

Barbara Raschke

# **Physikalische Freihandexperimente zur Mechanik**

## **Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades einer  
Magistra  
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Karl-Franzens-Universität Graz

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Pottlacher  
Technische Universität Graz  
Institut für Experimentalphysik

2006

## Vorwort

Im Rahmen meiner Ausbildung im Unterrichtsfach Physik besuchte ich bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Pottlacher an der Technischen Universität Graz die Lehrveranstaltung „Schulversuche 1“. In diesem Seminar stellte jeder Student/jede Studentin vier Freihandexperimente zu verschiedenen Bereichen vor. Die schriftlichen Aufzeichnungen der StudentInnen wurden über viele Jahre gesammelt. Herr Prof. Pottlacher hatte die gute Idee, das vorhandene Material in Form von Diplomarbeiten auszubauen.

Während meine Kollegin Anke Gradwohl an Ihrer Diplomarbeit zum Thema „Freihandexperimente zur Mechanik“ arbeitete, stellte sich heraus, dass dieses Gebiet sehr umfangreich ist. Nach einer Absprache mit Herrn Prof. Pottlacher kamen wir zum Ergebnis, dass wir den Bereich Mechanik in „Freihandexperimente zur Punktmechanik“ und in „Freihandexperimente zur Mechanik des starren Körpers“ teilen, wobei mir letzteres Kapitel zufiel.

Danach wurden folgende Ziele für die Diplomarbeit definiert:

- Aus dem bestehenden Material sollen 50 Versuche ausgewählt werden.
- Diese Versuche sind verständlich zu beschreiben und mit Bildmaterial zu veranschaulichen.
- Jedes Experiment soll auf einem Videofilm dokumentiert werden.

Ich ging bei meiner Diplomarbeit nach dem Skriptum zu Experimentalphysik 1 von Herrn Prof. Dr. H. Jäger vor, weil es sehr gut strukturiert ist.

Die Unterlagen für meine Experimente stammen hauptsächlich von Arbeiten von StudentInnen, aus denen keine Zitate hervorgehen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass Unterlagen aus bereits vorhandener Literatur verwendet wurden.

Ich habe mich bemüht, jeden Versuch so zu beschreiben, dass ihn auch ein Laie versteht und ihn ausführen kann. Zwei Jugendliche, ein 16-jähriger HTL-Schüler und eine junge Theologie-Studentin, führten die Experimente nach einer ausführlichen Erklärung durch und wurden dabei von mir gefilmt. Dieses Filmmaterial befindet sich im Anhang der Diplomarbeit.

In meinem Physikunterricht wurden leider sehr wenige Experimente durchgeführt. Durch meine Arbeit habe ich gelernt, dass man physikalische Sachverhalte auch anschaulich mittels Freihandexperimenten vermitteln kann. Durch sie werden SchülerInnen vielleicht motiviert, in Eigenregie zu experimentieren und die physikalischen Hintergründe ihren Familienmitgliedern oder Freunden näher zu bringen.

Diese Sammlung wird mir in meinem zukünftigen Beruf als Lehrer sicher von Vorteil sein.

# Inhaltsverzeichnis

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. Fachdidaktisches .....</b>  | <b>1</b> |
| <b>1.1 Was ist ein Freihandversuch?.....</b>                                  | <b>1</b> |
| <b>1.2 Fachdidaktische Bedeutung des Freihandversuchs.....</b>                | <b>3</b> |
| <b>1.3 Forderungen des Lehrplans.....</b>                                     | <b>5</b> |
| 1.3.1 <i>Forderungen des Lehrplans an der AHS-Unterstufe.....</i>             | <i>5</i> |
| 1.3.2 <i>Forderungen des Lehrplans an der AHS-Oberstufe .....</i>             | <i>6</i> |
| <b>2. Mechanik des starren Körpers .....</b>                                  | <b>7</b> |
| <b>2.1 Kräfte am starren Körper, in verschiedenen Punkten angreifend.....</b> | <b>7</b> |
| 2.1.1 Grundsätzliches .....   | 7        |
| 2.1.2 Das Drehmoment .....  | 7        |
| Die folgsame Garnrolle .....  | 8        |
| Die kletternde Walze .....  | 10       |
| Der Drehmomentschlüssel.....  | 12       |
| 2.1.3 Der Hebel .....   | 14       |
| Ein Lineal als Hebel .....  | 14       |
| Flaschen öffnen.....  | 15       |
| 2.1.4 Massenmittelpunkt (Schwerpunkt).....                                    | 16       |
| Schwerpunktbestimmung eines Dreiecks .....                                    | 16       |
| Schwerpunkt eines Besens.....   | 17       |
| Welche ist die volle Flasche?.....  | 19       |
| Schwerpunktbestimmung einer Kartoffel.....                                    | 20       |
| Schwerlinie bei einem Joghurtbecher.....                                      | 21       |
| Der asymmetrische Klotz .....   | 22       |
| Dominobrücke.....   | 23       |
| Standfestigkeit zwei gleich großer Quader.....                                | 24       |
| 2.1.5 Verlagerung des Schwerpunktes.....                                      | 25       |
| Die unwillige Zitrone .....   | 25       |
| Die verhexte Schachtel .....  | 26       |
| Die Kerzenschaukel.....   | 27       |
| Die bergauf rollende Dose .....   | 28       |
| 2.1.6 Schwerpunkt des menschlichen Körpers.....                               | 29       |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2.1.7 Gleichgewicht.....</b>                                   | <b>31</b> |
| Gleichgewichtslagen einer Kugel.....                              | 32        |
| Gleichgewichtslagen einer Zündholzschachtel.....                  | 33        |
| Das Stehaufmännchen.....  | 35        |
| Hochseilartist.....   | 36        |
| Gleichgewicht hängender Körper.....                               | 37        |
| Ein Balancierkunststück.....                                      | 40        |
| Das Tellerkarussell.....  | 41        |
| <b>2.2 Drehbewegungen starrer Körper um eine feste Achse.....</b> | <b>42</b> |
| <b>2.2.1 Der Drehwinkel.....</b>                                  | <b>42</b> |
| <b>2.2.2 Die Winkelgeschwindigkeit.....</b>                       | <b>42</b> |
| <b>2.2.3 Die Winkelbeschleunigung.....</b>                        | <b>42</b> |
| <b>2.2.4 Das Trägheitsmoment.....</b>                             | <b>42</b> |
| Das Dosenrennen.....  | 44        |
| Drehtischpirouette.....   | 46        |
| <b>2.2.5 Dynamische Grundgleichung der Drehbewegung.....</b>      | <b>50</b> |
| Beschleunigte Bewegung bei der Rotation.....                      | 51        |
| Trägheitsmoment von Trinkhalmen.....                              | 53        |
| Welcher Stab fällt schneller um?.....                             | 54        |
| <b>2.2.6 Hauptträgheitsmomente.....</b>                           | <b>56</b> |
| Hauptträgheitsachsen einer Schachtel.....                         | 56        |
| <b>2.2.7 Der Drehimpuls.....</b>                                  | <b>58</b> |
| Die kreisende Kugel.....  | 60        |
| Knopfpirouette.....   | 61        |
| Rad auf einem Drehtisch.....                                      | 62        |
| Die rotierende Bohrmaschine.....                                  | 65        |
| „Wedeln“.....   | 66        |
| Der Wackelstein.....  | 67        |
| <b>2.2.8 Analogien Translation und Rotation.....</b>              | <b>69</b> |
| <b>2.3 Drehbewegungen um freie Achsen.....</b>                    | <b>69</b> |
| Nachweis von freien Achsen an verschiedenen Körpern.....          | 70        |
| Frisbee.....  | 72        |
| <b>Bibliographie.....</b>   | <b>73</b> |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                  | <b>73</b> |
| <b>Ein herzliches Danke ...</b>                                   | <b>74</b> |

# 1. Fachdidaktisches

Im Alltag werden viele komplexe Maschinen, wie Fernseher oder MP3-Player, verwendet, ohne dass man sich wirklich Gedanken darüber macht, wie diese Geräte aufgebaut sind und welche Funktionsweise dahinter steckt. Das lässt sich natürlich auch auf die Komplexität und Undurchschaubarkeit des technischen Aufbaus zurückführen. Es ist aber möglich, mit Hilfe einfacher Experimente grundlegende physikalische Sachverhalte darzustellen und dadurch die Physik interessanter und vor allem verständlich zu erklären.

## 1.1 Was ist ein Freihandversuch?

Bereits Albert Einstein hat in einem Freihandversuch das Verhalten eines Teeblattes in einer Teeschale beobachtet. Trotzdem ist der Begriff des Freihandversuchs relativ neu.

Erst als einfache physikalische Sachverhalte mittels komplizierter Apparaturen entsprechend dem Fortschritt demonstriert wurden, erlangten auch Freihandversuche einen eigenen Stellenwert.

H. HAHN [1] war einer der Ersten, die den Freihandversuch öffentlich erwähnten. 1905 stellte er sein Buch „Physikalische Freihandversuche“ vor und definiert den Freihandversuch darin folgendermaßen:

*Bei der Lösung meiner Aufgabe war es notwendig, die Freihandversuche gegen die eigentlichen Schülerversuche, die Schülerübungen und die Spiele abzugrenzen. Aufgenommen wurden neben den Versuchen mit den Gegenständen des täglichen Gebrauchs auch Versuche mit einfachen Vorrichtungen, die jeder Lehrer selbst herstellen kann, wenn er die Werkzeuge besitzt, die ein gut ausgestatteter Nagelkasten, wie er in jedem Haushalt vorhanden ist, zu enthalten pflegt.*

Eine etwas modernere Definition stammt von W. HEYDER [2]:

*Der Freihandversuch ist ein Schul- oder Hausversuch, der im Wesentlichen qualitativer Natur ist und durch die Einfachheit der experimentellen Mittel innerhalb und außerhalb des Unterrichtsprozesses leicht ausführbar und jederzeit einsatzfähig ist. Zu seiner Durchführung werden Gegenstände des täglichen Bedarfs und Geräte aus dem Haushalt verwendet. Daneben können auch Lehrmittel einfachster Art eingesetzt werden.*

Die Definition von B. KORN [3] geht von der schulischen Sicht aus:

*Der Freihandversuch ist ein weitgehend qualitatives physikalisches Lehrer-, Schüler-, oder Hausexperiment, das im Wesentlichen mit Gegenständen des täglichen Bedarfs und mit einfachen Lehrmitteln jederzeit eingesetzt werden kann.*

Im Allgemeinen haben Freihandversuche folgende Eigenschaften:

Es werden Gegenstände aus dem täglichen Leben verwendet, der Aufbau besteht nur aus wenigen Teilen und nimmt sehr wenig Zeit in Anspruch. Durch den Versuch kann man quantitative Aussagen physikalischer Gesetze machen.

Es gibt drei verschiedene Arten von Freihandversuchen, die man unterscheidet:

- Klassische Freihandexperimente: Diese Experimente werden nur mit Gegenständen des täglichen Gebrauchs durchgeführt.
- Sekunden-Experimente: Die Vorbereitungszeit für diese Experimente ist sehr gering. Meistens benötigt man teure Geräte, mit denen man aber tolle Experimente durchführen kann.
- Low-Cost-Experimente: Hier verwendet man nur Gegenstände, die man wirklich zur Verfügung hat und die man nicht extra besorgen muss.

## 1.2 Fachdidaktische Bedeutung des Freihandversuchs

Es gibt drei Fragen, die sich jeder Lehrer bei der Gestaltung seines Unterrichts stellen sollte:

- **Warum** Freihandversuche?
- **Wann** setze ich Freihandversuche ein?
- **Welche** Freihandversuche bieten sich an?

Freihandversuche können eine Abwechslung zum alltäglichen Unterricht sein. Es ist aber nicht sinnvoll, ständig Freihandversuche durchzuführen, da diese mit der Zeit uninteressant werden können und die Schüler langweilen.

