

## Mechanik auf der Magnethafttafel 1000735

### Bedienungsanleitung

09/26 ALF/HJB



### 1. Beschreibung

Der Aufbausatz Mechanik - Statik ermöglicht die Durchführung aller grundlegenden Experimente zur Statik. Die Besonderheit besteht dabei darin, daß alle Experimentieraufbauten durch die mit Magnethaftscheiben versehenen Experimentierteile auf einer vertikal angeordneten Magnethafttafel vorgenommen werden. Dabei sorgen die kräftigen Haftmagnete für einen sicheren Halt aller Teile. Der Vorzug dieser Experimentiertechnik besteht einerseits im Verzicht auf jegliches Stativmaterial, andererseits in der leichten Verschiebbarkeit aller Experimentierteile. Dadurch wird ein schnelles Aufbauen der jeweiligen Experimentieranordnung und ein einfaches Justieren möglich. Die vertikale Anordnung und die großen Abmessungen aller Aufbauteile bedingen eine gute Sichtbarkeit aller Experimentieraufbauten. Durch den Verzicht auf Stativmaterial entfällt dessen störender Einfluß. Weiterhin ermöglicht die Arbeit an der Hafttafel die unmittelbare Beschriftung an der Experimentieranordnung. Einerseits können sowohl - falls erforderlich - die Bauteile mit Namen versehen werden. Andererseits können die entsprechenden physikalischen Größen, die verändert bzw. gemessen werden, eingetragen werden, so z.B. Längen und Kräfte in ihrer jeweiligen Lage. Schließlich kann unmittelbar neben der experimentellen Anordnung eine Skizze zum Experiment dargestellt werden, die das Prinzip der experimentellen Anordnung beinhaltet. Diese Skizze kann vor dem experimentellen Aufbau angefertigt werden, so dass dann eine

Zusammenstellung der experimentellen Anordnung nach der Skizze erfolgt. Sie kann aber auch nach dem experimentellen Aufbau entwickelt werden, wobei in ihr die wesentlichen Teile der experimentellen Anordnung abgehoben werden. Auf diese Weise ist z.B. die Darstellung von Kräften und Kräfteparallelogrammen möglich.

Zur Realisierung der Experimente gehört außer dem Aufbausatz eine Magnethafttafel der Mindestabmessungen 100 cm x 100 cm.

### 2. Lieferumfang

| Nr. | Bauteil                                         | Anzahl |
|-----|-------------------------------------------------|--------|
| 1.  | Kraftmesser 5 N                                 | 2      |
| 2.  | Schiefe Ebene mit fester Rolle und Winkelmesser | 1      |
| 3.  | Walze 5 N                                       | 1      |
| 4.  | Aluminiumquader mit 2 Haken 2 N                 | 1      |
| 5.  | Hakenkörper 1 N                                 | 6      |
| 6.  | Rolle, klein                                    | 1      |
| 7.  | Rolle, groß                                     | 1      |
| 8.  | Flasche mit 2 Rollen                            | 1      |
| 9.  | Hebel                                           | 1      |
| 10. | Stahlstab mit Gewinde                           | 1      |
| 11. | Gegengewicht mit Feststellschraube              | 1      |
| 12. | Schraubenfedern                                 | 3      |
| 13. | Schwerpunktscheibe                              | 1      |
| 14. | Lot                                             | 1      |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| 15. Halterung                | 3 |
| 16. Gummimuffen              | 3 |
| 17. Messinghaken             | 3 |
| 18. Messingbügel             | 1 |
| 19. Haftskala                | 1 |
| 20. Haftpfeile               | 4 |
| 21. Haftdreieck              | 1 |
| 22. Nylonfaden mit Schlaufen | 4 |

### 3. Experimente mit dem Gerätesatz

#### Wesen einer Kraft, Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften

1. Kraftmessung mit einem Federkraftmesser – Kraft als vektorielle Größe
2. Verschiebung einer Kraft längs ihrer Wirkungslinie
3. Hookesches Gesetz
4. Addition von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie
5. Actio gleich Reactio
6. Addition von Kräften unterschiedlicher Richtungen – Verwendung von Kraftmessern
7. Addition von Kräften unterschiedlicher Richtungen – Verwendung von Hakenkörpern
8. Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten, die senkrecht aufeinander stehen
9. Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte

#### Schwerpunkt und Gleichgewichtslage

10. Schwerelinien und Schwerpunkt einer Kunststoffscheibe
11. Gleichgewichtslagen eines hängenden Körpers
12. Gleichgewichtslagen – Schwerpunkt außerhalb des Hebels

#### Kraftumformende Einrichtungen

13. Kräftegleichgewicht am zweiseitigen Hebel
14. Kräftegleichgewicht am einseitigen Hebel
15. Drehmoment
16. Kräfte an der festen Rolle
17. Kräfte an der losen Rolle
18. Kräfte am Flaschenzug
19. Kräfte an der schiefen Ebene – Untersuchung mit dem Kraftmesser
20. Kräfte an der schiefen Ebene – Untersuchung mit Hakenkörpern

21. Gleitreibung – Untersuchung mit dem Kraftmesser
22. Gleitreibung – Untersuchung mit Wägestücken
23. Haftreibung
24. Rollreibung

#### Schwingungen

25. Periodendauer eines Fadenpendels
26. Periodendauer eines vertikalen Feder-schwingers
27. Resonanz zweier Federschwinger

### 4. Hinweise zu einigen Aufbauteilen

#### 1. Federkraftmesser

Die Federkraftmesser können in jeder Lage Verwendung finden. Ggf. muß lediglich das Eigengewicht der Fäden, Haken usw. berücksichtigt werden. Bei der Verwendung möglichst großer Kräfte ist jedoch deren Einfluß gering. Die Nullstellung des Zeigers wird durch Drehen der Skalenscheibe erreicht. Der Faden muss im Uhrzeigersinn auf die Schnurscheibe gelegt werden.

#### 2. Schiefe Ebene

Die schiefe Ebene kann leicht in verschiedenen Neigungen an der Hafttafel befestigt werden. Das angehängte Lot zeigt den jeweiligen Neigungswinkel an.

#### 3. Flasche mit 2 Rollen

Die Flasche mit 2 Rollen kann auch als lose Rolle Verwendung finden. Dazu ist es zweckmäßig, eine Rolle abzuschrauben. Dadurch wird die experimentelle Anordnung übersichtlicher und die Gewichtskraft der Flasche verringert.

#### 4. Haftpfeile und Haftdreieck

Die Richtungen der Kräfte bzw. Bewegungen können in den experimentellen Anordnungen durch die Haftpfeile markiert werden. Wegen der gleichen Länge der Haftpfeile sollte jedoch bei unterschiedlich großen Kräften ein Hinweis darauf erfolgen, dass die Pfeile die Beträge der Kräfte nicht richtig widerspiegeln.

Mit dem Haftdreieck lässt sich sehr gut die Lage des Drehpunktes kennzeichnen.

## Durchführung der Experimente

### 1. Kraftmessung mit einem Federkraftmesser – Kraft als vektorielle Größe

#### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Walze
- 1 Aluminiumquader mit 2 Haken
- 1 Hakenkörper
- 1 Messinghaken
- 3 Fäden mit Schlaufen, unterschiedlich lang

#### Experimenteller Aufbau

- Die Federwaage im oberen Teil der Hafttafel anbringen.
- An ihr wird der Faden mit Schlaufen und an dessen Ende der Messinghaken befestigt.

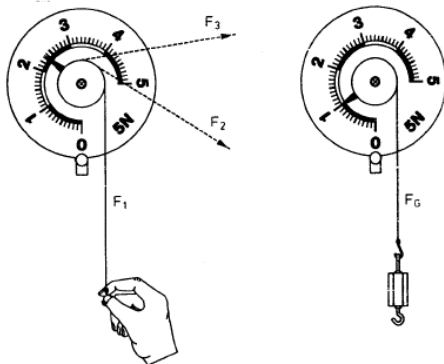


Abb. 1

#### Experiment

- Mit der Hand eine schrittweise größere Kraft auf den Federkraftmesser ausüben.
- Die Kraft nacheinander in verschiedenen Richtungen wirken lassen.
- Schließlich werden der Hakenkörper, der Aluminiumquader und die Walze nacheinander an den Federkraftmesser gehängt.

#### Ergebnis

Kräfte besitzen verschiedene Beträge, und sie können in unterschiedlicher Richtung wirken. Die Gewichtskraft ist senkrecht nach unten gerichtet. Zur Kennzeichnung einer Kraft sind die Angabe von Betrag und Richtung erforderlich.

### 2. Verschiebung einer Kraft längs ihrer Wirkungslinie

#### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 3 Hakenkörper
- 1 Messinghaken
- 3 Fäden mit Schlaufen

#### Experimenteller Aufbau

- Den Federkraftmesser im oberen Teil der Hafttafel befestigen.
- An seine Messstelle die 3 Fäden mit Schlaufen hängen.

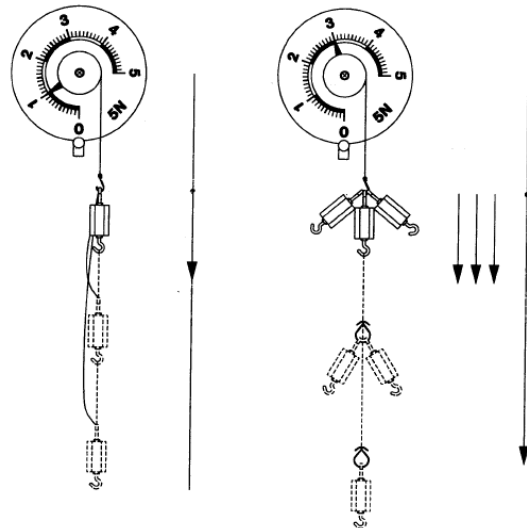


Abb. 2

#### Experiment

- Zunächst einen Hakenkörper in den Haken am Federkraftmesser eingehängen und die angezeigte Kraft ermitteln.
- Danach diesen Hakenkörper schrittweise von Schlaufe zu Schlaufe tiefer hängen.
- Nachfolgend die 3 Hakenkörper am Federkraftmesser befestigen.
- Schließlich zunächst den einen, dann die beiden anderen Hakenkörper schrittweise von Schlaufe zu Schlaufe nach unten setzen.
- Jeweils die angezeigte Kraft ermitteln.

#### Ergebnis

Eine Kraft lässt sich längs ihrer Wirkungslinie verschieben.

### 3. Hooke'sches Gesetz

#### Notwendige Komponenten

- 2 Schraubenfedern
- 3 Hakenkörper
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftskala

#### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel anbringen.
- An ihrem oberen Ende die Halterung befestigen.
- Daran wird eine Feder gehängt und mit einer Gummimuffe gesichert.

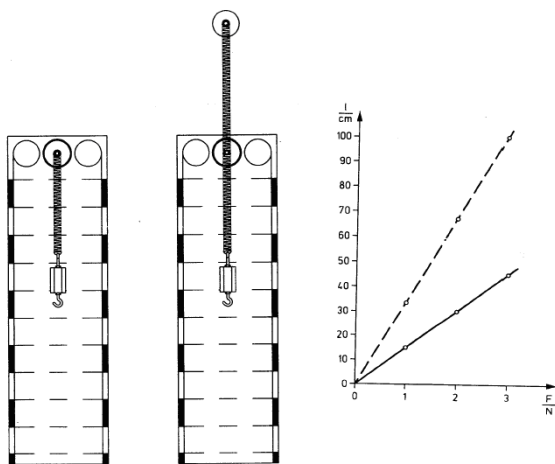


Abb. 3

#### Experiment

- Die Lage des unteren Endes der Feder ermitteln.
- Danach einen Hakenkörper an der Feder befestigen, die Verlängerung bestimmen und in die Tabelle eintragen.
- Nachfolgend 2 und 3 Hakenkörper an die Federhängen und jeweils die Verlängerung ermitteln.
- Das Experiment mit 2 untereinander hängenden Federn wiederholen. Dabei ist es zweckmäßig, die Halterung für die Federn oberhalb der Haftskala anzubringen.
- Wiederum die jeweilige Verlängerung und die wirkende Gewichtskraft in die Tabelle eintragen.
- Die Verlängerung in Abhängigkeit von der Kraft graphisch darstellen.

