitos colaterais nas arestas das sapatas polares

- O comprimento efetivo no campo magnético resulta por aproximação com:

$$b_w = b + a \quad (2)$$

- A análise da série de experiências, sob a aplicação das equações 1 e 2 resulta em:

| Exp.-Nº | Comprimento efetivo do condutor $b_w$ [mm] | Força de Lorentz $F_L$ [mN] | Corrente $I$ [A] |
|---------|--|-----------------------------|------------------|
| 1       | 60   | 4,60                        | 0,57             |
| 2       | 60   | 9,27                        | 1,20             |
| 3       | 60   | 14,1                        | 1,87             |
| 4       | 30   | 4,60                        | 1,16             |
| 5       | 30   | 9,27                        | 2,36             |
| 6       | 30   | 14,1                        | 3,57             |

- O resultado também está representado na ilustração 4. Reconhece-se imediatamente que a força de Lorentz é proporcional à corrente. Uma análise das subidas lineares mostra, além disso, que a força de Lorentz também é proporcional ao comprimento do condutor. Portanto é válido:

$$F_L \propto b_w I$$

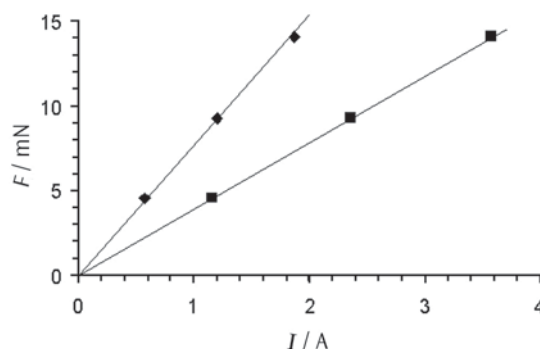


Fig. 4: força de Lorentz como função da corrente no condutor. Símbolos quadrados:  $b_w = 60$  mm, jogo da velha:  $b_w = 30$  mm

#### 4.2 Remoinhos induzidos

- A montagem da experiência está representada na ilustração 5. A distância entre os pólos é de aprox. 10 - 30 mm e é variada ao longo da experiência. Se os dois pêndulos forem inclinados juntos no mes-



mo ângulo e logo são largados, então o pêndulo cheio freiará muito rapidamente, enquanto que o com fendas ainda oscilará algumas vezes.

- Explicação: nas experiências na parte 4.1 fluía uma corrente através do balouço do condutor. Assim foram movidas cargas (elétrons) num campo magnético, o que obviamente levou uma força medível (a força de Lorentz) a agir sobre os elétrons.



Fig. 5 : montagem da experiência “remoinhos induzidos”

- Também nesta experiência são movidas cargas (elétrons livres no alumínio) num campo magnético, sendo que aqui o movimento é de natureza mecânica. Através desse movimento, a força de Lorentz aqui também age sobre os elétrons, o que tem por consequência um fluxo de elétrons no alumínio, ou seja uma corrente, a qual nesta experiência flui verticalmente de cima para baixo ou ao contrário, conforme a direção do movimento do pêndulo.
- No pêndulo cheio ocorre agora um “curto-circuito”, já que a corrente induzida pode refluir na área do pêndulo, fora do campo magnético. Deste modo ocorre um remoinho que pode ser muito alto e que leva ao aquecimento do alumínio. A energia do pêndulo é então transformada em energia elétrica e logo em calor.
- No pêndulo com fendas não pode se formar um remoinho, já que por causa das fendas, as áreas do alumínio que se encontram fora do campo magnético estão isoladas das que estão dentro dele. Embora os elétrons primeiro se desloquem numa direção, quando muitos elétrons se juntaram na

parte de cima ou de baixo do pêndulo eles batem uns nos outros e a tensão assim resultante fica em equilíbrio com a força de Lorentz sem fluxo de corrente. A energia do pêndulo, portanto, não é transformada em calor.

### 4.3 Diamagnetismo e paramagnetismo

- A montagem da experiência corresponde em princípio à Fig 5. Em vez do pêndulo, agora pendura-se a barra de alumínio ou a barra de vidro no campo magnético (antes deve-se eliminar algum enrolamento do fio, veja parte 3). A barra de vidro irá primeiro girar um pouco de um lado para o outro, enquanto que a barra de alumínio só se movimentará muito devagar (remoinhos induzidos, veja a última seção) até a sua posição final. Após um certo tempo, as barras se posicionam como é mostrado na Fig. 6.

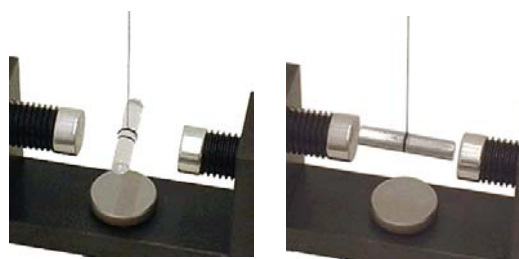


Fig. 6: barra de vidro (à esqu.) e barra de alumínio (à dir.) no campo magnético

- Soltando o parafuso de dedo que segura os ímãs e girando lentamente os ímãs, pode-se mostrar que a posição das barras em relação aos ímãs não se altera e portanto, que esta posição não resulta de uma ação puramente mecânica de descanso (sem enrolamento da linha).
- Explicação: mesmo que nem o vidro nem o alumínio sejam magnéticos, ambas barras se alinham em função do campo magnético. A grandeza decisiva aqui é a permeabilidade relativa  $\mu_r$ , a qual determina em quanto a densidade do fluxo de um campo magnético será multiplicada em relação ao vácuo. Surpreendentemente, e de forma diversa das constantes dielétricas, a constante de permeabilidade pode ser maior ou menor do que 1. No alumínio ela mede<sup>2)</sup> = 1,000023 e no vidro = 0,99999. No alumínio a densidade de fluxo é portanto aumentada e a barra gira no sentido do campo. Este efeito é chamado paramagnetismo. No vidro temos a situação contrária. A barra gira fora do campo e o efeito é chamado de diamagnetismo.

<sup>2)</sup> Grimsehl, Physik II, Ernst Klett Verlag Stuttgart, 1955