Besonders geeignet sind Freihandversuche für die Schüler, da man hauptsächlich Materialien benötigt, die jeder zu Hause hat. Schüler werden somit motiviert, sich selbstständig mit der Physik, die hinter einem Experiment steht, zu beschäftigen.

Jedem Lehrer bleibt es jedoch selbst überlassen zu entscheiden, wo er Freihandversuche gezielt einsetzt.

Möglichkeiten zum Einsatz wären:

- Der Versuch als Einstieg

Der Versuch findet als Einführung in ein neues Thema statt, um die Schüler neugierig zu machen. Der zu vermittelnde physikalische Inhalt sollte jedoch klar ersichtlich sein.

- Versuch zur Bestätigung des Erlernten

Ist ein Thema bereits erarbeitet worden, kann ein Versuch zu tieferem Verständnis führen. Unvorhersehbare Ausgänge, die sich oft nicht vermeiden lassen, müssen danach aber sorgfältig mit den Schülern diskutiert werden. Der Lehrer kann damit die Verbindung zwischen Theorie und Experiment herstellen.

- Schülerexperiment

Da Freihandexperimente leicht durchführbar sind, können Schüler sie selbst ohne Probleme erarbeiten und vorstellen. Diese Experimente bieten sich vor allem für den

Projektunterricht an, wo Schüler einzeln oder in Teams die physikalischen Aussagen des Experiments darstellen können.

- Referat

Oft werden Themen wegen Zeitmangels kaum behandelt und werden in Form von Referaten vorgestellt. Dabei bietet sich als Abwechslung auch der Freihandversuch an. Das Ausarbeiten und Vorstellen von Experimenten zu bestimmten Themen führt zu besserem Verständnis und bleibt länger in Erinnerung.

- Prüfung

Bei Prüfungen müssen oft Experimente beschrieben werden, die nur einmal durchgeführt wurden. Deshalb ist es schwierig, diese Experimente zu rekonstruieren. Freihandexperimente bleiben länger in Erinnerung, weil man sich selbst intensiv damit beschäftigt. Experimente sind eine abwechslungsreiche Alternative zu herkömmlichen Prüfungen.

Der Lehrer sollte aber auf die qualitative Aussage eines Experimentes achten, denn nicht jedes ist für den Unterricht und das Verständnis geeignet. Er sollte sich Gedanken darüber machen, welchen Zweck das Experiment erfüllt und wann es sinnvoll ist, ein Freihandexperiment einzusetzen.

## 1.3 Forderungen des Lehrplans

### 1.3.1 Forderungen des Lehrplans an der AHS-Unterstufe

- Bildungs- und Lehraufgaben:

Der Unterricht hat das Ziel, den Schülerinnen und Schülern das Modelldenken der Physik (Realwelt - Modell - Modelleigenschaften - Realwelt) zu vermitteln und physikalisches Wissen in größere Zusammenhänge zu stellen.

Dies geschieht durch:

- bewusstes Beobachten physikalischer Vorgänge
- Verstehen und altersgemäßes Anwenden von typischen Denk- und Arbeitsweisen der Physik
- Erkennen von Gültigkeitsgrenzen physikalischer Gesetzmäßigkeiten in alltagsbezogenen Situationen
- eigenständige und handlungsorientierte Auseinandersetzung mit Problemen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler, nach Möglichkeit ausgehend von Schülerexperimenten
- Entwicklung von Erklärungsversuchen beziehungsweise Modellvorstellungen und deren Anwendung bei physikalischen Vorgängen in Natur und Technik.

- Kreativität und Gestaltung:

Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten; Einfluss der Physik auf Ästhetik, Funktion und Design.

- Didaktische Grundsätze:

Ausgehend von konkreten Beobachtungen bzw. Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler sind unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten jeweils die zu Grunde liegenden physikalischen Inhalte zu erarbeiten.

Bei der Gewinnung von Gesetzen ist neben der Verallgemeinerung von Beobachtungen auf Grund von Experimenten gelegentlich auch die gedankliche Herleitung und anschließende experimentelle Überprüfung von Lösungsansätzen (Hypothesen) anzuwenden<sup>1</sup>.

### **1.3.2 Forderungen des Lehrplans an der AHS-Oberstufe**

▪ Bildungs- und Lehraufgaben:

- ... insbesondere der Befähigung zum selbstständigen Wissenserwerb, dem verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt ...
- Weiters sollen sie die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag und in der Umwelt und für die Welterkenntnis erfassen und für ihre Lebensgestaltung nutzen.

Ziel des Physikunterrichts ist daher die Vermittlung des nötigen Rüstzeugs zum verstehenden Erleben von Vorgängen in Natur und Technik und keinesfalls nur das Informieren über sämtliche Teilgebiete der Physik.

Das Ziel ist der Erwerb folgender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Werthaltungen:

- eigenständig arbeiten können
- physikalische Zusammenhänge darstellen können
- einfache Experimente planen und durchführen können
- Gefahren erkennen, einschätzen und sicherheitsbewusst handeln können<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Quelle: <http://oepu-noe.at/recht/lp/us/pflicht/physik.htm>

<sup>2</sup> Quelle: <http://www.oepu-noe.at/recht/lp/os/pflicht/physik.htm>

## 2. Mechanik des starren Körpers

Ein starrer Körper ist ein System von Massenpunkten, die einen festen Abstand zueinander haben. Er ist eine Idealisierung in der Physik, um Bewegungsabläufe in der Mechanik mit einfachen Gleichungen beschreiben zu können.

### 2.1 Kräfte am starren Körper, in verschiedenen Punkten angreifend

#### 2.1.1 Grundsätzliches

Bei der Punktmechanik geht man davon aus, dass Kräfte nur in einem Punkt angreifen, was Translationsbewegungen auslöst. Dieser Punkt ist beim starren Körper der Massenmittelpunkt.

Greifen Kräfte jedoch an verschiedenen Punkten des Körpers an, so führt er eine Rotation mit oder ohne Translation aus.

Man kann alle angreifenden Kräfte mittels vektorieller Zusammensetzung auf eine einzige Kraft oder ein Kräftepaar reduzieren. Der starre Körper kann als Resultat Translation und/oder Rotation ausführen.

#### 2.1.2 Das Drehmoment

Wirkt auf einen Körper, der in einem Punkt festgehalten wird, eine Kraft, so erfährt er eine Drehung um diesen Punkt. Die Größe, die diese Drehbewegung beeinflusst, nennt man Drehmoment  $T$ . Den Punkt, in dem der Körper festgehalten wird, nennt man Momentenpunkt.

Die primäre Definition des Drehmoments ist

$$T = F \cdot l \text{ (Kraft mal Hebelarm).} \quad (1)$$

Der Hebelarm  $l$  ist dabei der kürzeste Abstand (Normalabstand) zwischen der Angriffslinie der Kraft  $F$  und dem Momentenpunkt.

Diese Definition wird durch das Hebelgesetz von Archimedes veranschaulicht, das für das Gleichgewicht zweier Drehmomente lautet

$$\text{„Kraft x Kraftarm} = \text{Last x Lastarm“} \quad (2)$$

Die vektorielle Definition des Drehmomentes ist

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (3)$$

|           |        |   |
|-----------|--------|---|
| $\vec{T}$ | $[Nm]$ | Drehmoment  |
| $\vec{r}$ | $[m]$  | Vektor zwischen Momentenpunkt und Angriffspunkt von $\vec{F}$ |
| $\vec{F}$ | $[N]$  | Kraft   |

### Die folgsame Garnrolle

#### Material

- Garnrolle

#### Aufbau und Durchführung

Es ist wichtig zu Beginn dafür zu sorgen, dass das Garn regelmäßig in der Mitte der Rolle aufgerollt ist.

Nun legt man die Garnrolle auf einen ebenen Untergrund, rollt etwa 50 cm vom Garn ab und zieht einmal parallel und einmal vertikal zum Untergrund am Faden.

#### Beobachtung

Wenn man am Faden parallel zum Untergrund zieht, beobachtet man, dass die Garnrolle sich zur Hand hin bewegt. Zieht man jedoch vertikal nach oben, so rollt sie von der Hand weg.



Abb. 1 Am Faden wird parallel zum Untergrund gezogen

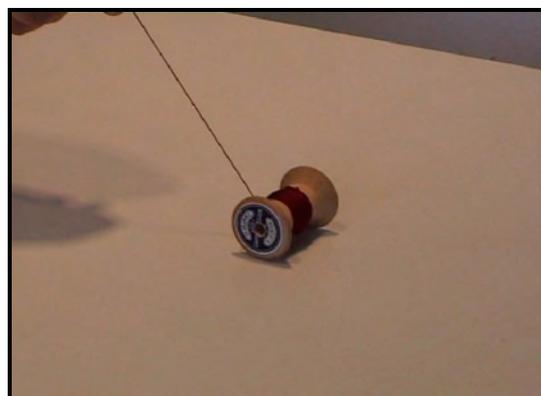


Abb. 2 Der Faden wird vertikal nach oben gezogen

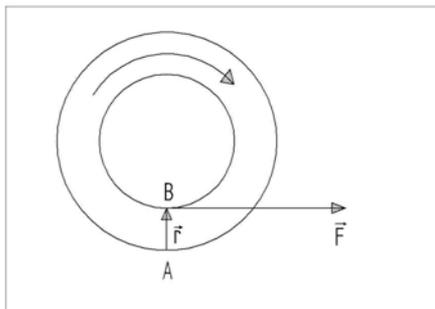
#### Physikalischer Hintergrund

Die Kraft, die am Schwerpunkt angreift, bewirkt nach (3) ein Drehmoment.  $\vec{F}$  ist hier die Zugkraft und  $\vec{r}$  ist der Vektor vom Auflagepunkt (A) zum Angriffspunkt (B) der Kraft.

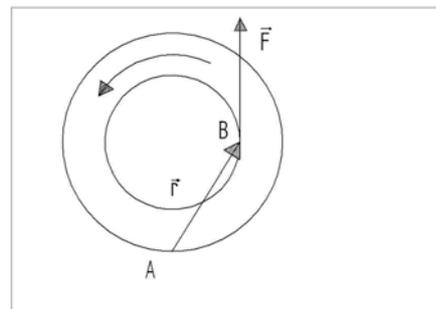
Die Drehbewegung ergibt sich dann aus der Richtung des Kreuzproduktes  $\vec{r} \times \vec{F}$  und der Rechtsschraubenregel für das Drehmoment.

Die Abbildung 3 zeigt den Fall, wo man parallel zum Untergrund an dem Garn zieht. Der Vektor des Drehmoments steht normal auf  $\vec{r}$  und  $\vec{F}$  und schaut in die Zeichenebene, was bedeutet, dass sich die Garnrolle nach rechts dreht.

Im zweiten Fall (Abb. 4) dreht sich die Rolle nach links, weil der Drehmomentvektor aus der Zeichenebene herausgerichtet ist.



**Abb. 3** Die Garnrolle bewegt sich zur Hand hin



**Abb. 4** Die Garnrolle entfernt sich von der Hand

## Die kletternde Walze

### Material

- dickeres steifes Papier, möglichst großer Bogen wie z. B. Zeichenpapier oder alte große Kalenderseite
- Faden
- Klebstoff, Klebeband

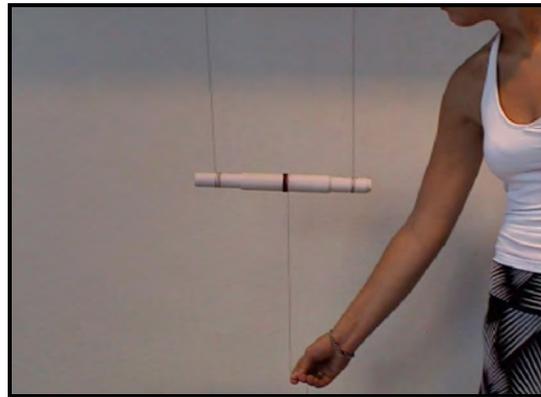


Abb. 5 Die kletternde Walze

### Aufbau und Durchführung

Zuerst wird die Walze hergestellt, indem man den Bogen Papier in einen Streifen mit den Maßen 15 cm mal 90 cm schneidet. Dieser Papierstreifen wird nun mit 2 cm Durchmesser aufgerollt. Am besten, man gibt auf den ganzen Streifen Klebstoff, damit die Rolle auch hält. Aus dem restlichen Papier fertigt man einen Streifen mit den Maßen 5 cm mal 150 cm und rollt diesen Streifen zentriert auf die schon hergestellte Rolle auf (Klebstoff nicht vergessen!).