#### Tabelle

| Gewichtskraft der Hakenkörper<br>$F_G$ in N | Verlängerung einer Feder<br>$\Delta l$ in cm | Verlängerung zweier Federn<br>$\Delta l$ in cm |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 0                                           |                                              |                                                |
| 1                                           |                                              |                                                |
| 2                                           |                                              |                                                |
| 3                                           |                                              |                                                |

#### Ergebnis

Je größer die wirkende Kraft ist, umso größer ist auch die Verlängerung. Es gilt das Hooke'sche Gesetz:  $\Delta l \sim F$ . Die Verlängerung bei einer bestimmten Kraft hängt von den Eigenschaften der Feder ab.

### 4. Addition von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie

#### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 5 Hakenkörper
- 2 Fäden mit Schlaufen

#### Experimenteller Aufbau

- Den Federkraftmesser im oberen Teil der Hafttafel befestigen.
- An den Federkraftmesser die beiden Fäden mit Schlaufen anbringen.

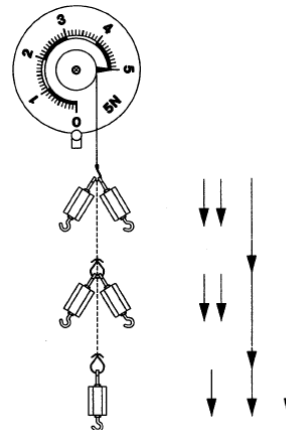


Abb. 4

#### Experiment

- Zunächst einen Hakenkörper am Federkraftmesser befestigen, nachfolgend schrittweise die übrigen, wahlweise am Federkraftmesser oder an den Fäden.
- In jedem Falle die angezeigte Kraft ablesen.

### Ergebnis

Wirken alle Kräfte längs einer Wirkungslinie, so ergibt sich die Gesamtkraft durch Addition der Teilkräfte. Die Richtung der Gesamtkraft ist gleich der Richtung der Teilkräfte.

## **5. Actio gleich Reactio**

### Notwendige Komponenten

- 2 Kraftmesser
- 1 Faden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die beiden Federkraftmesser auf beiden Seiten der Hafttafel so anbringen, dass sich zwischen ihnen der kurze Faden mit Schlaufen befindet. Er ist zunächst noch nicht gestrafft.

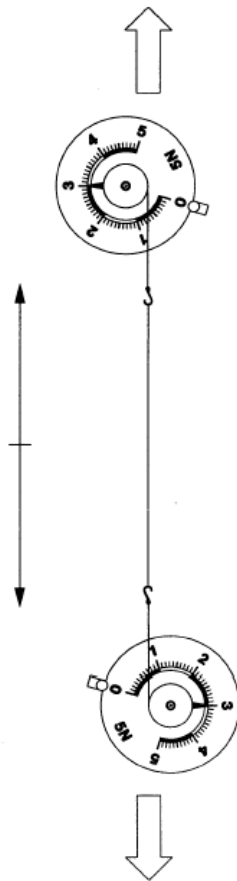


Abb. 5

### Experiment

- Den linken Federkraftmesser allmählich immer weiter nach links schieben.

Wenn der Faden gestrafft ist, zeigen beide Federkraftmesser eine Kraft an. Die Kräfte nehmen beim Bewegen des Kraftmessers zu. Sie sind in jedem Falle gleich groß.

- Den linken Federkraftmesser wieder an die ursprüngliche Stelle bringen und den rechten

Kraftmesser schrittweise immer weiter nach außen schieben.

Beim Vergrößern des Abstandes zwischen den Kraftmessern treten stets zwei gleich große Kräfte auf.

### Ergebnis

Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so setzt der Körper dieser Kraft stets eine gleich große aber entgegengesetzt gerichtete Kraft entgegen: actio gleich reactio.

## **6. Addition von Kräften unterschiedlicher Richtungen – Verwendung von Kraftmessern**

### Notwendige Komponenten

- 2 Kraftmesser
- 1 Feder
- 1 Schwerpunktscheibe
- 3 Halterungen
- 3 Gummimuffen
- 1 Haken
- 1 Faden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

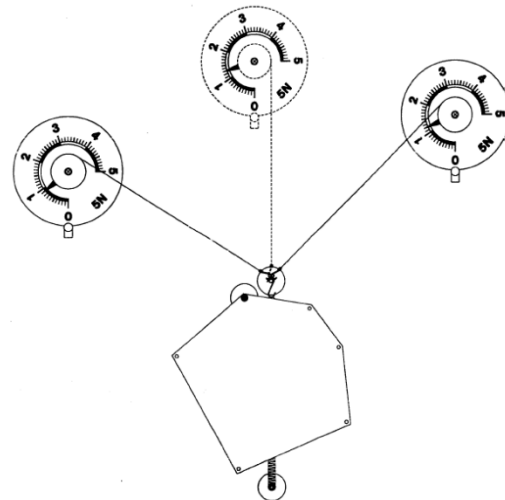


Abb. 6

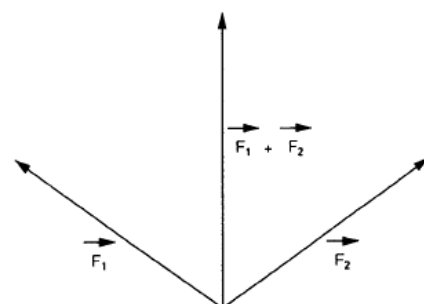


Abb. 6 a

- Die beiden Federkraftmesser im oberen Teil der Hafttafel auf beiden Seiten befestigen und mit einem Faden mit Schlaufen verbinden.
- In diesen Faden den Haken einhängen.
- An dem Haken die Schraubenfeder befestigen. Sie wird nach unten gespannt und dort in einer Halterung mit Gummimuffe befestigt.
- An die Stelle, wo sich der Haken befindet, eine weitere Halterung anbringen.
- Die Schwerpunktscheibe an einer Halterung so vor der Schraubenfeder befestigen, dass die Feder verdeckt ist und nur der Haken mit Halterung sichtbar bleibt.

### Experiment

- Die beiden Federkraftmesser so verschieben, dass der Haken nicht mehr an der Halterung anliegt.

In dieser Lage wirken zwei Kräfte auf den Haken, die sich im Gleichgewicht mit der Kraft der Feder befinden.

- Die beiden Kräfte der Federkraftmesser in Richtung und Betrag an die Tafel zeichnen.
- Dann den einen Federkraftmesser aus der Anordnung herausnehmen und die freiwerdende Schlaufe des Fadens in der Messstelle des verbleibenden Federkraftmessers einhängen.
- Diesen Kraftmesser nun so lange verschieben, bis der Haken wiederum die Halterung nicht mehr berührt.

In diesem Falle hinterlässt die durch den Kraftmesser bereitgestellte Kraft am Haken die gleiche Wirkung, wie vorher die beiden einzelnen Kräfte.

- Diese Kraft ebenfalls in Betrag und Richtung auf die Tafel übertragen.

Diese Kraft stellt die Diagonale im Kräfteparallelogramm dar.

### Ergebnis

Wirken auf einen Körper zwei Kräfte in verschiedenen Richtungen, so können diese durch eine einzige Kraft ersetzt werden. Betrag und Richtung dieser Kraft ergeben sich aus der Diagonale im Kräfteparallelogramm.

## **7. Addition von Kräften unterschiedlicher Richtungen – Verwendung von Hakenkörpern**

### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Rolle, groß
- 1 Rolle, klein
- 6 Hakenkörper
- 1 Schraubenfeder
- 1 Schwerpunktscheibe
- 3 Halterungen
- 3 Gummimuffen
- 1 Messinghaken
- 1 Faden mit Schlaufen, lang

### Experimenteller Aufbau

- Die beiden Rollen zu beiden Seiten im oberen Teil der Hafttafel befestigen.
- Den Faden über die Rollen legen und in jede Schlaufe 2 Hakenkörper hängen.
- Die Feder im unteren Teil der Hafttafel an einer Halterung mit einer Muffe befestigen.
- Das andere Ende der Feder über einen Haken mit dem Faden verbinden.
- Die Halterung so weit nach unten verschieben, bis zwischen den beiden schräg nach oben gerichteten Kräften der gewünschte Winkel auftritt.
- Anschließend eine Halterung an der Stelle des Hakens anbringen, ohne dass dieser berührt wird.
- Mit einer weiteren Halterung die Schwerpunktscheibe so befestigen, dass sie die Feder abdeckt und nur der Haken mit Halterung sichtbar bleibt.

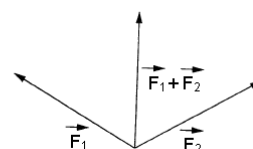
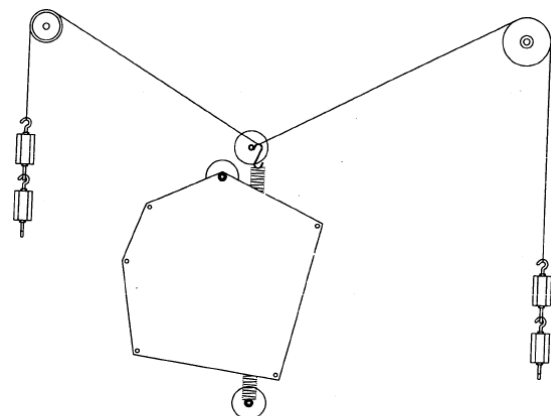


Abb 7

### Experiment

Die beiden Hakenkörper üben auf den Haken je eine Kraft aus, so dass er in dieser Lage verbleibt.

- Die beiden Richtungen der Kräfte an der Tafel markieren und so mit Pfeilspitzen versehen, dass die Länge der Vektoren den Kräften entspricht.

Das Ziel besteht nun darin, diese beiden Kräfte durch eine einzige zu ersetzen, so dass die gleiche Wirkung auftritt.

- Dazu an den Haken anstelle des Fadens mit Hakenkörper den Federkraftmesser befestigen und so weit nach oben bzw. zur Seite schieben, dass der Haken wieder freischwebt.

Jetzt übt der Federkraftmesser auf den Haken die gleiche Kraft aus, wie vorher die beiden Hakenkörper.

- Betrag und Richtung der Kraft des Federkraftmessers an der Tafel skizzieren.

Nach dem Abnehmen des Kraftmessers erkennt man, dass die resultierende Kraft gleich der Diagonalen im Kräfteparallelogramm ist, das von den beiden Einzelkräften aufgespannt wird.

### Ergebnis

Wirken auf einen Körper zwei Kräfte in verschiedenen Richtungen, so können diese durch eine einzige Kraft ersetzt werden. Die Diagonale im Kräfteparallelogramm, die von dem Angriffspunkt der beiden Kräfte ausgeht, entspricht in Betrag und Richtung der Summe der beiden Einzelkräfte.

## **8. Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten, die senkrecht aufeinander stehen**

### Notwendige Komponenten

- 2 Kraftmesser
- 5 Hakenkörper
- 1 Rolle
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Messinghaken
- 2 Fäden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Einen Federkraftmesser in der halben Höhe im linken Bereich der Hafttafel, den anderen in der Mitte des oberen Bereiches befestigen.
- Beide Federkraftmesser mit einem kurzen Faden mit Schlaufen verbinden.

- Den Messinghaken in diesen Faden einhängen und mit einem weiteren Faden mit Schlaufen versehen.
- Die 5 Wägestücke in die freie Schlaufe hängen und den Faden so über eine Rolle legen, dass er schräg nach rechts unten zieht.
- Die Lage des oberen Federkraftmessers so verändern, dass zwischen den beiden Kräften, die von den Federkraftmessern ausgehen, ein rechter Winkel besteht.
- An die Stelle des Messinghakens die Halterung so anbringen, dass der Haken sie nicht berührt.

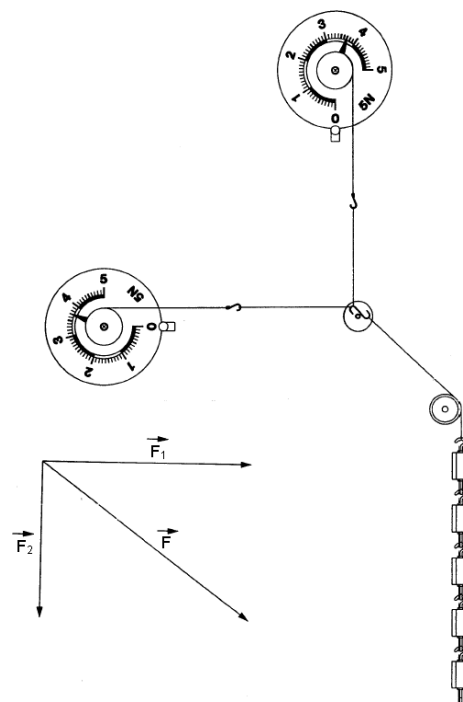


Abb. 8

### Experiment

Die Hakenkörper üben auf den Messinghaken eine schräg nach unten gerichtete Kraft aus. Diese Kraft wird am Haken in zwei senkrecht zueinander verlaufenden Komponenten zerlegt. Die eine Kraft ist vertikal, die andere horizontal gerichtet. Die beiden von den Federkraftmessern angezeigten Kräfte zeigen jeweils die Gegenkraft zu den beiden Teilkomponenten der zerlegten Kraft.

- Im Kräfteparallelogramm zunächst die schräg nach unten gerichtete Kraft  $F$  der Hakenkörper in Betrag und Richtung eintragen.
- Danach vom Ausgangspunkt dieser Kraft eine horizontale und vertikale Linie zeichnen.
- Nun ein Parallelogramm so konstruieren, dass die Kraft der Hakenkörper die Diagonale im Rechteck ist.

Die beiden vom Angriffspunkt der Kraft ausgehenden Teilkräfte können in ihrem Betrag im Parallelogramm abgelesen werden. Diese Beträge entsprechen den von den beiden Federkraftmessern gezeigten Werten. Die Richtung der an den Federkraftmessern angreifenden Teilkräfte ist jedoch entgegengesetzt zu diesen Teilkräften, da diese die Gegenkräfte darstellen.

### Ergebnis

Jede Kraft lässt sich in zwei senkrecht zueinander gerichtete Teilkräfte zerlegen. Die Beträge der beiden Teilkräfte entsprechen den Längen der beiden Seiten des Rechtecks, in dem die zerlegte Kraft die Diagonale bildet. Jede der beiden Teilkräfte ist kleiner als die zerlegte Kraft.

## 9. Zerlegung einer Kraft in zwei parallele Kräfte

### Notwendige Komponenten

- 2 Kraftmesser
- 1 Hebel
- 4 Hakenkörper

### Experimenteller Aufbau

- Die beiden Federkraftmesser in gleicher Höhe im rechten und linken Teil der Hafttafel befestigen.
- Den Hebel so in die Federkraftmesser einhängen, dass die Angriffspunkte der Kraft jeweils im letzten äußeren Loch des Hebels liegen.
- Nun die Lage der Federkraftmesser so verändern, dass die Kräfte vertikal nach oben wirken und der Hebel horizontal hängt.

Die durch die Gewichtskraft des Hebels verursachten Ausschläge an den Kraftmessern werden durch Drehen der Skalenscheibe korrigiert.

### Experiment

- Zunächst die (gleiche) Gewichtskraft, die von beiden Federkraftmessern angezeigt wird, bestimmen.
- Dann alle 4 aneinanderhängenden Hakenkörper zunächst in die Mitte des Hebels hängen und die von den Federkraftmessern angezeigten Teilkräfte bestimmen.
- Danach den Aufhängepunkt immer weiter nach außen verlagern und jeweils die Teilkräfte ermitteln. Dazu ist es notwendig, vor der Ablesung den Hebel durch vertikales Verschieben der Kraftmesser wieder horizontal auszurichten.

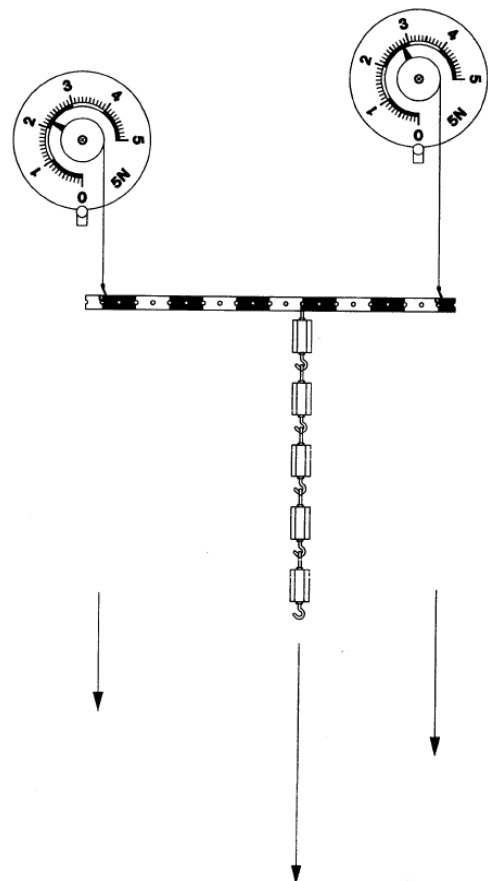


Abb. 9

- Die Teilkräfte  $F_1$  und  $F_2$  und die Abstände  $a_1$  und  $a_2$  in die Tabelle eintragen.

Die Summe der von den Kraftmessern angezeigten Teilkräfte ist gleich der Gewichtskraft der Hakenkörper.

Tabelle

| Kraft $F_1$<br>in N | Kraft $F_2$<br>in N | Abstand $a_1$<br>in cm | Abstand $a_2$<br>in cm |
|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
|                     |                     |                        |                        |
|                     |                     |                        |                        |

### Ergebnis

Eine Kraft kann in zwei parallel zu ihr verlaufende Teilkräfte zerlegt werden. Dabei ist die Summe der Beträge der Teilkräfte gleich dem Betrag der Gesamtkraft. Die Teilkräfte verhalten sich umgekehrt wie die Abstände der Angriffspunkte der Teilkräfte von dem Angriffspunkt der Gesamtkraft.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

## 10. Schwerlinien und Schwerpunkt einer Kunststoffscheibe

### Notwendige Komponenten

- 1 Schwerpunktscheibe
- 1 Lot
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe

### Experimenteller Aufbau

- Die Halterung in der Mitte des oberen Teils der Hafttafel befestigen und auf die Halterung die Schwerpunktscheibe an einer ihrer Bohrungen aufstecken.
- Dann das Lot an der Halterung befestigen und mit der Gummimuffe sichern.

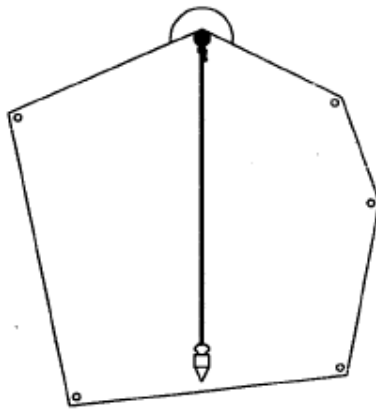


Abb. 10

### Experiment

- Längs des Lotes einen dünnen Bleistiftstrich ziehen.
- Danach die Schwerpunktscheibe an einer ihrer anderen Bohrungen aufhängen, wiederum das Lot an der Halterung befestigen und einen weiteren Bleistiftstrich längs des Lotes ziehen.
- In gleicher Weise mit den übrigen Löchern in der Schwerpunktscheibe verfahren.

### Ergebnis

Alle sogenannten Schwerlinien schneiden sich in dem gleichen Punkt. Es ist der Schwerpunkt der Kunststoffscheibe.

- Um dies nachzuprüfen, die Scheibe von der Halterung abnehmen, in die horizontale Lage bringen und mit einem spitzen Bleistift im Schwerpunkt unterstützen.

Die im Schwerpunkt unterstützte Scheibe verändert ihre Lage nicht.

### Hinweis

Genau genommen befindet sich der Schwerpunkt der Scheibe im Inneren. Deshalb bleibt bei der Unterstützung in dem ermittelten Punkt die Scheibe nicht in jeder Lage in Ruhe.

## 11. Gleichgewichtslagen eines hängenden Körpers

### Notwendige Komponenten

- 1 Hebel
- 1 Stahlstab mit Gewinde
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe

### Experimenteller Aufbau

- Die Halterung im oberen Teil der Tafel in der Mitte befestigen, den Hebel an seinem mittleren Loch daraufstecken und mit einer Gummimuffe sichern.

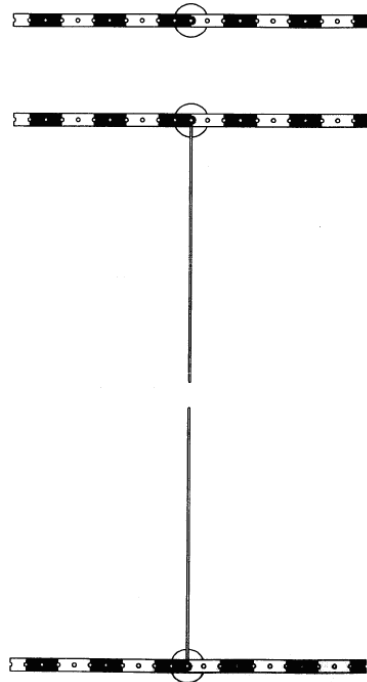


Abb. 11

### Experiment

- Den Hebel in verschiedene Lagen bringen und jeweils losgelassen.
- Dann den Stahlstab mit Gewinde im mittleren Teil des Hebels befestigen, so dass der Stab nach unten zeigt.
- Den Hebel wiederum in unterschiedliche Lagen bringen, wobei sich der Stahlstab unterhalb des Aufhängepunktes befindet, und loslassen.
- Den Hebel schließlich um  $180^\circ$  drehen, so dass der Stahlstab vertikal nach oben zeigt.
- Den Hebel auch in dieser Lage loslassen.

### Ergebnis

Im ersten Fall befindet sich der Hebel im indifferenten Gleichgewicht. Er bleibt in jeder Lage, in die er gebracht wird, in Ruhe.

Im zweiten Fall befindet sich der Hebel im stabilen Gleichgewicht. Wenn man ihn aus seiner Gleichgewichtslage auslenkt, so bewegt er sich immer in diese zurück.