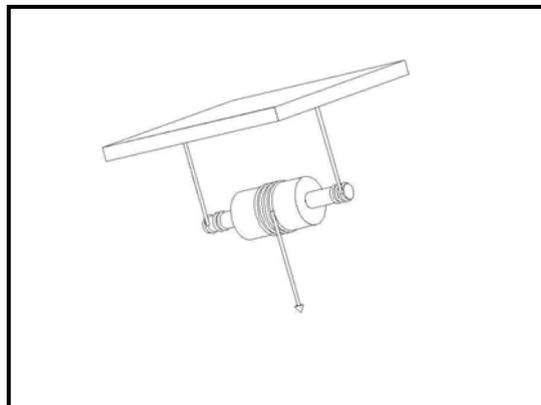


Abb. 6 Versuchsaufbau

An den dünnen Enden der Walze werden nun zwei Fäden so befestigt, dass sie in dieselbe Richtung aufgerollt werden können. Die losen Enden der Fäden werden auf einem Tisch befestigt, so dass die Walze stabil und waagrecht hängen kann.

Um die breitere Mitte der Walze wird auch ein Faden gewickelt, so dass er in die entgegengesetzte Richtung abrollen kann, wie die beiden anderen Fäden sich aufrollen. (Siehe Abb. 6)

Nun kann man an dem mittleren Faden ziehen und beobachten, dass die Walze nach oben wandert.

### Physikalischer Hintergrund

Auf die Walze wirken zwei Kräfte: Die Gewichtskraft  $\vec{F}_g$ , die am Schwerpunkt S angreift und die Zugkraft  $\vec{F}$ , die durch das Ziehen am mittleren Faden verursacht wird. Diesen Kräften wirkt die Kraft  $-(\vec{F} + \vec{F}_g)$ , die durch die beiden Aufhängefäden bewirkt wird, entgegen. (Siehe Abb.7)

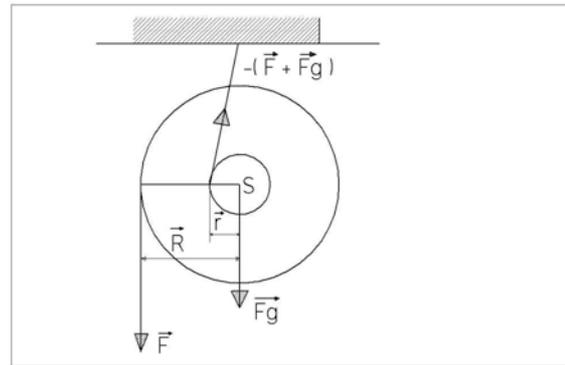


Abb. 7 An die Walze angreifende Kräfte

Dadurch entstehen zwei Drehmomente um den Schwerpunkt.

Die Drehmomente sind nach (3)

$$\vec{T}_1 = -\vec{r} \times (\vec{F} + \vec{F}_g) \quad (4)$$

$$\text{und } \vec{T}_2 = \vec{R} \times \vec{F} \quad (5)$$

wobei  $\vec{r}$  der Verbindungsvektor zwischen dem Auflagepunkt der äußeren Fäden mit dem Schwerpunkt im Querschnitt und  $\vec{R}$  der Verbindungsvektor von Schwerpunkt und Auflagepunkt des mittleren Fadens ist.

Das Drehmoment  $\vec{T}_1$  ist dafür verantwortlich, dass sich die äußeren Fäden abwickeln und sich der mittlere Faden aufwickelt, wogegen das Drehmoment  $\vec{T}_2$  genau das Gegenteil bewirkt.

Das heißt, dass beim Hinaufrollen der Walze das Drehmoment  $\vec{T}_2$  größer als  $\vec{T}_1$  und folglich die Zugkraft  $\vec{F}$  größer als die Gewichtskraft  $\vec{F}_g$  sein muss.

## Der Drehmomentschlüssel

### Material

- Drehmomentschlüssel
- Schraube mit Mutter, die für den Drehmomentschlüssel passend ist
- Schraubstock

### Aufbau und Durchführung

Zuerst muss man am Drehmomentschlüssel den gewünschten Drehmomentwert einstellen. Die Schraubenmutter, in welche die Schraube gedreht wird, wird fest im Schraubstock eingespannt.

Nun beginnt man die Schraube mit dem Drehmomentschlüssel in die Schraubenmutter zu drehen.



Abb. 8 Das Arbeiten mit dem Drehmomentschlüssel



Abb. 9 Hier wird der Drehmomentwert eingestellt

### Beobachtung

Wenn die Schraube fest in die Mutter geschraubt wurde, „knackt“ der Drehmomentschlüssel.

### Physikalischer Hintergrund

Wenn das eingestellte Drehmoment erreicht wird, knackt der Drehmomentschlüssel kurz, was ein Signal für die Versuchsperson ist, mit dem Andrehen der Schraube aufzuhören.

Das Drehmoment  $\vec{T}$  ist nach (3) definiert.  $\vec{F}$  ist die Kraft, die man aufwendet, um die Schraube hinein zu schrauben,  $\vec{r}$  ist der Vektor zwischen dem Punkt, an dem man den Drehmomentschlüssel berührt, bis zur Schraube und  $\vec{T}$  ist das daraus resultierende Moment.

### **Bemerkung**

In diesem Fall wurde der „Knack-Schlüssel“ beschrieben. Es gibt aber auch Drehmomentschlüssel, die beim Erreichen eines bestimmten Drehmoments durchknicken und somit eine weitere Einleitung eines Momentes verhindern.

Bei anzeigenden Drehmomentschlüsseln wird über eine Skala (z. B. Messuhr) der Wert des Drehmomentes angegeben, den das Werkzeug auf die Schraube ausübt.

### **Anwendungsgebiete**

Drehmomentschlüssel werden hauptsächlich als Montagewerkzeug verwendet, speziell in der Autoindustrie, wo sehr empfindliche Werkstoffe, wie Magnesium, Aluminium und Kunststoffe, eingesetzt werden. So kann man z. B. den Drehmomentschlüssel zum Anziehen von Radmuttern bei Aluminiumfelgen verwenden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Implantatmedizin, wo Hüftgelenke oder Zahnimplantate mit dem Drehmomentschlüssel angezogen werden.

### 2.1.3 Der Hebel

In diesem Teil möchte ich noch einige Versuche zum vorher erwähnten Hebelgesetz beschreiben.

#### Ein Lineal als Hebel

##### Material

- Lineal
- Bleistift
- Buch

##### Aufbau und Durchführung

Man legt den Bleistift auf den Tisch und das Lineal mit der Mitte darauf. Nun platziert man das Buch auf ein Ende des Lineals.

Wenn man versucht, auf das andere Ende des Lineals zu drücken, lässt sich das Buch nur schwer aufheben.

Das Lineal wird so verrückt, dass das Stück des Lineals, auf das man drückt, viel länger ist als das, auf dem das Buch liegt.

##### Beobachtung

Das Buch lässt sich jetzt mit weniger Kraftaufwand aufheben als zuvor.

##### Physikalischer Hintergrund

Das Lineal stellt einen Hebel dar, dessen Drehpunkt der Auflagepunkt des Lineals auf dem Bleistift ist. Das Hebelgesetz lautet nach (2)

$$F \cdot r_1 = F_g \cdot r_2, \quad (6)$$

wobei  $r_1$  und  $r_2$  die jeweiligen Abstände vom Drehpunkt zum Rand des Lineals sind, also der Kraftarm bzw. der Lastarm,  $F$  die Kraft, die man aufwenden muss, um das Buch aufzuheben, und  $F_g$  die Gewichtskraft, die am Buch angreift.



Abb. 10 Das Lineal als Hebel



Abb. 11 Mit dem Hebel wird das Buch gehoben

Wird nun der Kraftarm, auf den man drückt, verlängert, so muss man laut Hebelgesetz weniger Kraft anwenden, um das Buch zu heben.

## Flaschen öffnen

### Material

- Limonadenflasche mit Kapselverschluss
- Tafelmesser, Feuerzeug

### Aufbau und Durchführung

Der Flaschenrand wird mit den Fingern fest umfasst. Danach wird das Feuerzeug oder Tafelmesser zwischen Finger und Kapselrand eingespannt. Nun drückt man nach unten und die Flasche öffnet sich.



Abb. 12 Die Bierflasche wird mit dem Feuerzeug geöffnet

### Beobachtung

Je länger der Gegenstand ist, den man zum Öffnen der Flasche verwendet, desto weniger Kraft muss man aufbringen.

### Physikalischer Hintergrund

Das Hebelgesetz ist auch bei diesem Experiment das zur Anwendung kommende Gesetz. In diesem Fall stellt die Fixierung des Messers mit den Fingern den Angriffspunkt dar. Das Feuerzeug beziehungsweise das Messer mit der Länge  $r$  ist der Kraftarm, das Herunterdrücken bewirkt die Kraft  $F$ .

Auf die Kapsel wirkt nach (1) ein Drehmoment. Je länger  $r$  ist, desto geringer ist die aufzuwendende Kraft.

## 2.1.4 Massenmittelpunkt (Schwerpunkt)

Der Massenmittelpunkt eines Körpers ist derjenige Punkt, in dem die gesamte Masse des Körpers angenommen wird. Durch diesen Punkt muss die Angriffslinie einer Kraft gehen, wenn bei einem frei beweglichen Körper nur Translationen erfolgen sollen.

Dieser Punkt wird im homogenen Feld beim Angreifen der Schwerkraft auch Schwerpunkt genannt. Beim Fallen treten ja keine Drehungen auf.

### Schwerpunktbestimmung eines Dreiecks

#### Material

- Karton
- große Büroklammer
- Faden
- Kluppe
- Bleistift, Schere

#### Aufbau und Durchführung

Aus dem Karton wird ein Dreieck geschnitten. An irgendeiner Ecke des Dreiecks sticht man mit der aufgebogenen Büroklammer durch den Karton. An der herausstehenden Büroklammer befestigt man nun einen Faden, an dessen Ende eine Kluppe angebunden ist.

Das Dreieck wird nun mit der Büroklammer aufgehängt, sodass sich das Dreieck und der Faden mit der Kluppe auspendelt.

Mit dem Bleistift zieht man nun eine Linie entlang des Fadens.

Den gesamten Vorgang wiederholt man an den beiden anderen Ecken. Der Schnittpunkt der Linien ist der Schwerpunkt. Die Linien nennt man Schwerlinien. Zur Überprüfung kann man das Dreieck auf dem Finger balancieren, indem man das Dreieck im Schwerpunkt hält.



Abb. 13 Die Schwerlinien des Dreiecks werden nachgezeichnet



Abb. 14 Das Dreieck kann mit dem Finger am Schwerpunkt balanciert werden

## Physikalischer Hintergrund

Das Dreieck wird an einem Punkt nahe der Kante aufgehängt. Die Schwerkraft greift im Massenmittelpunkt an und das Dreieck dreht sich so lange, bis die Angriffslinie der Schwerkraft durch den Aufhängepunkt und durch den Schwerpunkt geht. Die Angriffslinie der Schwerkraft wird durch den Faden sichtbar. Der Schnittpunkt zweier Schwerlinien bzw. Angriffslinien ist der Schwerpunkt.

Wird das Dreieck mit dem Finger in diesem Punkt unterstützt, befindet es sich im Gleichgewicht.