Im dritten Fall befindet sich der Hebel im labilen Gleichgewicht. Er verharrt nur kurzzeitig in dieser Lage. Jede noch so geringe Abweichung von dieser Lage führt dazu, dass er sich immer mehr davon entfernt und in die stabile Gleichgewichtslage übergeht.

## **12. Gleichgewichtslagen - Schwerpunkt außerhalb des Hebels**

### Notwendige Komponenten

- 1 Hebel
- 1 Stahlstab mit Gewinde
- 1 Gegengewicht mit Feststellschraube
- 1 Lot
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe

### Experimenteller Aufbau

- Den Stahlstab mit Gewinde in die Mitte des Hebels schrauben.

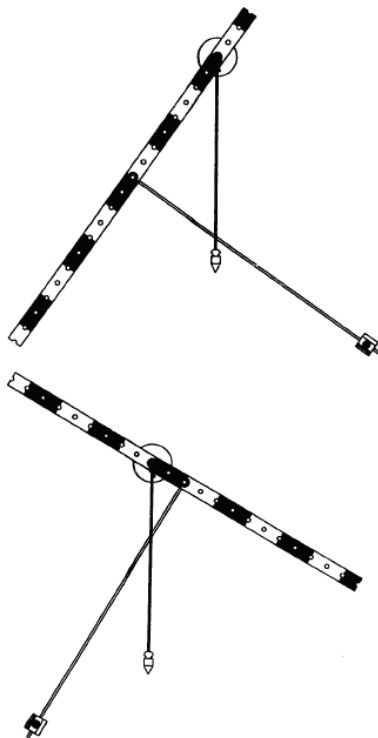


Abb. 12

- In der Nähe des unteren Endes vom Stahlstab das Gegengewicht mit Feststellschraube befestigen.
- Die Halterung im mittleren oberen Teil der Hafttafel anbringen und das Lot auf die Halterung bis zur Grundplatte schieben.
- Den Hebel an einem beliebigen Loch auf die Halterung stecken und ihn mit der Gummimuffe arretieren.

### Experiment

- Die Stelle, an der das Lot den Stahlstab schneidet, z.B. mit einem kleinen Stück Klebeband markieren.
- Dann den Hebel an einem anderen Loch auf die Halterung aufstecken und den Kreuzungspunkt des Lotes mit dem Stahlstab ermitteln.
- Das Experiment mit zwei Löchern wiederholen, die sich vom Stahlstab aus gesehen auf der anderen Seite des Hebels befinden.
- Schließlich Hebel und Lot von der Halterung abnehmen und den Stahlstab so auf eine Fingerkuppe aufsetzen, dass der Unterstützungspunkt an der markierten Stelle des Stahlstabes liegt.

### Ergebnis

In allen Fällen liegt der Kreuzungspunkt des Lotes mit dem Stahlstab an der gleichen Stelle. Dieser Punkt liegt außerhalb des Hebels. Er ist der Schwerpunkt der Anordnung.

## **13. Kräftegleichgewicht am zweiseitigen Hebel**

### Notwendige Komponenten

- 6 Hakenkörper
- 1 Hebel
- 1 Stahlstab mit Gewinde
- 1 Gegengewicht mit Feststellschraube
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftdreieck

### Experimenteller Aufbau

- Die Halterung im oberen mittleren Teil der Hafttafel befestigen, den Hebel an seinem mittleren Loch auf die Halterung aufstecken und mit der Gummimuffe vor dem Herabgleiten schützen.
- Unter der Halterung den Stahlstab mit Gewinde in den Hebel einschrauben und daran das Gegengewicht mit Feststellschraube in halber Höhe befestigen.

Je höher die Ausgleichsmasse angebracht ist, um so größer ist die Empfindlichkeit des Hebels.

- Den Drehpunkt des Hebels mit dem Haftdreieck markieren.

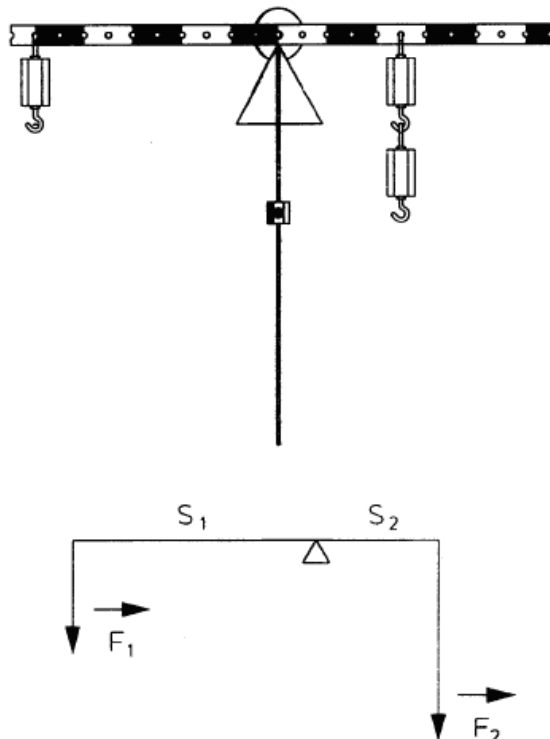


Abb. 13

#### Experiment

- Einen Hakenkörper in das linke äußere Loch des Hebels einhängen.
- Danach das Loch auf der rechten Seite des Hebels suchen, in das ebenfalls ein Hakenkörper eingehängt werden muss, damit sich der Hebel im Gleichgewicht befindet.
- Die Stellen, an denen die Kräfte angreifen, können durch die Kraftpfeile markiert werden.
- Den Abstand der beiden Angriffspunkte vom Drehpunkt messen und in die Tabelle eintragen, ebenso die Gewichtskräfte der beiden Hakenkörper.
- Dann an den rechten Hakenkörper einen weiteren hängen und das Loch suchen, in das die beiden Hakenkörper eingehängt werden müssen, damit Gleichgewicht besteht.
- Kräfte und Kraftarme in die Tabelle eintragen.
- Jetzt den linken Hakenkörper zwei Löcher weiter nach innen hängen (8. Loch vom Drehpunkt).
- Um Gleichgewicht herzustellen, zunächst rechts einen, dann zwei und schließlich 4 Hakenkörper an die entsprechende Stelle bringen.

- Die Länge der Kraftarme und die Beträge der Kräfte wieder in die Tabelle eintragen.

#### Tabelle

| Linker Hebelarm<br>$s_1$ in cm | Links-wirkende Kraft<br>$F_1$ in N | Rechter Hebelarm<br>$s_2$ in cm | Rechts-wirkende Kraft<br>$F_2$ in N | $F_1 \cdot s_1$ in Ncm | $F_2 \cdot s_2$ in Ncm |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                |                                    |                                 |                                     |                        |                        |
|                                |                                    |                                 |                                     |                        |                        |

#### Ergebnis

Je weiter bei einem Hebel die Kraft vom Drehpunkt entfernt wirkt, um so geringer muss sie sein, damit Kräftegleichgewicht besteht. Zur mathematischen Auswertung werden die Produkte aus Kraft und Kraftarm für beide Hebelarme gebildet (die letzten beiden Spalten in der Tabelle). Es gilt:

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2.$$

#### 14. Kräftegleichgewicht am einseitigen Hebel

##### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 6 Hakenkörper
- 1 Hebel
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftdreieck

##### Experimenteller Aufbau

- Die Halterung im oberen mittleren Teil der Hafttafel befestigen.
- Den Hebel (linkes letztes Loch) auf die Halterung stecken und in das rechte letzte Loch des Hebels den Messteil des Federkraftmessers einhängen.
- Den Federkraftmesser so an der Hafttafel befestigen, dass sich der Hebel in horizontaler Lage befindet und die Wirkungslinie der Kraft senkrecht nach unten verläuft.

Der durch das Eigengewicht des Hebels verursachte Ausschlag des Kraftmessers kann durch Drehen der Skalenscheibe korrigiert werden, so dass der Zeiger auf Null steht.

- Den Drehpunkt des Hebels mit dem Haftdreieck markieren.

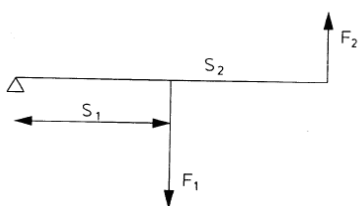
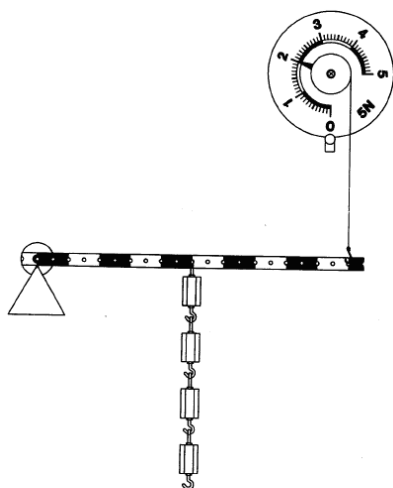


Abb. 14

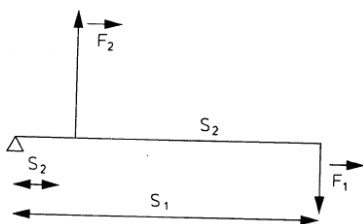
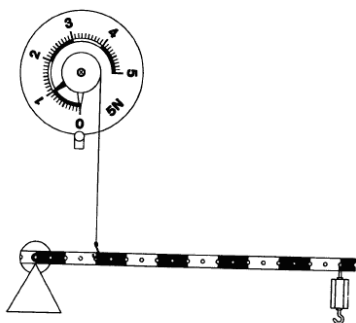


Abb. 14 a

### Experiment

- 4 Hakenkörper aneinanderhängen und zunächst auf der halben Länge des Hebels befestigen.
- Die Länge der Hebelarme und die Beträge der Kräfte in die Messwertetabelle eintragen.
- Zunächst die Hakenkörper in ein Loch einhängen, das dem Drehpunkt zugewandt ist, nachfolgend in ein Loch, das weiter von ihm abgewandt ist. Die Beträge der physikalischen Größen werden ebenfalls in die Tabelle eingetragen.

- Den Federkraftmesser vom Hebel lösen und in das 4. Loch, vom Drehpunkt aus gezählt, einhängen.
- Das erfolgt wiederum so, dass der Hebel horizontal verläuft und die Wirkungslinie vertikal nach oben.
- Eine erneute Nullpunktkorrektur des Federkraftmessers durchführen.
- Jetzt einen Hakenkörper nacheinander an drei Stellen des Hebels bringen, die sich rechts von der Messstelle der Kraft befinden.
- Die jeweils gemessenen Beträge der physikalischen Größen in die Tabelle einfügen.

### Tabelle

| Hebelarm<br>$s_1$ in<br>cm | Nach unten<br>wirkende<br>Kraft<br>$F_1$ in N | Hebelarm<br>$s_2$ in<br>cm | Nach oben<br>wirkende<br>Kraft<br>$F_2$ in N | $F_1 \cdot s_1$<br>in Ncm | $F_2 \cdot s_2$<br>in Ncm |
|----------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                            |                                               |                            |                                              |                           |                           |
|                            |                                               |                            |                                              |                           |                           |
|                            |                                               |                            |                                              |                           |                           |

### Ergebnis

Je größer der Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt ist, um so geringer muss die Kraft sein, damit Kräftegleichgewicht auftritt. Zur mathematischen Auswertung werden die Produkte aus dem jeweiligen Hebelarm und der zugehörigen Kraft gebildet (die letzten beiden Spalten in der Tabelle). Für den einseitigen Hebel gilt:

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2.$$

## 15. Drehmoment

### Notwendige Komponenten

- 2 Kraftmesser
- 1 Hebel
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftdreieck

### Experimenteller Aufbau

- Die Halterung in der Mitte der Hafttafel befestigen.
- Den Hebel an seinem mittleren Loch auf die Halterung stecken und ihn durch Aufsetzen der Gummimuffe vor dem Herabgleiten schützen.
- Den einen Federkraftmesser oberhalb des rechten Armes des Hebels anbringen, den anderen unterhalb.