## Schwerpunkt eines Besens

### Material

- Besen

### Aufbau und Durchführung

Man legt den Besen waagrecht auf die ausgestreckten Zeigefinger bei möglichst weit auseinander gehaltenen Händen. Nun nähert man beide Finger so lange aneinander an, bis sie beisammen sind.

### Beobachtung

Der Stock rutscht zuerst nur auf dem Finger (bzw. umgekehrt), der sich unter dem Besenstiende befindet. Wenn sich dieser Finger dem zweiten Finger nähert, kehren sich die Verhältnisse um, der zweite Finger beginnt sich zu bewegen.

Je näher die Finger dem Schwerpunkt kommen, desto schneller wechseln sich linker und rechter Finger beim Rutschen ab. Dort, wo beide Finger aneinander stoßen, befindet sich der Schwerpunkt.



Abb. 15 Ausgangsposition



Abb. 16 Der Schwerpunkt des Besens

### **Physikalischer Hintergrund**

Zu Beginn liegt der Schwerpunkt zwischen beiden ausgestreckten Fingern. Wenn man die Finger zu bewegen beginnt, wirkt auf den Finger, der weiter vom Schwerpunkt entfernt ist, die Gleitreibung und auf den anderen Finger die Haftreibung. Nähert sich unser durchrutschender Finger dem Schwerpunkt, erhöht sich die Auflagekraft, die vom Besen stammt, auf diesen Finger und die Gleitreibung erhöht sich, bis sie gleich groß wie die Haftreibung beim anderen Finger ist und der ruhende Finger wird zum durchrutschenden Finger. Dieser Vorgang wechselt sich so lange ab, bis sich die Finger beim Schwerpunkt treffen.

### **Bemerkung**

Man kann die Schüler im Nachhinein fragen, wo sie den Besen auseinander schneiden müssen, um zwei gleich schwere Teile zu bekommen.

## Welche ist die volle Flasche?

### Material

- 2 Kunststoffflaschen mit Kapsel zum Zuschrauben
- Besenstiel oder eine Stange
- Alufolie
- Faden

### Aufbau und Durchführung

Eine Flasche wird ganz und eine bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt. An den Flaschenköpfen befestigt man je einen etwa 30 cm langen Faden. Jeden Faden knüpft man jeweils an ein Besenstielende.

Nun legt man den Besenstiel mit den darauf hängenden Flaschen auf die ausgestreckten Finger und beginnt diese langsam zusammen zu führen.

### Beobachtung

Zu Beginn lässt sich ein Finger nur sehr schwer bewegen. Der Punkt, an dem die Finger zusammentreffen, befindet sich nicht genau in der Mitte des Besenstiels.

### Physikalischer Hintergrund

Auf den Finger nahe der vollen Flasche wirkt zuerst Haftreibung, deshalb bewegt er sich zuerst nicht. Danach wechseln sich Haft- und Gleitreibung ab und die Finger treffen sich im Schwerpunkt des Stiels, der näher bei der vollen Flasche ist, da diese ja mehr Gewicht hat.



Abb. 17 Ausgangsposition



Abb. 18 Der Schwerpunkt liegt näher bei der vollen Flasche

## Schwerpunktbestimmung einer Kartoffel

### Material

- Kartoffel
- 2 Stricknadeln
- Faden
- Angelhaken
- Messer

### Aufbau und Durchführung

Zunächst knüpft man den Angelhaken an die Schnur. Danach hängt man die Kartoffel an einer beliebigen Stelle mit dem Angelhaken auf. Wenn sich die Kartoffel eingependelt hat, steckt man die erste Stricknadel in den Aufhängepunkt und in Verlängerung zur Schnur in die Kartoffel. So erhält man die erste Schwerlinie. Nun wiederholt man den Vorgang an einer anderen Stelle.

Die Kartoffel wird nun in der Ebene einer Schwerlinie aufgeschnitten.

### Physikalischer Hintergrund

Durch die Stricknadeln erhält man zwei Schwerlinien, deren Schnittpunkt der Schwerpunkt der Kartoffel ist.

In Körpern liegt der Schwerpunkt im Inneren, darum muss man die Kartoffel entlang einer Schwerlinie aufschneiden, um den Schwerpunkt sichtbar zu machen.



Abb. 19 Die Kartoffel hängt am Angelhaken



Abb. 20 Die Stricknadel wird in Verlängerung zur Schnur in die Kartoffel gesteckt



Abb. 21 Der Schwerpunkt der Kartoffel

## Schwerlinie bei einem Joghurtbecher

### Material

- Joghurtbecher
- Faden
- Plastilin
- Zahnstocher
- Schere, Nagel, Feuerzeug

### Aufbau und Durchführung

Der Schwerpunkt des Joghurtbechers wird ausgemessen. Dann wird außen auf dem Becher in der Höhe des Schwerpunktes ein Markierungspunkt angebracht. Mit dem Nagel, den man mit dem Feuerzeug erhitzt, brennt man ein Loch in diesen Punkt. In dieses steckt man den Zahnstocher und befestigt daran einen Faden, an dessen Ende eine Plastilinkugel angebracht ist.

Nun versucht man, den Becher langsam umzukippen und beobachtet dabei den Faden mit der Kugel daran.

### Beobachtung

Versucht man den Becher umzuwerfen, sieht man, dass der Becher erst dann zu kippen beginnt, wenn sich der Faden über der Kippkante befindet.

### Physikalischer Hintergrund

Der Faden mit der Plastilinkugel ist ein Lot, das die Richtung der Schwerlinie anzeigt. Je nachdem wie der Becher gekippt wird, variiert auch die Schwerlinie. Geht die Schwerlinie durch die Auflagefläche, stellt sich der Becher wieder auf, ansonsten fällt er um.

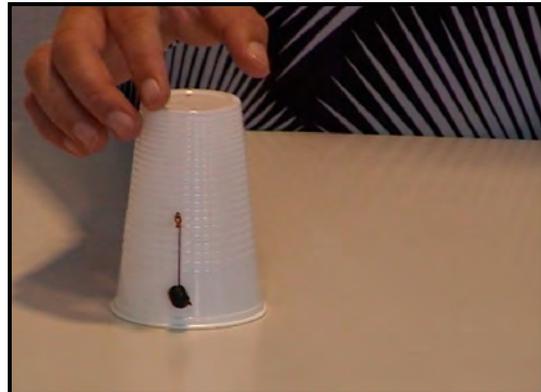


Abb. 22 Das Lot des Joghurtbechers

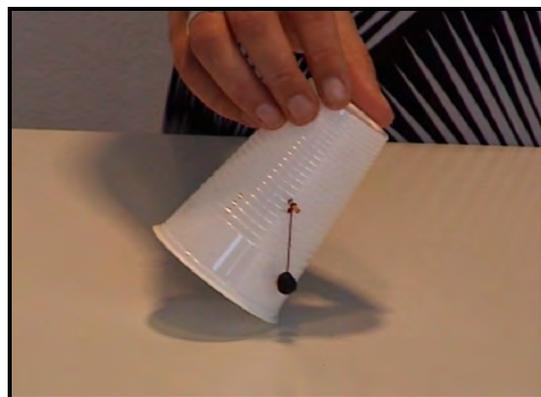


Abb. 23 Die Schwerlinie befindet sich außerhalb der Auflagefläche

## Der asymmetrische Klotz

### Material

- Dreikantleiste (ca. 5 cm lang)

### Aufbau

Die Dreikantleiste wird an der Stirnseite schräg abgeschnitten, und zwar so, dass sie in einem Winkel von  $70^\circ$  zur langen Seite stehen bleibt. Parallel zur entstandenen Seite wird sie noch einmal abgeschnitten.

### Aufbau und Durchführung

Stellt man den entstandenen Körper auf die eine Schnittfläche, so fällt er um. Stellt man ihn jedoch auf die andere Schnittfläche, so bleibt er stehen.

### Physikalischer Hintergrund

Wenn der Körper auf der Fläche A steht, befindet sich die Schwerlinie außerhalb des Körpers und er kippt über die Kante. Dreht man den Körper jedoch um, so schneidet die Schwerlinie die Unterstützungsfläche (Fläche B) und der Körper bleibt stehen. Der Versuch zeigt, dass der Körper umkippt, wenn die Schwerlinie nicht innerhalb der Unterstützungsfläche liegt

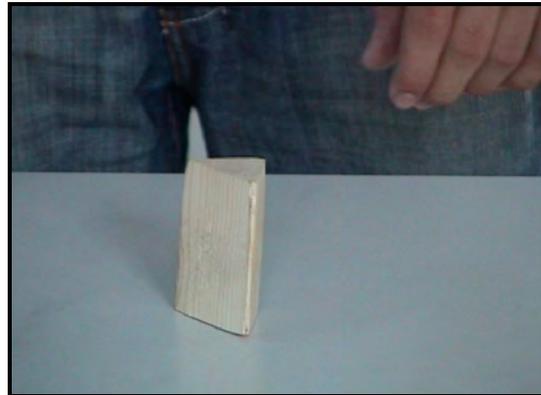


Abb. 24 Der Körper steht auf der Fläche B und fällt nicht um



Abb. 25 Wenn man hier den Klotz auslässt, wird er kippen

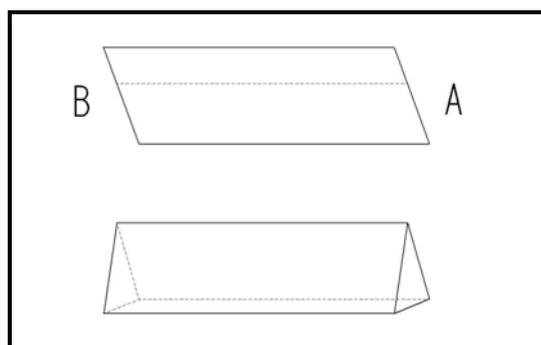


Abb. 26 Schematische Darstellung des Klotzes

## Dominobrücke

### Material

- mindestens 4 Dominosteine

### Aufbau und Durchführung

Zwei Dominosteine werden übereinander gelegt, so dass der obere gerade nicht hinunterfällt, also knapp bis zur Hälfte aufliegt. Diese Steine legt man auf einen weiteren Stein. Sie sollen dabei wieder nicht kippen. Dieser Vorgang wird mit dem nächsten Stein wiederholt. Man legt den Stapel von Steinen immer auf den untersten Stein, so dass sie nicht umfallen. Auf diese Weise kann man einen sehr großen Überhang erzielen.

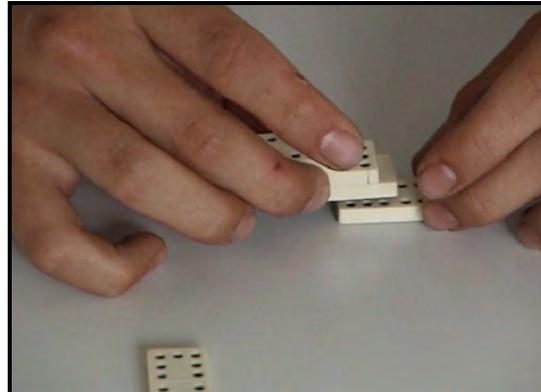


Abb. 27 Das Aufeinanderlegen der Steine

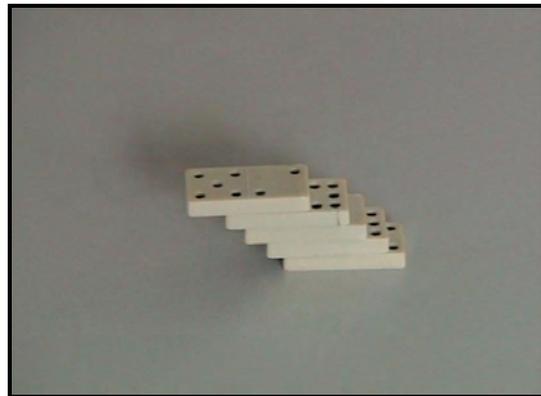


Abb. 28 Die Dominobrücke

### Physikalischer Hintergrund

Wird ein Stein bis knapp zur Hälfte auf die Tischkante gelegt, liegt sein Schwerpunkt noch oberhalb der Auflagefläche und kippt nicht. Die weiteren Steine müssen so gestapelt werden, dass der gemeinsame Schwerpunkt immer über der Auflagefläche liegt, sonst kippt dieses System.