- Den Drehpunkt des Hebels mit dem Haftdreieck markieren.

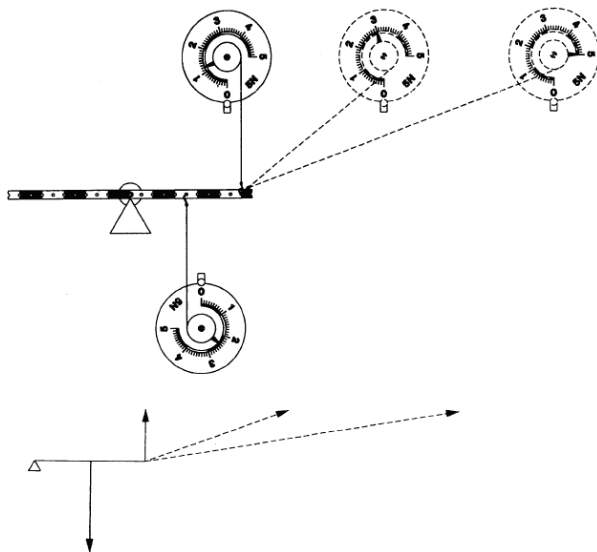


Abb. 15

### Experiment

- Die Messstelle des oberen Federkraftmessers zunächst in das letzte Loch des Hebels einhaken.
- Die Messstelle des unteren Federkraftmessers in das fünfte Loch vom Drehpunkt einhaken.
- Die Lage der Federkraftmesser so verändern, dass sich der Hebel in horizontaler Lage befindet und die Fäden vertikal nach oben bzw. nach unten zeigen.
- Dabei an dem einen Federkraftmesser eine Kraft von einigen Newton einstellen.
- Den jeweiligen Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt des Hebels sowie die zugehörigen Kräfte in die Messwertetabelle eintragen.
- Dann zunächst den Angriffspunkt des unteren Federkraftmessers zweimal variieren, schließlich auch den Angriffspunkt des oberen Federkraftmessers.
- In jedem Falle eine horizontale Lage des Hebels einstellen und auf die dazu senkrecht verlaufenden Kräfte achten.
- Die Abstände vom Drehpunkt und die Kräfte wiederum in die Tabelle übertragen.
- Schließlich die Lage des unteren Federkraftmessers so verändern, dass die Richtung der Kraft immer stärker von der Senkrechten auf dem Hebel abweicht. Dabei muss jedoch der Hebel weiterhin in horizontaler Lage verbleiben.

### Tabelle

| Abstand der 1. Kraft vom Drehpunkt $s_1$ in cm | 1. Kraft $F_1$ in N | Abstand der 2. Kraft vom Drehpunkt $s_2$ in cm | 2. Kraft $F_2$ in N | Drehmoment 1 $F_1 \cdot s_1$ in Ncm | Drehmoment 2 $F_2 \cdot s_2$ in Ncm |
|------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                |                     |                                                |                     |                                     |                                     |
|                                                |                     |                                                |                     |                                     |                                     |
|                                                |                     |                                                |                     |                                     |                                     |

### Ergebnis

Zur Beschreibung des Gleichgewichtes eines drehbar gelagerten Körpers kann man das Drehmoment benutzen. Es ist das Produkt aus dem jeweiligen Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt und der senkrecht dazu gerichteten Kraft. Im Gleichgewichtsfall ist der Betrag des rechts-drehenden Drehmoments gleich dem Betrag des linksdrehenden Drehmoments

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2.$$

Je stärker die Kraft von der Richtung senkrecht zum Hebelarm abweicht, umso größer muss sie sein, damit das Gleichgewicht erhalten bleibt. Dieses Ergebnis belegt, dass es zweckmäßig ist, das Drehmoment als Produkt aus Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt und der senkrecht dazu gerichteten Kraft festzulegen. Je stärker die Abweichung der Kraft von dieser Richtung ist, umso größer muss ihr Betrag sein, damit das gleiche Drehmoment auftritt.

### 16. Kräfte an der festen Rolle

#### Notwendige Komponenten

- 6 Hakenkörper
- 1 Rolle, groß
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftskala
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

#### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel befestigen.
- Am oberen Ende der Haftskala in der Mitte die große Rolle anbringen.
- Den Faden mit Schlaufen über die Rolle legen. In jeder Schlaufe je einen Hakenkörper befestigen.

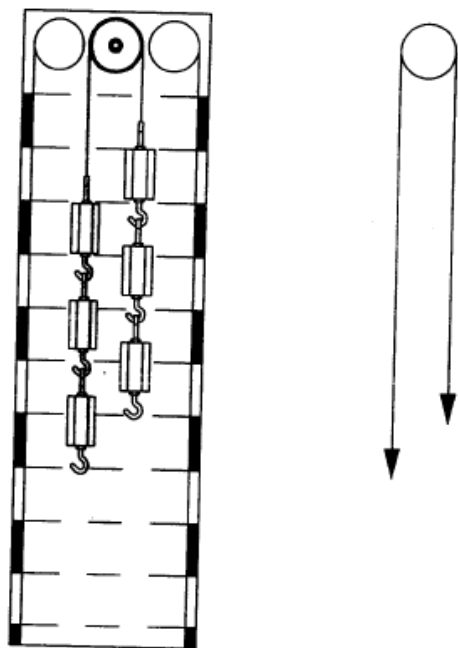


Abb. 16

#### Experiment

- Die Anzahl der Hakenkörper zunächst auf je zwei, dann auf je drei erhöhen.
- In jedem Falle werden die Hakenkörper in verschiedene Lagen gebracht und das Verhalten der gesamten Anordnung beobachtet.

#### Ergebnis

Bei der festen Rolle herrscht Gleichgewicht, wenn auf jeder Seite die gleiche Kraft wirkt.

### 17 Kräfte an der losen Rolle

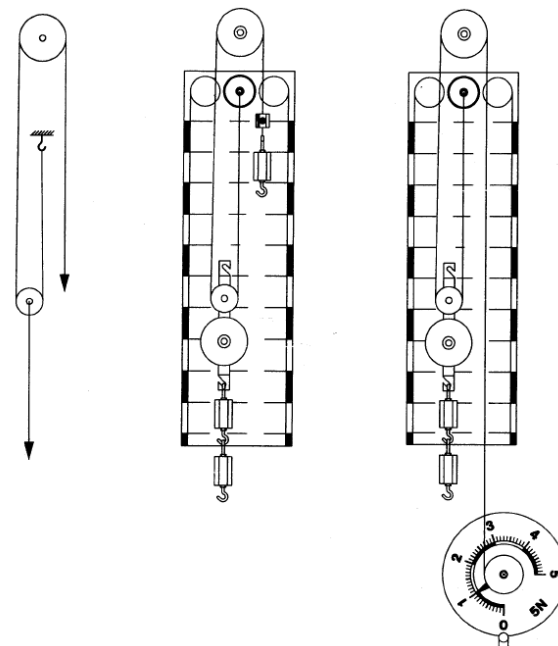
#### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Rolle, groß
- 1 Flasche mit 2 Rollen
- 6 Hakenkörper
- 1 Gegengewicht mit Feststellschraube
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftskala
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

#### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel befestigen.
- Die Halterung am oberen Ende der Haftskala in deren Mitte befestigen.
- Dicht darüber die große Rolle setzen.

- Die eine Schlaufe des Fadens an die Halterung einhängen und mit der Gummimuffe arretieren.
- Dann den Faden nach unten führen und dort die Flasche mit Rollen einhängen. Den Faden wieder nach oben führen und ihn über die feste Rolle am oberen Ende der Haftskala legen.
- In die Schlaufe am Ende des Fadens einen Hakenkörper hängen und die Flasche mit zwei Hakenkörpern belasten.
- Als Ausgleich für die Gewichtskraft der Fla-



sche mit Rollen zusätzlich zum Hakenkörper das Gegengewicht mit Feststellschraube anbringen und ggf. etwas Plastillina hinzufügen.

Abb. 17

Abb. 17 a

Abb. 17 b

#### Experiment 1

- Den Hakenkörper längs der Skala in verschiedene Stellungen bringen und jeweils loslassen.
- Nachfolgend einen zweiten Hakenkörper an die Flasche hängen und bis Erreichen des Gleichgewichts weitere Hakenkörper an der Schlaufe anbringen.

#### Experiment 2

- Die feste Rolle durch einen Federkraftmesser ersetzen und an seinem Messpunkt den Faden mit Schlaufe einhängen, an der sich der Hakenkörper mit dem Gegengewicht mit Feststellschraube befunden hat.
- Die Hakenkörper an der Flasche abnehmen.
- Zunächst den Zeigerausschlag des Federkraftmessers, der durch das Eigengewicht

der losen Rolle mit Flasche bedingt ist, durch Drehen der Skalenscheibe auf Null setzen.

- Dann die Hakenkörper nacheinander an die Flasche hängen und jeweils die vom Federkraftmesser angezeigte Kraft ermitteln.

### Ergebnis

Die lose Rolle befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Kraft am Faden halb so groß wie die Kraft an der Rolle ist.

### Hinweis

Zur Durchführung der Experimente ist es zweckmäßig, von der Flasche die große Rolle abzuschrauben. Dadurch wird die Übersichtlichkeit erhöht und die störende Gewichtskraft der Flasche verringert.

## **18. Kräfte am Flaschenzug**

### Notwendige Komponenten

- 6 Hakenkörper
- 1 Rolle, klein
- 1 Rolle, groß
- 1 Flasche mit 2 Rollen
- 1 Gegengewicht mit Feststellschraube
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftskala
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel anbringen.
- Oberhalb der Mitte der Skala die große Rolle anbringen, darunter im oberen Teil der Skala die kleine Rolle und noch weiter darunter die Halterung.
- Die eine Schlaufe des Fadens in die Halterung einhaken, durch die Gummimuffe arretieren und dann über die kleine Rolle der Flasche führen. Die Flasche wird dabei so gehalten, dass sich die kleine Rolle oben befindet.
- Danach den Faden nach oben führen und dort über die kleine Rolle legen, dann wieder nach unten über die große Rolle der Flasche und schließlich über die große Rolle.
- Das Gegengewicht mit Feststellschraube und ggf. etwas Plastillina anhängen, um die Gewichtskraft der Flasche auszugleichen.