## Standfestigkeit zwei gleich großer Quader

### Material

- 2 gleich große Quader mit rechteckiger Grundfläche
- Brett

### Aufbau und Durchführung

Beide Quader werden auf das Brett gestellt, dass die Frontseite eines Quaders die mit der längeren Grundflächenseite ist und die Frontseite des anderen Quaders die mit der kürzeren Grundflächenseite. (Siehe Abb. 30) Das Brett wird an einer Seite langsam angehoben.

### Beobachtung

Der Quader mit der längeren Seite an der Front fällt schneller um.

### Physikalischer Hintergrund

Da die Schwerlinie des Quaders mit der längeren Seite an der Front sehr schnell nicht mehr die Auflagefläche schneidet, kippt er auch schneller um als der Quader mit der kürzeren Grundflächenseite vorne.



Abb. 29 Der Quader mit der längeren Seite an der Front fällt schneller um

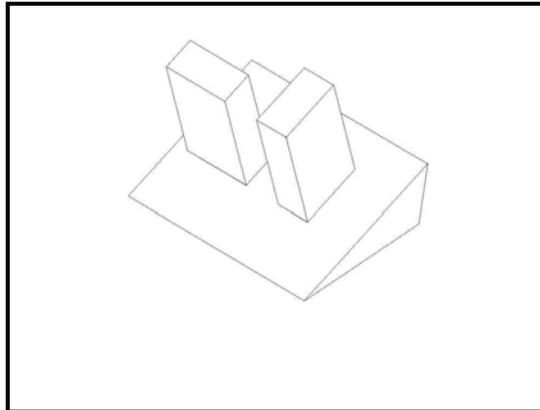


Abb. 30 Ausgangsposition der Quader

## 2.1.5 Verlagerung des Schwerpunktes

### Die unwillige Zitrone

#### Material

- Glasschüssel oder abgeschnittene 2-Liter-PET-Flasche
- große Zitrone
- Münze, 10 Cent Stück

#### Aufbau und Durchführung

Das Glasgefäß wird mit Wasser gefüllt und die Zitrone hineingelegt. Nun versucht man, die Münze auf die Zitrone zu legen.

#### Beobachtung

Wenn man versucht, die Münze auf die Zitrone zu legen, kippt die Zitrone sehr schnell um.

#### Physikalischer Hintergrund

Durch die Münze wird der Schwerpunkt der Zitrone nach oben verlagert. Sie befindet sich dann nicht mehr im Gleichgewicht und beginnt zu kippen.



**Abb. 31** Der Schwerpunkt der Zitrone wurde durch die Münze verlagert

## Die verhexte Schachtel

### Material

- Schachtel
- Gewicht (z. B. Eisenstück, Steine)

### Aufbau und Durchführung

In eine Ecke der Schachtel gibt man das Gewicht. Nun kann man die Schachtel, deren beschwerte Ecke noch auf dem Tisch liegt, bis über die Hälfte auf eine Tischkante stellen, ohne hinunterzufallen.

### Physikalischer Hintergrund

Durch das Gewicht in der Ecke wurde der Schwerpunkt der Schachtel verlagert. Der Schwerpunkt der Schachtel liegt durch das Gewicht in der Ecke noch immer über der Auflagefläche, obwohl der größte Teil der Schachtel nicht mehr am Tisch liegt.

### Bemerkung

Dieser Versuch zeigt, dass der Schwerpunkt nicht allein von der äußeren Erscheinung abhängt, sondern von seiner Massenverteilung.



Abb. 32 Die Schachtel liegt nur mit einer Ecke auf dem Tisch



Abb. 33 Der Schwerpunkt der Schachtel wurde durch das Gewicht verlagert

## Die Kerzenschaukel

### Material

- zylinderförmige Stabkerze
- Stricknadel
- zwei gleich hohe Dosen oder Gläser
- Zünder



Abb. 34 Die Kerzenschaukel

### Aufbau und Durchführung

Zuerst wird das Ende der Kerze so bearbeitet, dass der Docht etwa 1 cm herauskommt.

Danach steckt man die Stricknadel durch die Mitte der Kerze und legt die Enden der Stricknadel auf die Dosen, so dass die Kerze waagrecht liegt. Beide Enden des Dochtes werden nun angezündet.

### Beobachtung

Nach einiger Zeit beginnt die Kerze zu wippen. Je mehr von ihr abgebrannt ist, desto schneller wippt sie.

### Physikalischer Hintergrund

Die Kerze ist ein zweiarmiger Hebel, dessen Drehachse die Stricknadel, die durch den Schwerpunkt geht, ist. Tropft auf einer Seite Wachs herunter, verlagert sich der Schwerpunkt und die Kerze wird aus dem Gleichgewicht gebracht. Am unteren Ende der Kerze schmilzt nun mehr Wachs als an dem oberen Ende und der Schwerpunkt wird wiederum in Richtung des oberen Endes der Kerze verlagert. Es entsteht ein Drehmoment, so dass die Kerze kippt. Nun beginnt der Vorgang von neuem. Das Wachs an der unteren Seite schmilzt und die Kerze beginnt zu wippen.

## Die bergauf rollende Dose

### Material

- zylindrische Dose mit möglichst großem Durchmesser
- kleines Stück Eisen oder Magnet
- Schiefe Ebene (Brett mit rauher Fläche und kleiner Klotz)
- Klebeband



Abb. 35 In der Dose ist ein Magnet angebracht

### Aufbau und Durchführung

Zuerst wird die schiefe Ebene hergestellt, indem unter ein Ende des Brettes der Klotz gelegt wird. Am besten so, dass das Brett und der Untergrund einen Winkel von etwa  $4^\circ$  einschließen. Auf der Doseninnenfläche wird das Eisenstück mit einem Klebeband befestigt. Nun legt man die Dose auf die schiefe Ebene, wobei zu beachten ist, dass das Eisenstück oberhalb des Auflagepunktes der Dose in Richtung der schiefen Ebene liegt.

### Beobachtung

Die Dose rollt ein kurzes Stück bergauf, bleibt danach stehen, beginnt hinunter zu rollen und rollt wieder bergauf.

### Physikalischer Hintergrund

Durch das Stück Eisen wird der Schwerpunkt der Dose nach oben verlagert. An diesem Punkt greift die Gewichtskraft  $\vec{F}_g$  an, die um den Auflagepunkt ein Drehmoment nach (3) bewirkt, wobei  $\vec{r}$  der Vektor vom Auflagepunkt A zum Schwerpunkt S ist. Dieses Drehmoment bewirkt das Hinaufrollen der Dose.

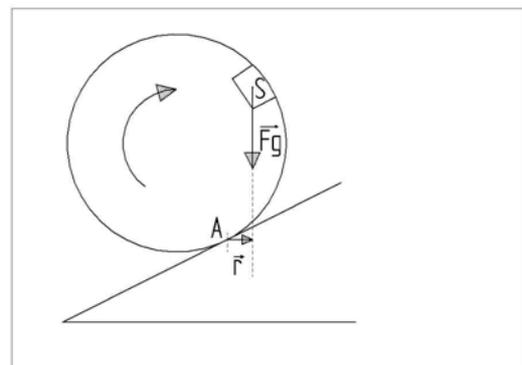


Abb. 36 Kraft, die an der Dose angreift

Die Dose rollt nur so weit, wie der Umfang zwischen Auflagepunkt und Schwerpunkt ist. Wenn der Schwerpunkt mit dem Auflagepunkt zusammenfällt, ist  $\vec{r} = \vec{0}$  und das Drehmoment hebt sich auf, darum bleibt die Dose kurz stehen.

Danach rollt die Dose als natürliche Konsequenz der Schwerkraft nach unten, bis der Schwerpunkt wieder über dem Auflagepunkt liegt und rollt bergauf usw.

## 2.1.6 Schwerpunkt des menschlichen Körpers

### Material

- eine Person
- Sessel
- schwere Bücher

### Variante 1

Die Person stellt sich so an die Wand, dass Zehenspitzen und Nase die Wand berühren. Sie versucht sich nun auf die Zehenspitzen zu stellen.

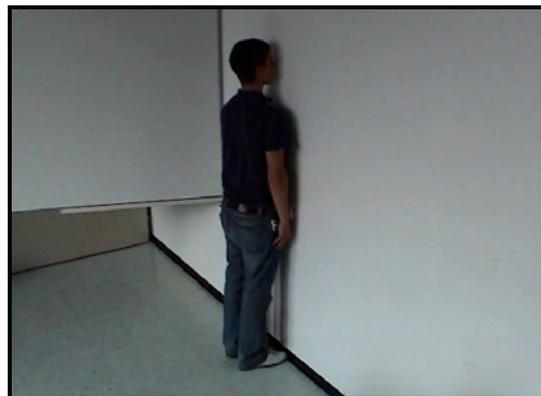


Abb. 37 Ausgangsposition für Variante 1

### Variante 2

Die Person stellt sich seitlich an die Wand, so dass die Fußkanten die Wand berühren. Anschließend versucht sie das Bein, das nicht an der Wand steht, zu heben.

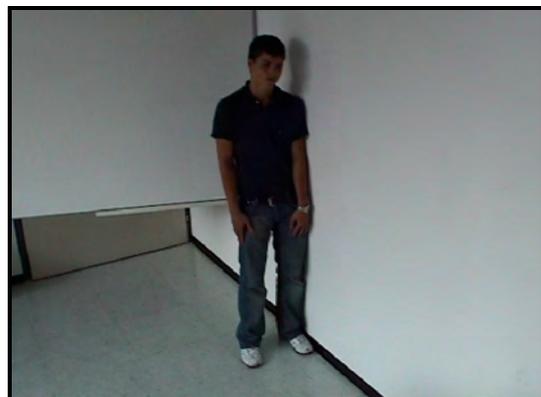


Abb. 38 Ausgangsposition für Variante 2

### Beobachtung

In beiden Fällen ist es schwer, das Gleichgewicht zu halten, ohne dass man sich bewegt.

### **Physikalischer Hintergrund**

Durch das Stehen auf Zehenspitzen und das Heben des Beines wird die Auflagefläche des Körpers verringert und das Schwerpunktlot geht nicht mehr durch diese Fläche. Als Resultat fällt der Körper um.

### **Variante 3**

Die Person stellt sich mit geschlossenen Beinen hin und hält schwere Bücher in den Händen. Nun versucht sie, sich mit ausgestreckten Armen vorzubeugen, was unmöglich ist.



**Abb. 39** Der Schwerpunkt wird durch das Buch verlagert

### **Physikalischer Hintergrund**

In der Variante 3 wird der Schwerpunkt durch das Heben von schweren Gegenständen verlagert und so der Körper aus dem Gleichgewicht gebracht.

### **Variante 4 – Das Aufstehen von einem Sessel**

Die Person sitzt gerade auf einem Sessel und versucht zuerst, ohne den Oberkörper zu bewegen, aufzustehen, was nicht möglich ist. Nun bewegt sie den Oberkörper nach vorne und bemerkt, dass sie sich ab einem bestimmten Punkt erheben kann.



**Abb. 40** Der Schwerpunkt wird beim Aufstehen nach vorne verlagert

### **Physikalischer Hintergrund**

Sitzt eine Person aufrecht auf einem Stuhl, so befindet sich der Schwerpunkt über der Sitzfläche, also über der Auflagefläche des Körpers. Darum kann sie sich nicht erheben.

Während des Aufstehens verlagert die Person den Schwerpunkt ihres Körpers, indem sie sich nach vorne beugt. Wenn die Schwerlinie nicht mehr die Sitzfläche schneidet, kann sie aufstehen.

## 2.1.7 Gleichgewicht

Ein Körper befindet sich im Gleichgewicht, wenn sein Zustand in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung bezüglich Translation und Rotation ist.