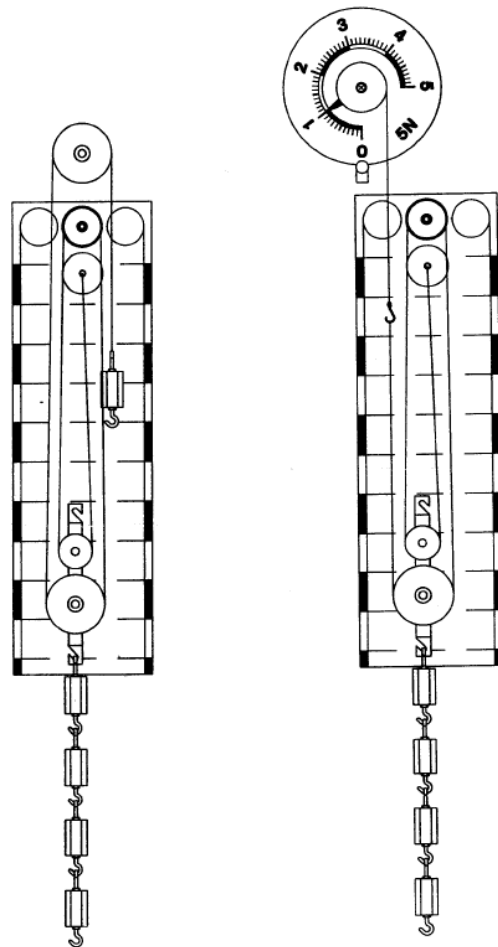


Abb. 18 a

Abb. 18 b

### Experiment

- Einen Hakenkörper in die freie Schlaufe einhängen.
- An die Flasche so viele Hakenkörper anhängen, bis sich der Flaschenzug im Gleichgewicht befindet.

Durch Auf- und Abbewegen der Flasche kann überprüft werden, ob sich der Flaschenzug in jeder Lage im Gleichgewicht befindet.

### Ergebnis

Der Flaschenzug mit insgesamt 4 Rollen befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Kraft an der Flasche 4-mal so groß wie die Kraft am Fadenende ist.

### Hinweis

Anstelle der oberen großen Rolle kann auch ein Federkraftmesser Verwendung finden (Abb. 18b). Er wird etwa an der Stelle der großen Rolle am oberen Ende der Hafttafel angebracht. In diesem Falle wird zunächst die Kraft durch Drehen der Skala kompensiert, die durch das Eigengewicht der Flasche bedingt ist. Beim zusätzlichen Anhängen je eines Hakenkörpers vergrößert sich jeweils die angezeigte Kraft um 0,25 N.

## 19. Kräfte an der schiefen Ebene – Untersuchung mit dem Kraftmesser

### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Schiefe Ebene
- 1 Walze
- 1 Hebel
- 2 Halterungen
- 1 Lot
- 2 Gummimuffen
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die Schiefe Ebene an der vertikalen Hafttafel anbringen und am oberen Teil des Winkelmessers das Lot einhängen.
- Den Winkel zur Horizontalen zunächst auf  $10^\circ$  einstellen.
- Die Walze auf die Ebene setzen, so dass sie sich dicht vor der Tafel befindet.
- Die Walze in die eine Schlaufe des Fadens einhängen und den Faden über die Rolle vertikal nach unten zum Federkraftmesser führen.
- Ausgehend vom linken unteren Ende der Schiefen Ebene den Hebel horizontal an zwei Halterungen in der 5. und 10. Öffnung von links ausgehend mittels Gummimuffen befestigen.

Die Höhe der geneigten Ebene kann so jeweils als senkrechter Abstand des horizontal liegenden Hebels vom rechten unteren Ende der Schiefen Ebene ermittelt werden.

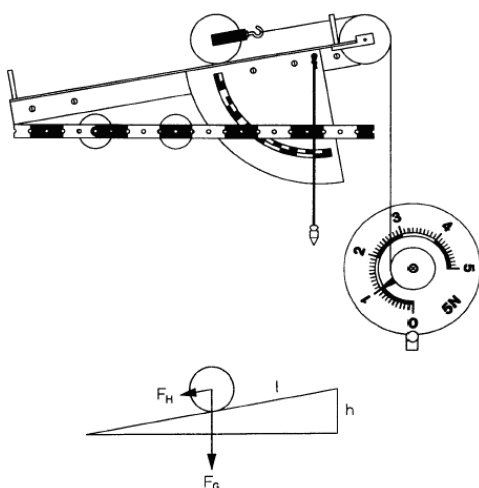


Abb. 19

### Experiment

- Den Winkel zwischen der Schiefen Ebene und der Horizontalen schrittweise von  $10^\circ$  bis auf  $40^\circ$  vergrößern.
- Jeweils die Höhe der geneigten Ebene und die vom Federkraftmesser angezeigte Hangabtriebskraft messen und in die Tabelle eintragen.

### Tabelle

| Höhe<br>$h$ in<br>cm | Länge<br>$l$ in<br>cm | Hangabtriebskraft<br>$F_H$ in N | Gewichtskraft<br>$F_G$ in N | $\frac{h}{l}$ | $\frac{F_H}{F_G}$ |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|-------------------|
|                      |                       |                                 |                             |               |                   |
|                      |                       |                                 |                             |               |                   |
|                      |                       |                                 |                             |               |                   |

### Ergebnis

Je größer die Höhe der Schiefen Ebene ist, umso größer ist auch die Hangabtriebskraft. Zur mathematischen Auswertung werden die Quotienten aus Hangabtriebskraft  $F_H$  und Gewichtskraft  $F_G$  sowie aus Höhe  $h$  und Länge  $l$  der Schiefen Ebene gebildet (letzten beiden Spalten der Tabelle). Der Vergleich der Quotienten zeigt, dass gilt:

$$\frac{F_H}{F_G} = \frac{h}{l}$$

### Hinweise

1. Der von der festen Rolle zum Federkraftmesser gespannte Faden kann auch hinter der Rolle horizontal oder in einem beliebigen anderen Winkel verlaufen. Voraussetzung ist lediglich, dass er in der Nähe der Walze parallel zur Schiefen Ebene liegt. Besonders gut verständlich ist die Anordnung, wenn der Faden von der Walze bis zum Federkraftmesser parallel zur Schiefen Ebene verläuft. Dann muß jedoch bei jeder Veränderung der Neigung der Ebene auch die Lage des Federkraftmessers verändert werden.
2. Das Gleichgewicht an der Schiefen Ebene kann auch dadurch hergestellt werden, dass an das Fadenende anstelle des Federkraftmessers Wägestücke angebracht werden, deren Gewichtskraft gleich der Hangabtriebskraft ist.
3. Sofern die mathematischen Voraussetzungen gegeben sind, kann anstelle von Höhe und Länge auch der Winkel in die Auswertung einbezogen werden

$$F_H = F_G \cdot \sin \alpha.$$

## 20. Kräfte an der schiefen Ebene – Untersuchung mit Hakenkörpern

### Notwendige Komponenten

- 1 Schiefe Ebene
- 1 Walze
- 4 Hakenkörper
- 1 Hebel
- 2 Halterungen
- 1 Lot
- 2 Gummimuffen
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die Schiefe Ebene an der vertikalen Hafttafel anbringen und am oberen Teil des Winkelmessers das Lot einhängen.
- Zunächst die Schiefe Ebene horizontal ausrichten.
- Die Walze auf die Ebene setzen, so dass sie sich dicht vor der Tafel befindet.
- Die Walze in die eine Schlaufe des Fadens einhängen und den Faden über die Rolle vertikal nach unten zum Federkraftmesser führen.
- Dicht unter der Schiefen Ebene den Hebel an 2 Halterungen horizontal von links ausgehend in der 5. und 10. Öffnung befestigen und mit den Gummimuffen gegen Herabgleiten sichern.

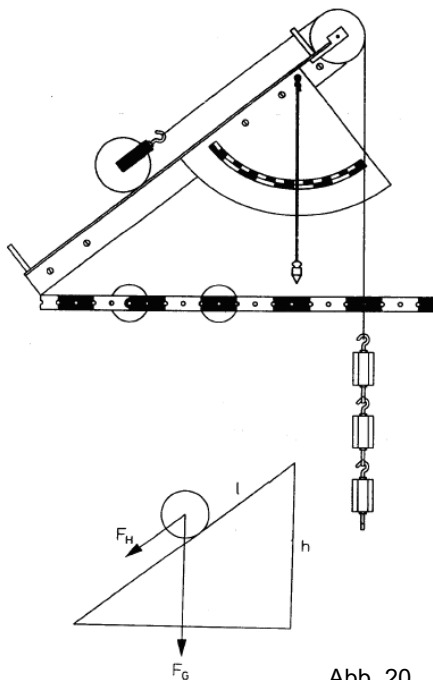


Abb. 20

Die Höhe der Schiefen Ebene kann so jeweils als senkrechter Abstand des horizontal liegenden

Hebels vom rechten unteren Ende der Schiefen Ebene ermittelt werden.

### Experiment

- An die zweite Schlaufe des Hakens einen Hakenkörper hängen.
- Die Walze zunächst festhalten und die Neigung der Ebene so weit vergrößern, dass der Hakenkörper die Hangabtriebskraft der Walze kompensiert.
- Die Höhe der Schiefen Ebene messen und mit der Länge der Ebene, der Gewichtskraft der Walze und der Gewichtskraft des Hakenkörpers in die Tabelle eintragen.
- Nachfolgend zwei Hakenkörper an der Schlaufe befestigen und die Neigung der Ebene so lange weiter vergrößern, bis wieder die Gewichtskraft der Massestücke die Hangabtriebskraft der Walze kompensieren.
- Das Experiment mit 3 und 4 Hakenkörpern wiederholen.

### Tabelle

| Höhe<br>$h$ in<br>cm | Länge<br>$l$ in cm | Hanga-<br>triebs-<br>kraft<br>$F_H$ in N | Ge-<br>wichts-<br>kraft<br>Haken-<br>körper<br>$F_G$ in N | $\frac{h}{l}$ | $\frac{F_H}{F_G}$ |
|----------------------|--------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------|-------------------|
|                      |                    |                                          |                                                           |               |                   |
|                      |                    |                                          |                                                           |               |                   |
|                      |                    |                                          |                                                           |               |                   |

### Ergebnis

Je größer die Höhe der Schiefen Ebene ist, umso größer ist auch die Hangabtriebskraft. Zur mathematischen Auswertung werden die Quotienten aus Hangabtriebskraft  $F_H$  und Gewichtskraft  $F_G$  sowie aus Höhe  $h$  und Länge  $l$  der Schiefen Ebene gebildet (letzten beiden Spalten der Tabelle). Die Quotienten sind gleich:

$$\frac{F_H}{F_G} = \frac{h}{l}$$

### Hinweis

Anstelle der Hakenkörper kann eine sehr leichte und kleine Waagschale Verwendung finden. So können beliebige Winkel der Schiefen Ebene vorgegeben werden. Die Hangabtriebskraft wird dann durch Auflegen von Wägestücken auf die Waagschale ermittelt.

## 21. Gleitreibung – Untersuchung mit dem Kraftmesser

### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Schiefe Ebene
- 1 Aluminiumquader mit 2 Haken
- 6 Hakenkörper
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die Schiefe Ebene horizontal auf der linken Seite der Hafttafel aufbringen.
- Auf das linke Ende der Schiefen Ebene den Aluminiumquader mit 2 Haken aufsetzen, so dass er mit der größten Fläche aufliegt.
- Den Faden mit Schlaufen am Haken befestigen. Den Faden über die feste Rolle führen, so dass er weitestgehend parallel zur Schiefen Ebene verläuft.
- Die zweite Schlaufe in die Messstelle des Federkraftmessers einhaken.

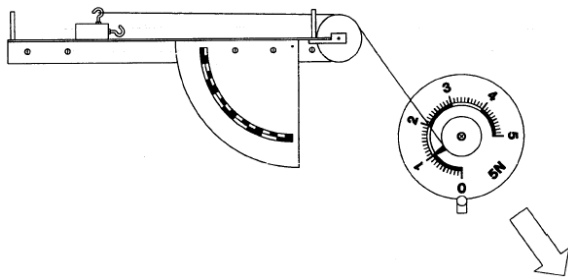


Abb. 21

### Experiment

- Den Federkraftmesser langsam horizontal bzw. schräg nach unten führen, so dass sich der Aluminiumquader gleichförmig bewegt.
- Während der Bewegung die Reibungskraft am Federkraftmesser ablesen.
- Anschließend den Aluminiumquader auf die kleinere Fläche mit der gleichen Oberflächenstruktur legen und das Experiment wiederholen.

Durch Auflegen von Hakenkörpern kann die wirksame Gewichtskraft schrittweise vergrößert werden.

- Danach die Schiefe Ebene mit Streifen aus verschiedenen Stoffen (z.B. Holz, Pappe, Papier, Kunststoff) belegen und die Experimente in gleicher Weise durchführen.

### Ergebnis

Die Gleitreibung ist von der Art der aufeinander reibenden Stoffe abhängig. Sie nimmt proportional zur Gewichtskraft des gleitenden Körpers zu.

Von der Größe der reibenden Fläche ist sie unabhängig.

### Hinweis

Der Gleitreibungskoeffizient lässt sich leicht dadurch ermitteln, daß man den Quotienten aus Gleitreibungskraft und Gewichtskraft des Quaders bildet. Die eine schmale Seite des Quaders ist mit einer Gummischicht belegt. Der Vergleich der Kräfte bei den gleich großen Reibungsflächen mit unterschiedlicher Beschaffenheit zeigt die Abhängigkeit der Reibung von der Art der aufeinander gleitenden Stoffe besonders deutlich.

## 22. Gleitreibung – Untersuchung mit Wägestücken

### Notwendige Komponenten

- 1 Schiefe Ebene
- 1 Aluminiumquader mit 2 Haken
- 2 Hakenkörper
- 1 Lot
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die Schiefe Ebene mit geringer Neigung im oberen Teil der Hafttafel befestigen.
- Am oberen Teil des Winkelmessers das Lot einhängen.
- Auf das linke Ende der Schiefen Ebene den Aluminiumquader mit 2 Haken aufsetzen, so dass er mit der größten Fläche aufliegt.
- In den der Rolle zugewandten Haken die Schlaufe des Fadens einhängen.
- Den Faden möglichst parallel zur Schiefen Ebene über die feste Rolle führen und an seinem anderen Ende mit einem Hakenkörper belasten.

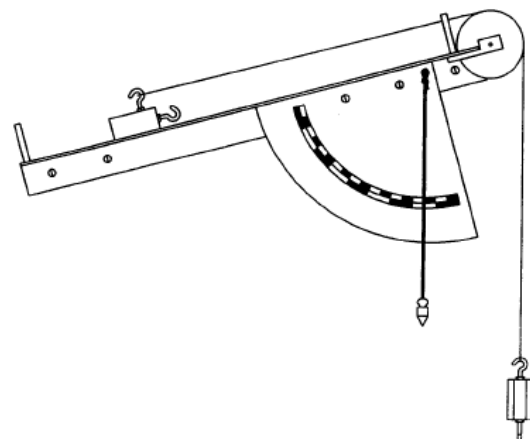


Abb. 22

### Experiment

- Die Neigung der Ebene so weit verringern, dass der Aluminiumquader nach leichtem Anstoßen mit etwa konstanter Geschwindigkeit über die Ebene gleitet.
- Als Maß für die dafür erforderliche Kraft die Neigung der Ebene ermitteln.
- Das Experiment in gleicher Weise wiederholen, nachdem der Aluminiumquader auf eine seiner kleinen Flächen gelegt wurde.
- Schließlich die Kraft, mit der der Aluminiumquader auf die Unterlage drückt, durch schrittweises Auflegen von Hakenkörpern vergrößern.
- Streifen aus verschiedenen Stoffen (z.B. Holz, Pappe, Papier, Kunststoff) auf die Schiefe Ebene auflegen und die Experimente wiederholen.

### Ergebnis

Die Gleitreibung ist umso größer, je größer die Druckkraft ist, mit der der Körper auf die Unterlage wirkt. Sie hängt davon ab, aus welchen Stoffen die Gleitflächen bestehen. Die Gleitreibung ist bei gleicher Gewichtskraft unabhängig von der Größe der gleitenden Fläche.

### Hinweise

1. Die Gleitreibungskraft kann dadurch ermittelt werden, dass man feststellt, wie flach die Ebene geneigt sein muss, damit der Hakenkörper den Aluminiumquader die Ebene hinaufzieht. Man kann sie aber auch dadurch bestimmen, dass man die Ebene immer steiler einstellt und den Winkel ermittelt, bei dem der Aluminiumklotz den Hakenkörper nach oben zieht.
2. Es ist auch möglich, auf den Hakenkörper und den Faden zu verzichten. Man bringt den Aluminiumquader an das obere Ende der Schiefen Ebene und erhöht deren Neigung so lange, bis der Aluminiumklotz nach leichtem Anstoßen mit konstanter Geschwindigkeit die Ebene hinabgleitet.
3. Mit der Neigung der Ebene verändert sich auch die Kraft, mit der der Körper senkrecht auf die Unterlage drückt. Sie ist nur im Falle der horizontalen Ebene gleich der Gewichtskraft. Mit größer werdender Neigung nimmt diese Kraft ab. Bei der Auswertung wird jedoch von einer konstanten Kraft ausgegangen. Deshalb erfolgt mit dem Experiment nur eine Abschätzung der Abhängigkeiten der Reibungskraft.

## **23. Haftreibung**

### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Schiefe Ebene
- 1 Aluminiumquader mit 2 Haken
- 6 Hakenkörper
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen

### Experimenteller Aufbau

- Die Schiefe Ebene horizontal auf der linken Seite im oberen Teil der Haftarbeitsfläche befestigen.
- Auf das linke Ende den Aluminiumquader platzieren. An einem der Haken den Faden befestigen und ihn so über die feste Rolle führen, dass er nahezu parallel zur Schiefen Ebene verläuft.
- Das andere Ende des Fadens an der Messstelle des Kraftmessers anbringen.

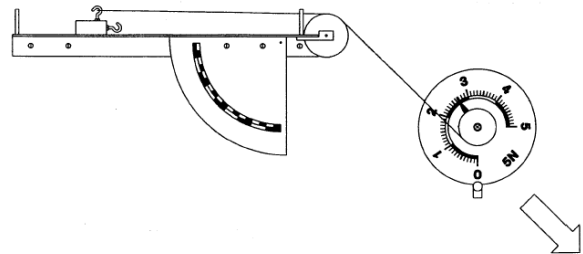


Abb. 23

### Experiment

- Den Federkraftmesser langsam schräg nach rechts unten führen. Dabei die Kraft ermitteln, die erforderlich ist, um den Aluminiumklotz in Bewegung zu versetzen.
- Das Experiment wiederholen, nachdem der Aluminiumklotz auf eine seiner kleinen Flächen gestellt wurde.
- Schließlich die Schiefe Ebene mit Streifen aus verschiedenen Stoffen (z.B. Holz, Metall, Pappe, Kunststoff) belegen und das Experiment wiederholen. Nachfolgend den Aluminiumklotz schrittweise mit Hakenkörpern belasten und jeweils die Kraft für das Inbewegensetzen des Klotzes ermitteln.

### Ergebnis

Die Haftreibung hängt von der Art der aufeinander gleitenden Stoffe ab. Sie nimmt proportional zur Druckkraft zu. Die Haftreibungskraft ist bei gleicher Druckkraft umso größer, je größer die reibende Fläche ist.

In allen Fällen ist die Haftreibungskraft größer als die im Experiment 21 ermittelte Gleitreibungskraft.

### Hinweis

Anstelle des Federkraftmessers kann auch ein Hakenkörper am Fadenende befestigt werden. Aussagen über die Größe der Reibungskraft sind dann durch Neigen der Ebene möglich (vgl. Experiment 21). Es kann jedoch auch auf den Faden verzichtet werden, indem die Neigung der Ebene gerade so groß gewählt wird, dass der Aluminiumquader zu rutschen beginnt. Dabei gilt der Hinweis 3 zu Experiment 22.

## **24. Rollreibung**

### Notwendige Komponenten

- 1 Kraftmesser
- 1 Schiefe Ebene
- 1 Walze
- 1 Aluminiumquader mit 2 Haken
- 3 Hakenkörper
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen, lang

### Experimenteller Aufbau

- Die Schiefe Ebene im oberen linken Teil horizontal an der Hafttafel befestigen.
- Auf das linke Ende der Schiefen Ebene die Walze platzieren und daran das eine Ende des Fadens befestigen.

Den Faden über die feste Rolle führen und am Federkraftmesser befestigen, der sich auf der rechten Seite der Hafttafel unter der Ebene befindet.

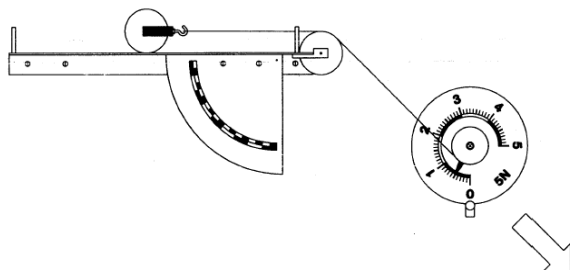


Abb. 24

### Experiment

- Den Federkraftmesser langsam nach rechts unten bewegen. Dabei die Kraft ermitteln, die zur Aufrechterhaltung der Bewegung der Walze erforderlich ist.
- Dann die Walze durch den Aluminiumquader ersetzen, der mit 3 Hakenkörpern belastet wurde. Dadurch entspricht seine Gewichtskraft der der Walze.
- Mit der gleichen Anordnung die Kraft ermitteln, die zur Aufrechterhaltung einer gleichförmigen Bewegung des Quaders erforderlich ist.

### Ergebnis

Gegenüber der Gleitreibung und der Haftreibung ist die Rollreibung wesentlich kleiner.

## **25. Periodendauer eines Fadenpendels**

### Notwendige Komponenten

- 3 Hakenkörper
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Messingbügel
- 1 Haftskala
- 1 Nylonfaden mit Schlaufen, lang
- 1 Stoppuhr

### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel befestigen.
- Auf dem mittleren Kreis am oberen Ende der Skala die Halterung aufsetzen und deren vorderes Ende mit einer Gummimuffe versehen.
- Den Messingbügel über die Halterung legen.
- Über jedes der Enden eine der Schlaufen der Faden hängen und einen Hakenkörper daran befestigen.

Die jeweilige Länge kann auf der Skala direkt abgelesen werden. Das wirksame obere Ende des Pendels befindet sich in der Mitte des Messingbügels am Skalenanfang, das untere Ende in der Mitte des Wägestücks.