Dies bedeutet also, dass für das Bestehen eines Gleichgewichts sich alle am Körper angreifenden Kräfte bzw. Drehmomente aufheben müssen.

$$\vec{F}_{res} \left( = \sum_i \vec{F}_i \right) = 0 \quad (7)$$

$$\text{und } \vec{T}_{res} \left( = \sum_i \vec{T}_i \right) = 0 \quad (8)$$

Man kann dabei drei Fälle unterscheiden:

### a) Stabiles Gleichgewicht

Wird ein Körper aus dem Gleichgewicht gebracht, so kehrt er wieder „freiwillig“ in die Lage des stabilen Gleichgewichts zurück.

Im stabilen Gleichgewicht hat der Körper die geringste potentielle Energie.

### b) Labiles Gleichgewicht

Ein Körper, der aus diesem Gleichgewicht gebracht wird, kehrt nicht mehr in seine ursprüngliche Lage zurück.

In dieser Lage nimmt die potentielle Energie ein Maximum an.

### b) Indifferentes Gleichgewicht

Wird die Lage des Körpers geändert, so bleibt das Gleichgewicht in diesem Fall erhalten.

Die potentielle Energie ist konstant.

## Gleichgewichtslagen einer Kugel

### Material

- zylinderförmige Petrischale
- großes Uhrglas
- Kugel

### Aufbau und Durchführung

Zuerst legt man das Uhrglas nach oben offen auf die offene zylinderförmige Petrischale, damit sie stabil liegt. Die Kugel legt man in die Mitte der Schale und lenkt sie aus.

Dann wird das Uhrglas umgedreht auf den Tisch gelegt, man versucht auch hier, die Kugel in der Mitte der Kuppe zu positionieren.

Im dritten Fall legt man die Kugel nur auf den Tisch.

### Beobachtung

Die Kugel in der offenen Schale kehrt immer wieder in die Ausgangsposition zurück, wogegen es im zweiten Fall sehr schwer ist, die Kugel auf die Kuppe zu stellen.

Liegt die Kugel auf dem Tisch, bleibt die Lage immer unverändert.

### Physikalischer Hintergrund

Befindet sich die Kugel im Mittelpunkt des nach oben offenen Uhrglases, ist sie im stabilen Gleichgewicht, sie kehrt immer wieder in diese Lage zurück.

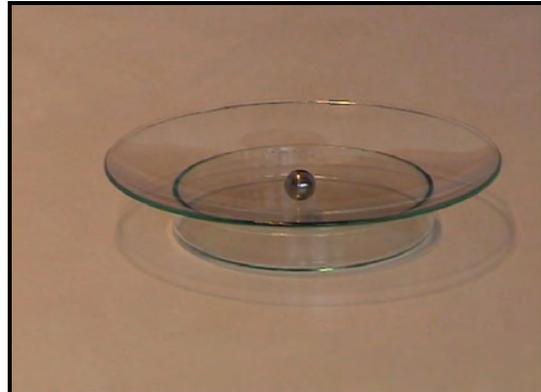


Abb. 41 Stabile Gleichgewichtslage



Abb. 42 Labile Gleichgewichtslage

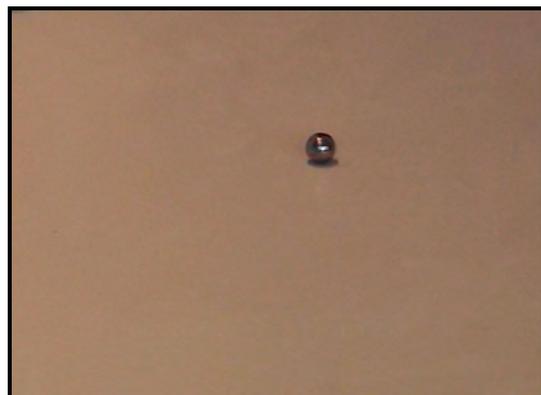


Abb. 43 Indifferente Gleichgewichtslage

Das labile Gleichgewicht der Kugel wird durch die Lage auf der Kuppe des Uhrglases veranschaulicht. Für sie ist es unmöglich, nach einer Auslenkung wieder in diese Position zurückkehren.

Die indifferente Gleichgewichtslage der Kugel befindet sich am ebenen Untergrund. Sie verändert sich nach einer Änderung nicht.

### **Gleichgewichtslagen einer Zündholzschachtel**

#### **Material**

- Zündholzschachtel
- Stricknadel

#### **Durchführung**

Man bohrt zwei Löcher in die Zündholzschachtel, wie sie auf der Abbildung 47 dargestellt sind, wobei sich das Loch in der Mitte im Schwerpunkt der Schachtel befinden soll.

Diese Löcher sollen so groß sein, dass man die Stricknadel locker durchstecken kann.

#### **Beobachtung**

Wird die Stricknadel durch das Loch am Ende der Zündholzschachtel gesteckt, bemerkt man, dass die Schachtel immer nach unten hängt und nicht oberhalb der Stricknadel stehen bleibt.

Steckt man die Stricknadel durch das Loch in der Mitte, bleibt sie in Ruhe, egal in welche Lage man sie dreht.



**Abb. 44** Stabile Gleichgewichtslage



**Abb. 45** Labile Gleichgewichtslage

### Physikalischer Hintergrund

Die Zündholzschachtel befindet sich im stabilen Gleichgewicht, wenn sie nach unten hängt. Sie kehrt „freiwillig“ in diese Lage zurück, wenn man sie aus dem Gleichgewicht bringt.

Steht die Schachtel oberhalb der Stricknadel, kippt sie sofort und kann nicht mehr in diese Lage zurückkehren. Sie befindet sich im labilen Gleichgewicht.

Wird die Stricknadel durch die Mitte der Schachtel gesteckt, hat sie ein indifferentes Gleichgewicht angenommen, da das Gleichgewicht erhalten bleibt, egal wie sie liegt.



Abb. 46 Indifferente Gleichgewichtslage

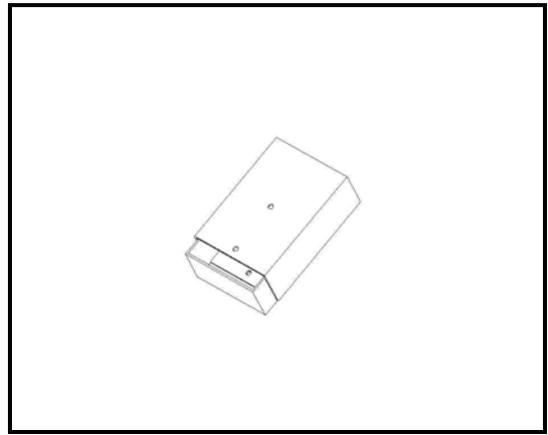


Abb. 47 Position der Löcher

## Das Stehaufmännchen

### Material

- Tischtennisball
- kleine Styroporkugel
- Kerze
- Stanleymesser, Klebstoff, Filzstifte, Feuerzeug



Abb. 48 Das Stehaufmännchen

### Aufbau und Durchführung

Man schneidet mit dem Stanleymesser eine Kappe des Tischtennisballs ab und tropft so lange Wachs hinein, bis der Ball zu einem Drittel mit Wachs gefüllt ist.

Danach malt man ein Gesicht auf die Styroporkugel und klebt diese auf den Tischtennisball.

### Beobachtung

Legt man das Männchen beliebig auf den Tisch, richtet es sich sofort wieder auf. Auch bei jedem weiteren Versuch, das Stehaufmännchen zu kippen, steht es wieder auf.

### Physikalischer Hintergrund

Der Schwerpunkt des Stehaufmännchens liegt im unteren Drittel des Tischtennisballs auf dessen Symmetrieachse.

Das Männchen befindet sich in der senkrechten Stellung in einem stabilen Gleichgewicht.

Kippt man das Männchen, wird der Schwerpunkt angehoben. Diese Auslenkung aus dem Gleichgewicht führt zu einem Drehmoment um den Auflagepunkt, welches das Männchen wieder in seine ursprüngliche Lage zurückbringt.

### Variante

Anstelle des Tischtennisballs kann man auch ein ausgeblasenes Ei verwenden.

Das Ei wird mit Sand und Wachsstücken bis zu einem Drittel aufgefüllt. Durch Schütteln des Eis vermischt man Sand und die Wachsstücke. Danach gibt man das Ei kurz in ein heißes Wasserbad, damit das Wachs schmilzt. Am besten ist es, wenn man das Ei senkrecht stehend in einem Eierbecher abkühlen lässt. Dann ist das „Stehauf-Ei“ fertig.

## Hochseilartist

### Material

- Lineal
- Stäbchen (10 - 20 cm lang)
- 3 Zündholzschachteln

### Aufbau und Durchführung

Das Lineal wird mit der schmalen Kante nach oben gehalten. Man versucht nun eine volle Streichholzschachtel hochkant auf dem Lineal zu balancieren. Dies wird schwer gelingen.

Nun steckt man das Stäbchen durch die Schachtel und montiert links und rechts die beiden anderen Schachteln. Man versucht erneut, die Streichholzschachtel auf das Lineal zu stellen, so dass der Teil der Schachtel, in dem das Stäbchen steckt, näher beim Lineal ist. (Siehe Abb. 50)

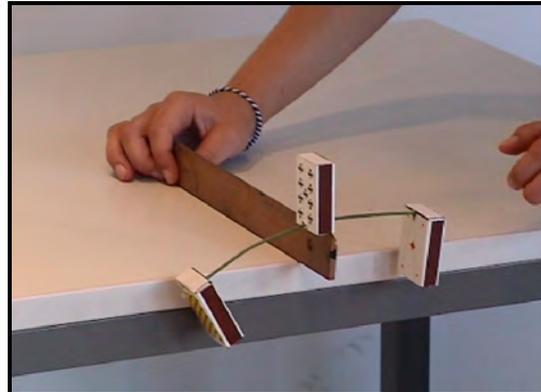


Abb. 49 Der Hochseilartist

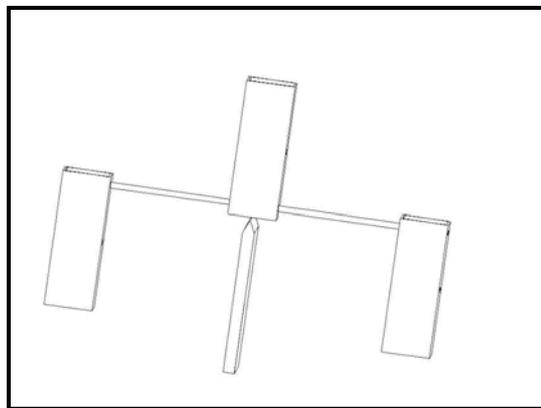


Abb. 50 Positionen der Streichholzschachteln

### Beobachtung

Wird die Schachtel alleine auf das Lineal gestellt, fällt sie sofort wieder hinunter.

Durch das Anbringen weiterer Schachteln gelingt es mit etwas Geschick, die Schachteln auszubalancieren. Man kann die Schachtel jetzt sogar ein bisschen aus der Gleichgewichtslage auslenken und sie schwingt zurück.

### Physikalischer Hintergrund

Das System versucht, den energetisch günstigsten Zustand anzunehmen, das heißt, der Schwerpunkt „möchte“ so tief wie möglich unten liegen.

Im ersten Fall fällt die Schachtel daher hinunter. Im zweiten Fall liegt der Schwerpunkt bedeutend tiefer und es ergibt sich ein Gleichgewicht, in dem das System nach einer Auslenkung sogar wieder in die Ruhelage zurückkehrt.

## **Bemerkung**

Seiltänzer verwenden oft eine Stange, um ihren Schwerpunkt etwas nach unten zu verlagern, damit sie sich besser ausbalancieren können.