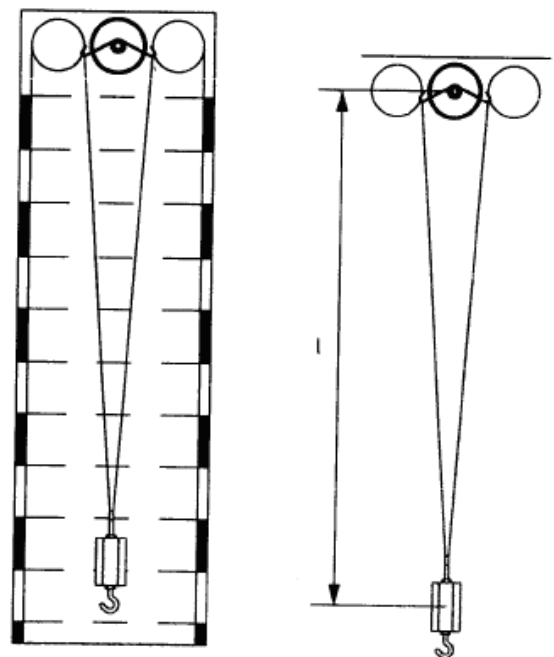


Abb. 25

### Experiment 1

#### Zusammenhang zwischen Periodendauer und Masse des Fadenpendels

- Das Massestück seitlich etwa bis zum Rand der Skala auslenken und loslassen.
- Mit der Stoppuhr die Zeit für 10 Perioden ermitteln und in die Tabelle eintragen.
- Anstelle des einen Hakenkörpers danach zwei und schließlich drei Hakenkörper nebeneinander an dem Faden befestigen.
- Für jeden Falle die Periodendauer für 10 Schwingungen ermitteln.
- Die Untersuchungen mit einer zweiten Pendellänge (Faden anderer Länge) wiederholen.

Tabelle

| Länge $l$ in cm | Masse $m$ in g | Zeit für 10 Perioden $t$ in s | Periodendauer $T$ in s |
|-----------------|----------------|-------------------------------|------------------------|
|                 |                |                               |                        |
|                 |                |                               |                        |
|                 |                |                               |                        |

#### Ergebnis

Die Periodendauer eines Fadenpendels ist unabhängig von der Masse.

### Experiment 2

#### Zusammenhang zwischen Periodendauer und Pendellänge

Als Pendelmasse findet ein Hakenkörper Verwendung. Die Pendellänge soll bei etwa 50 cm liegen.

- Den Hakenkörper bis zum Rand der Skala auslenken und loslassen. Die Zeit für 10 Perioden bestimmen und diese in die Tabelle eintragen.
- Die Pendellänge auf 40 cm verringern. Dazu den Faden mit einer leicht wieder lösbaren Schlaufe auf der einen Seite des Messingbügels befestigen.
- Die Zeit für 10 Perioden bestimmen und diese in die Tabelle eintragen.
- Nachfolgend die Pendellänge schrittweise weiter verringern.
- Aus der Zeit für 10 Schwingungen die Periodendauer ermitteln.
- Schließlich das Quadrat der Periodendauer berechnen und in die letzte Spalte eintragen.

Tabelle

| Länge $l$ in cm | Zeit für 10 Perioden $t$ in s | Periodendauer $T$ in s | Quadrat der Periodendauer $T^2$ in s <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|
|                 |                               |                        |                                                   |
|                 |                               |                        |                                                   |
|                 |                               |                        |                                                   |
|                 |                               |                        |                                                   |
|                 |                               |                        |                                                   |
|                 |                               |                        |                                                   |

#### Ergebnis

Je größer die Länge des Fadenpendels ist, umso größer ist auch die Periodendauer. Es gilt:

$$T^2 \sim l$$

#### Hinweise

1. Im ersten Experiment verschiebt sich durch das Nebeneinanderhängen zweier oder mehrerer Hakenkörper der Schwerpunkt leicht nach oben. Damit die Pendellänge von Experiment zu Experiment unverändert bleibt; muss ggf. ein kleines Drahtstück (z.B. von einer Briefklammer) zwischen Faden und Pendelkörper gebracht werden.

2. Das zweite Experiment kann auch zur Bestätigung der Gleichung für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels Einsatz finden:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Durch Einsetzen der jeweils eingestellten Pendellänge  $l$  und der Fallbeschleunigung  $g$  wird die Periodendauer ermittelt. Sie stimmt für jedes Teilerperiment mit der gemessenen Periodendauer überein.

### **26. Periodendauer eines vertikalen Feder-schwingers**

#### Notwendige Komponenten

- 3 Hakenkörper
- 3 Schraubenfedern
- 1 Halterung
- 1 Gummimuffe
- 1 Haftskala
- 1 Stoppuhr

#### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel befestigen und eine Halterung an ihrem oberen Ende anbringen.
- Die Feder einhängen und mit einer Gummimuffe sichern.

- An das untere Ende der Feder einen Hakenkörper einhängen.

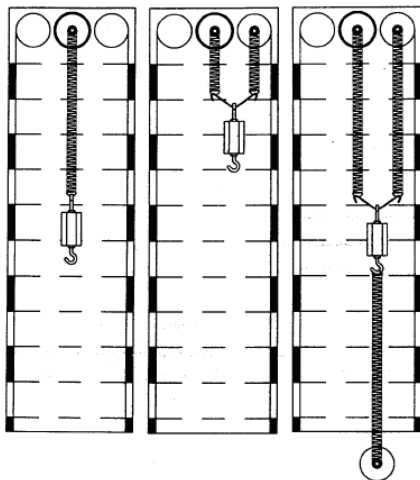


Abb. 26 a

Abb. 26 b

### Experiment 1

#### Zusammenhang zwischen Periodendauer und Masse des Federschwingers

- Den Hakenkörper vertikal etwa 5 Zentimeter auslenken und loslassen.
- Mit der Stoppuhr die Zeit für 10 Perioden bestimmen und diese in die Tabelle eintragen.
- Anstelle des einen Hakenkörpers danach 2 und 3 Hakenkörper untereinander an der Schraubenfeder befestigen.
- In jedem Falle die Periodendauer für 10 Schwingungen ermitteln und in die Tabelle eintragen.
- Das Quadrat der Periodendauer als Funktion der Masse graphisch darstellen.

Tabelle

| Masse<br>$m$ in g | Zeit für 10<br>Perioden $t$<br>in s | Perioden-<br>dauer<br>$T$ in s | Quadrat der<br>Perioden-<br>dauer $T^2$ in $s^2$ |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|
|                   |                                     |                                |                                                  |
|                   |                                     |                                |                                                  |
|                   |                                     |                                |                                                  |

### Ergebnis

Die Periodendauer eines Federschwingers nimmt mit der Masse zu. Es gilt:

$$T^2 \sim m$$

### Experiment 2

#### Zusammenhang zwischen Periodendauer und Federkonstante

- An die Halterung zunächst eine Feder hängen und die Lage ihres unteren Endes ermitteln.
- Dann einen Hakenkörper an die Feder hängen und deren Verlängerung bestimmen.
- Nachfolgend 2 Federn untereinander an die Halterung hängen und wiederum deren Verlängerung beim Anhängen eines Hakenkörpers ermitteln.
- Das Experiment mit 3 Federn wiederholen.
- Für alle drei Fälle den Quotienten aus der Verlängerung und der wirkenden Kraft bilden und in die Tabelle eintragen.
- Im Falle einer Feder mit Hakenkörper erfolgt eine vertikale Auslenkung von etwa 5 cm, dann den Hakenkörper loslassen und die Zeit für 10 Perioden ermitteln.
- Das Experiment für die beiden anderen Anordnungen (2 Federn und 3 Federn) wiederholen.
- Die Zeiten in die Tabelle eintragen.
- Das Quadrat der Periodendauer über den Quotienten aus Längenänderung und Kraft graphisch darstellen.

Tabelle

| Anzahl der Federn | Kraft<br>$F$ in N | Federkonstante<br>$k$ in N/cm | Zeit für 10 Perioden<br>$t$ in s | Periodendauer<br>$T$ in s | Längenänderung<br>$l$ in cm |
|-------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1                 | 100               |                               |                                  |                           |                             |
| 2                 | 100               |                               |                                  |                           |                             |
| 3                 | 100               |                               |                                  |                           |                             |

### Ergebnis

Der Quotient aus Kraft und Verlängerung einer Feder kennzeichnet ihre Festigkeit (Federkonstante  $k = F/l$ ). Je größer die Federkonstante ist, umso geringer ist die Periodendauer.

Es gilt:

$$T^2 \sim \frac{l}{k}$$

### Hinweise

1. Bei einer genauen Ermittlung der Proportionalität zwischen  $T^2$  und  $l/k$  sind die Gewichtskräfte der angehängten Federn und die damit verbundenen Längenänderungen zu beachten!

2. Im Experiment 2 können auch mehrere Federn nebeneinander angeordnet werden. Dadurch verringert sich die Federkonstante. Das Nebeneinanderbefestigen zweier Federn ist leicht dadurch möglich, daß man zwei Halterungen nebeneinander anbringt, an der je eine Feder befestigt wird. Das untere Ende beider Federn verbindet man mit einem Messingbügel, an dem die Hakenkörper befestigt werden (siehe Abb. 26a).

3. Die beiden Experimente können auch zur Bestätigung der Gleichung für die Periodendauer eines Federschwingers Einsatz finden

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

In diesem Falle werden Masse  $m$  und Federkonstante  $k$  in die Gleichung eingesetzt und daraus die Periodendauer berechnet. Sie stimmt für jedes Telexperiment mit der gemessenen Periodendauer überein.

4. Die Federkonstante kann auch dadurch verändert werden, dass an den unteren Haken des Hakenkörpers noch eine weitere Schraubenfeder gehängt wird, deren unteres Ende an einer zusätzlichen Halterung angebracht ist (siehe Abb. 26b).

## 27. Resonanz zweier Federschwinger

### Notwendige Komponenten

- 4 Hakenkörper
- 1 Hebel
- 2 Schraubenfedern
- 2 Halterungen
- 2 Gummimuffen
- 1 Haftskala
- 2 Messinghaken

### Experimenteller Aufbau

- Die Haftskala vertikal an der Hafttafel befestigen und in der Höhe ihres oberen Endes rechts und links eine Halterung anbringen.
- Die Halterungen mit je einer Gummimuffe sichern und den Hebel flach darauflegen. Der Abstand der Halterungen so wählen, dass fast die gesamte Länge des Hebels genutzt werden kann.
- In der Mitte des Hebels im Abstand von 2 Öffnungen mit Hilfe der Messinghaken die beiden Schraubenfedern befestigen und an jede 2 Hakenkörper hängen.

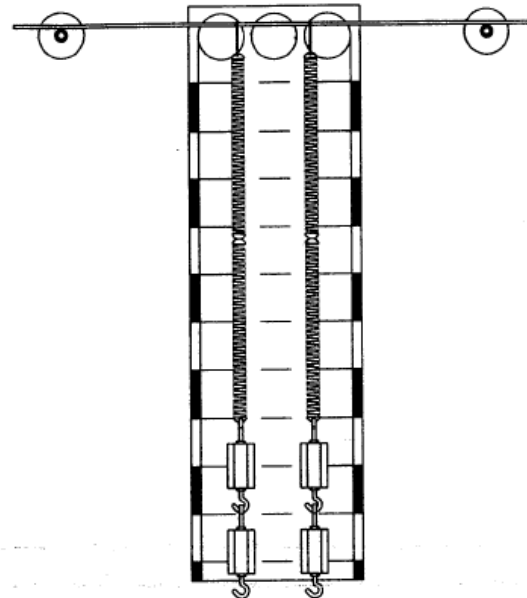


Abb. 27

### Experiment

- Das untere Ende einer der beiden Federn etwa 5 Zentimeter vertikal nach unten auslenken und loslassen.

Beim Schwingen überträgt es seine Energie allmählich auf den zweiten Schwinger, der mit immer größerer Amplitude zu schwingen beginnt. Schließlich ruht der erste Schwinger. Nachfolgend wird die Energie auf den ersten Schwinger zurückübertragen.

### Ergebnis

Bei gekoppelten Schwingern gleicher Eigenfrequenz erfolgt eine wiederholte vollständige Energieübertragung von einem Schwinger auf den anderen.