## **Gleichgewicht hängender Körper**

### **Material**

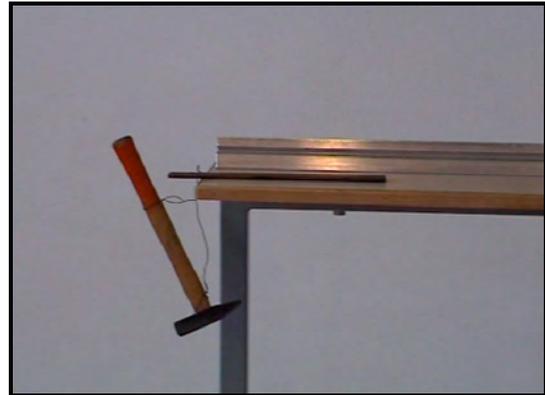
- Hammer
- Lineal
- Blumendraht
- Tisch

### **Aufbau und Durchführung**

Mit dem Draht wird eine Aufhängevorrichtung für den Hammer wie folgt gebastelt:

Zwei Schlaufen werden rund um den Griff des Hammers gebunden und zwischen diesen wird eine Aufhängeschleife angebracht.

Die obere Schlaufe wird auf dem Lineal befestigt und auf den Tisch gelegt. Das Lineal-Hammer-System hängt.



**Abb. 51** Der hängende Hammer

### **Physikalischer Hintergrund**

Da sich in diesem Fall der Schwerpunkt unter der Auflagefläche des Lineals befindet, ist das Lineal-Hammer-System im Gleichgewicht. Die Schwerkraft wirkt normal zur Erdoberfläche auf den Schwerpunkt, die Verlängerung dieser Kraftangriffslinie würde die Tischplatte durchstoßen. Es ist also das Gleiche, als ob der Hammer direkt an der Tischplatte aufgehängt wäre.

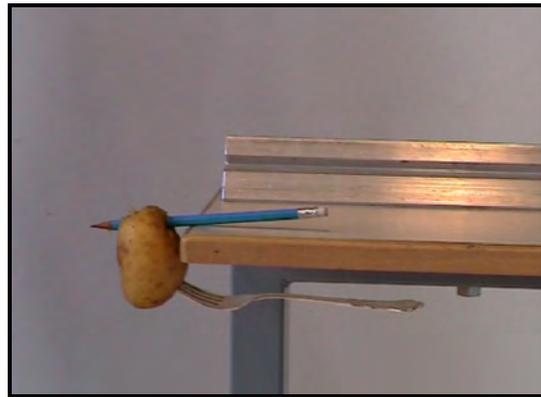
## ***Variante 1***

### **Material**

- Kartoffel
- Bleistift
- Gabel
- Tisch

### **Aufbau und Durchführung**

Man spießt mit dem Bleistift die Kartoffel auf, ca. 3 cm der Spitze des Bleistifts sollen herausragen. Auf der Unterseite der Kartoffel wird eine Gabel befestigt. Mit ein wenig Geschick kann man nun das gesamte Gebilde mit dem Bleistift waagrecht oberhalb der Tischkante aufhängen.



**Abb. 52** Gleichgewicht von Variante1

## ***Variante 2***

### **Material**

- Gabel
- Löffel
- Nadel
- Flasche mit Korken

### **Aufbau und Durchführung**

Den Korken steckt man in die mit Wasser gefüllte Flasche. In den Korken wird die Nadel mit dem Nadelöhr nach oben gesteckt. Der Löffel und die Gabel werden ineinander verkantet. Nun legt man beide zentriert auf die Nadel.

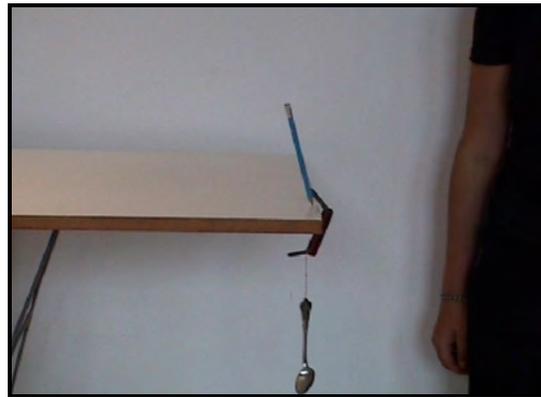


**Abb. 53** Das hängende Gabel-Löffel-System

### **Variante 3**

#### **Material**

- Bleistift
- Taschenmesser mit zwei Klingen
- Faden
- kleiner Löffel
- Tisch



**Abb. 54** Gleichgewicht von Variante 4

#### **Aufbau und Durchführung**

Die zwei Klingen werden aus dem Taschenmesser herausgeklappt und schräg aufgestellt. Eine Klinge wird etwa 3 cm über der Bleistiftspitze in den Bleistift gestochen. Mit dem Faden wird noch ein Löffel auf das Messer gehängt. Nun lässt sich dieses System mit der Spitze des Bleistiftes auf den Tisch stellen, ohne dass es hinunter fällt. Wichtig ist dabei nur, dass der Auflagepunkt des Bleistiftes, der Schwerpunkt und die Angriffslinie der Schwerkraft auf einer Linie liegen.

### **Variante 4**

#### **Material**

- Zollstab
- Tisch

#### **Aufbau und Durchführung**

Der Zollstab wird so aufgeklappt, dass er halb offen ist. Ein Ende kann man nun auf die Tischkante stellen, ohne dass das Gebilde hinunterfällt, es befindet sich im Gleichgewicht.



**Abb. 55** Der hängende Zollstab

## Ein Balancierkunststück

### Material

- 2 Gabeln
- 1-€-Münze
- Schüssel oder Glas mit etwa 10 cm Durchmesser

### Aufbau und Durchführung

Zwischen den zwei Gabeln wird die 1-€-Münze eingeklemmt, so dass sie gut fixiert ist.

Die Gabeln lassen sich nun auf der Schüssel bzw. dem Glas balancieren.

### Physikalischer Hintergrund

Der Schwerpunkt des Gabel-Münze-Systems liegt unter dem Auflagepunkt der Gabeln. Dadurch befindet sich dieses System im stabilen Gleichgewicht und kehrt auch bei kleinen Auslenkungen wieder in diesen Zustand zurück.



Abb. 56 Die zwei Gabeln befinden sich im Gleichgewicht



Abb. 57 Die 1-€-Münze wird zwischen beide Gabeln geklemmt

## Das Tellerkarussell

### Material

- Flasche mit Korken
- 2 Korken
- Nähnadel
- 4 Gabeln
- Teller



Abb. 58 Das Tellerkarussell

### Aufbau und Durchführung

Man steckt die Nähnadel in den Korken, der aus dem Flaschenhals herausragt. Die beiden anderen Korken werden halbiert und in den Rundungen der Korken werden Gabeln befestigt, so dass sie stabil nach unten hängen können. Der Teller wird am Rand gleichmäßig mit den Korken und den daran hängenden Gabeln belastet und danach auf den Kopf der Nähnadel gestellt.

### Beobachtung

Wird der Teller im richtigen Punkt mit der Nähnadel unterstützt, kippt er nicht, er lässt sich sogar leicht drehen.

### Physikalischer Hintergrund

Durch die hängenden Gabeln befindet sich der Schwerpunkt hier unter dem Auflagepunkt des Tellers auf der Nadel. Das System befindet sich im stabilen Gleichgewicht.

Durch das Drehen des Tellers entsteht ein Drehmoment, das den Teller wieder in seine ursprüngliche Lage zurückbringt.

## 2.2 Drehbewegungen starrer Körper um eine feste Achse

### 2.2.1 Der Drehwinkel

Wenn sich ein starrer Körper um eine Achse dreht, verschieben sich alle Punkte des Körpers um den gleichen Winkel, den man als Drehwinkel  $\varphi$  bezeichnet.

### 2.2.2 Die Winkelgeschwindigkeit

Dividiert man die Änderung des Drehwinkels durch die Zeit  $t$ , die der Körper für die Drehung benötigt, erhält man die Geschwindigkeit der einzelnen Massenpunkte

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \quad (9)$$

Die Richtung der Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}$  fällt mit der Drehachse zusammen.

### 2.2.3 Die Winkelbeschleunigung

Die Winkelbeschleunigung  $\vec{\alpha}$  ist definiert als

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}. \quad (10)$$

### 2.2.4 Das Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment  $I$  beschreibt die Trägheit eines starren Körpers gegenüber einer Änderung der Rotationsbewegungen.

Es hängt von der Körperform, der Massenverteilung des Körpers und der Lage der Drehachse ab. Bei Drehungen um eine feste Achse ist das Trägheitsmoment eine skalare Größe.

Die allgemeine Definitionsgleichung ist

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 . \quad (11)$$

|       |           |   |
|-------|-----------|---|
| $I$   | $[kgm^2]$ | Trägheitsmoment                             |
| $m_i$ | $[kg]$    | Massen                                      |
| $r_i$ | $[m]$     | Abstände von den Massen<br>zu der Drehachse |

Die kinetische Energie der Rotation oder auch Rotationsenergie  $W_k$  bei einem starren Körper ist

$$W_k = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \frac{I\omega^2}{2} . \quad (12)$$

## Das Dosenrennen

### Material

- 2 leere, gleich große Dosen
- 8 1-€-Münzen
- doppelseitiges Klebeband
- Brett
- Ziegelstein

### Aufbau und Durchführung

Am Boden einer Dose werden am Rand 4 Münzen mit dem doppelseitigen Klebeband befestigt.

Bei der zweiten Dose klebt man vier Münzen übereinander in die Mitte des Bodens. (In Abb. 61 ist die Position der Münzen dargestellt, im Originalversuch befinden sie sich aber im Inneren der Dose.)

Nun hat man zwei gleich schwere Dosen, deren Massenverteilung unterschiedlich sind. Ein Ende des Brettes legt man auf den Ziegelstein, so dass man eine schiefe Ebene erhält.

Die Dosen werden auf das obere Ende der schiefen Ebene gelegt und gleichzeitig losgelassen.

### Beobachtung

Die Dose mit den Münzen in der Mitte rollt schneller hinunter.



Abb. 59 Die Münzen in den Dosen



Abb. 60 Die Dose mit den Münzen in der Mitte rollt schneller

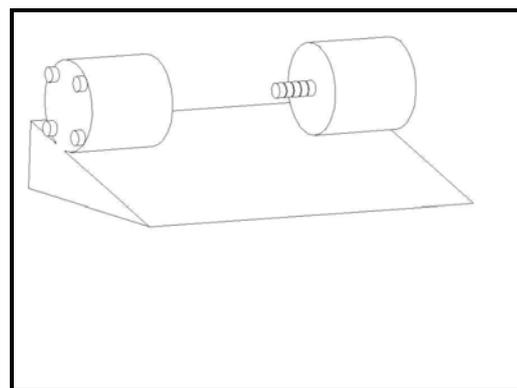


Abb. 61 Positionen der Münzen

## Physikalischer Hintergrund

Beim Auslassen der Dosen wirkt auf diese die Gewichtskraft  $F_g$

$$F_g = m \cdot g, \quad (13)$$

$m$  ...Masse der Dosen

$g$  ...Erdbeschleunigung

die ein Drehmoment  $T$  um den Auflagepunkt der Dose erzeugt. Die Gewichtskraft und die Verbindungslinie  $r$  zwischen Schwerpunkt und Auflagepunkt schließen den Winkel  $\beta$ , der auch der Neigungswinkel der schiefen Ebene ist, ein. (Siehe Abb. 62)

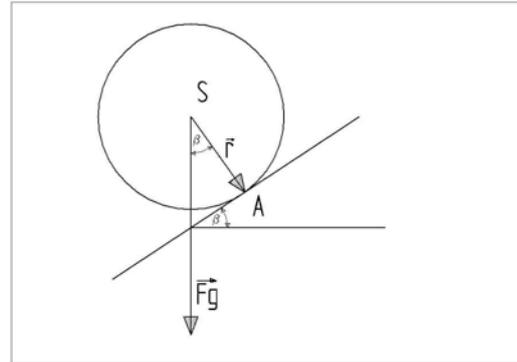


Abb. 62 Kraft, die an der Dose angreift

Die Formel für das Drehmoment lautet somit

$$T = mgr \cdot \sin \beta. \quad (14)$$

Für beide Dosen ist das Drehmoment gleich, weil sie den gleichen Radius  $r$  und die gleiche Masse  $m$  haben.

Die Trägheitsmomente  $I$  beider Dosen sind jedoch unterschiedlich. Die Dose mit den 4 Münzen in der Mitte (Dose 1) hat ein kleineres Trägheitsmoment als die zweite Dose (Dose 2).

Für die Winkelbeschleunigung  $\alpha$  beider Dosen gilt

$$\alpha_i = \frac{T}{I_i}, \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

Das bedeutet, dass  $\alpha_1 > \alpha_2$ , weil  $I_1 < I_2$ . Somit gilt auch für die Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_i$   $\omega_1 > \omega_2$ , da beim Abrollvorgang das Drehmoment, die Winkelgeschwindigkeit und die Trägheitsmomente konstant sind.

Die Geschwindigkeiten  $v_i$  setzen sich zusammen aus dem Radius  $r$  der Dosen, der für beide gleich ist, und den Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_i$

$$v_i = r\omega_i. \quad (16)$$

Also ist  $v_1 > v_2$ , was bedeutet, dass die Dose mit den Münzen innen schneller am Ziel ist als die andere Dose.

## Drehtischpirouette

### Material

- gut drehbarer Drehtisch
- Besen

### Aufbau und Durchführung

Die Versuchsperson stellt sich auf den Drehtisch und hält den Besen waagrecht von sich weg. Eine weitere Person bringt den Drehtisch in Rotation. Die Person auf dem Tisch zieht nun den Besen zu sich heran und hebt ihn senkrecht an.

### Beobachtung

Wenn die Versuchsperson den Besen anhebt, beginnt der Tisch schneller zu rotieren



Abb. 63 Der Besen wird waagrecht weggehalten



Abb. 64 Der Besen senkrecht herangezogen

### Physikalischer Hintergrund

Der Drehimpuls  $\vec{L}$  ist definiert als

$$\vec{L} = (I_{\text{Stuhl}} + I_{\text{Person}} + I_{\text{Besen}}) \vec{\omega}. \quad (17)$$

$I = I_{\text{Stuhl}} + I_{\text{Person}} + I_{\text{Besen}}$  ... Trägheitsmoment des gesamten Systems

$\vec{\omega}$  ... Winkelgeschwindigkeit

Das Trägheitsmoment der Person und des Drehtisches bleiben während des Experiments gleich. Zu betrachten ist nur das Trägheitsmoment des Besens.

Das Trägheitsmoment des waagrechten Besens  $I_{waag}$  ist

$$I_{waag} = \frac{1}{3} l_{Stiel}^2 m_{Stiel} + m_{Bürste} l^2. \quad (18)$$

$l_{Stiel}$  ... Länge des Besenstiels

$l$  ... Abstand von der Besenbürste zur Rotationsachse

$m_{Stiel}$ ,  $m_{Bürste}$  ... Massen des Besenstiels bzw. Masse der Bürste

Das Trägheitsmoment vom senkrecht stehenden Besen verschwindet, wenn man annimmt, dass der Abstand zwischen Besen und Rotationsachse Null ist.

Der Drehimpuls des waagrecht liegenden Besens  $\vec{L}_{waag}$  und des senkrecht stehenden Besens

$\vec{L}_{senkrecht}$  lauten somit nach (15) und (16)

$$\vec{L}_{waag} = I_{waag} \vec{\omega}_{waag} = (I_{Stuhl} + I_{Person} + \frac{1}{3} l_{Stiel}^2 + m_{Bürste} l^2) \vec{\omega}_{waag} \quad (19)$$

$$\vec{L}_{senkrecht} = I_{senkrecht} \vec{\omega}_{senkrecht} = (I_{Stuhl} + I_{Person}) \vec{\omega}_{senkrecht}. \quad (20)$$

Da der Drehimpuls konstant bleibt, kann man beide gleichsetzen

$$\vec{L}_{waag} = \vec{L}_{senkrecht} \quad (21)$$

$$I_{waag} \vec{\omega}_{waag} = I_{senkrecht} \vec{\omega}_{senkrecht}. \quad (22)$$

Durch Umformen ergibt sich dann für die Winkelgeschwindigkeit, wenn der Besen senkrecht liegt

$$\vec{\omega}_{senkrecht} = \frac{I_{waag}}{I_{senkrecht}} \vec{\omega}_{waag}. \quad (23)$$

Da  $I_{waag} > I_{senkrecht}$ , ist das Verhältnis  $\frac{I_{waag}}{I_{senkrecht}} > 1$  und somit muss gelten

$$\vec{\omega}_{senkrecht} > \vec{\omega}_{waag}. \quad (24)$$

## Variante

### Material

- Gut drehbarer Drehtisch
- 2 Gewichte

### Aufbau und Durchführung

Die Versuchsperson stellt sich wieder auf den Drehtisch, nimmt die Gewichte in die Hände und streckt die Arme waagrecht zur Seite aus. Eine weitere Person versetzt den Tisch in Drehung. Die Versuchsperson zieht die Gewichte langsam zu sich heran.

### Beobachtung

Zieht die Versuchsperson die Gewichte zum Körper, beginnt der Tisch schneller zu drehen.



Abb. 65 Die Arme mit den Gewichten sind ausgestreckt



Abb. 66 Die Gewichte sind an den Körper herangezogen

### Physikalischer Hintergrund

Auch hier wird das Trägheitsmoment durch das Heranziehen der Gewichte verringert und als Resultat vergrößert sich die Winkelgeschwindigkeit.

Es gilt

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2 . \quad (25)$$

$I_1$  ... Trägheitsmoment bei ausgestreckten Armen

$I_2$  ... Trägheitsmoment bei eingezogenen Armen

$\omega_1$  ... Winkelgeschwindigkeit bei ausgestreckten Armen

$\omega_2$  ... Winkelgeschwindigkeit bei eingezogenen Armen

**Bemerkung**

Diesen physikalischen Zusammenhang nutzen die Eiskunstläufer aus, wenn sie eine Pirouette drehen. Beim Schwungholen haben sie die Arme ausgebreitet. Ab einer gewissen Geschwindigkeit können sie aus eigener Kraft nicht mehr beschleunigen. Indem sie die Arme zu ihrem Körper ziehen, verringern sie das Trägheitsmoment und durch die Drehimpulserhaltung beginnen sie sich noch schneller zu drehen.

## 2.2.5 Dynamische Grundgleichung der Drehbewegung

Für die Beschleunigung eines Körpers ist eine Kraft verantwortlich

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (26)$$

|           |                     |                |
|-----------|---------------------|----------------|
| $\vec{F}$ | [Nm]                | Kraft          |
| $m$       | [kg]                | Masse          |
| $\vec{a}$ | [ms <sup>-2</sup> ] | Beschleunigung |

Die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  ist nach (16) das Produkt aus Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}$  und dem Radius  $r = \text{const}$ .

$\vec{v}$  können wir nun in die Gleichung (26) einsetzen

$$\vec{F} = m \cdot r \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (27)$$

Die Gleichung (27) wird mit  $r$  multipliziert

$$\vec{F}r = mr^2 \frac{d\vec{\omega}}{dt}, \quad (28)$$

wobei wir  $F \cdot r$  bereits als Drehmoment  $\vec{T}$  definiert haben,  $mr^2$  das Trägheitsmoment  $I$  und  $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$  die Winkelbeschleunigung  $\vec{\alpha}$  ist.

Daraus ergibt sich nun die dynamische Grundgleichung der Drehbewegung

$$\vec{T} = I\vec{\alpha}. \quad (29)$$

## Beschleunigte Bewegung bei der Rotation

### Material

- Scheibe mit Loch in der Mitte
- runder Stab mit selbem Durchmesser, wie das Loch der Scheibe hat (50 cm lang)
- Faden
- Gewicht
- 2 Dreikantleisten (ca. 5 cm)
- 4 Nägel
- färbiger Klebestreifen
- 2 gleich hohe Tische

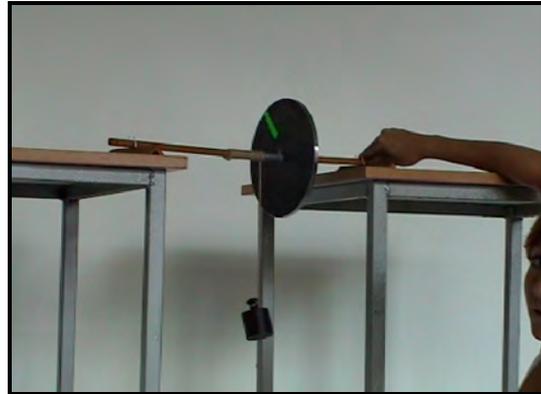


Abb. 67 Beschleunigte Bewegung bei der Rotation

### Aufbau und Durchführung

Der Stab wird durch die Scheibe gesteckt, so dass sich die Scheibe in der Mitte befindet und fest hält. Falls der Durchmesser des Stabes etwas kleiner als das Loch der Scheibe ist, kann man an der Stelle,

wo sich die Scheibe befinden soll, etwas Klebeband befestigen, damit er breiter wird. Neben der Scheibe wird die Schnur befestigt und aufgewickelt. An das Ende der Schnur wird das Gewicht geknüpft.

In die zwei Dreiecksleisten schlägt man an einer Kante jeweils zwei Nägel ein, deren Abstand etwas größer als der Durchmesser des Stabes ist. (Siehe Abb. 68)

Die Tische stellt man mit einem Abstand von 30 cm auf. Auf die parallelen Tischkanten legt man die Dreiecksleisten mit den Nägeln nach oben und zwischen den Nägeln wird der Stab gelegt, so dass die Scheibe sich schön drehen kann und das Gewicht hinunterfallen kann.

Um die Bewegung der Scheibe besser zu sehen, kann man einen färbigen Klebestreifen von außen nach innen auf der Scheibe befestigen.

Das Gewicht wird nun losgelassen.

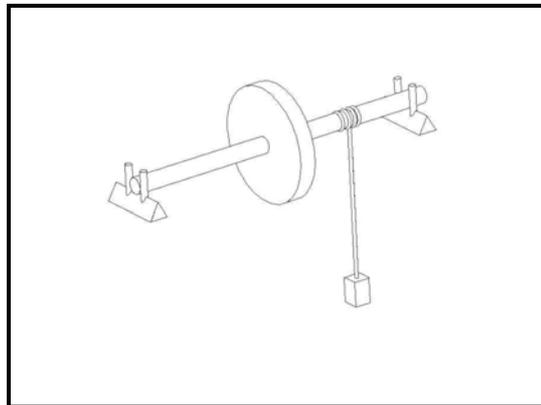


Abb. 68 Versuchsaufbau

## Beobachtung

Die Scheibe rotiert immer schneller, bis das Gewicht am Boden ankommt.

## Physikalischer Hintergrund

Das hinunterfallende Gewicht erzeugt an der Stange und somit auch an der darauf befestigten Scheibe ein Drehmoment nach (3).  $\vec{r}$  ist hier der Vektor der hinunterhängenden Schnur, also Abstand von der Stange zum Gewicht und  $\vec{F}_S$  die Seilkraft

$$\vec{F}_S = m(\vec{g} + \vec{a}). \quad (30)$$

$m$  ... Masse des Gewichtes

$\vec{g}$  ... Erdbeschleunigung

$\vec{a}$  ... Beschleunigung

Die Beschleunigung  $\vec{a}$  wird immer größer und somit wird das Drehmoment nach (29), das an die Stange angreift, auch immer größer.

Da sich das Trägheitsmoment  $I$  der Stange und der Scheibe nicht ändert, muss sich die Winkelbeschleunigung  $\vec{\alpha}$  vergrößern, darum wird die Drehung der Scheibe immer schneller.

## Bemerkung

In Analogie zur beschleunigten Bewegung bei der Rotation ist der Versuchsaufbau zur beschleunigten Bewegung bei der Translation in Abbildung 69 dargestellt.

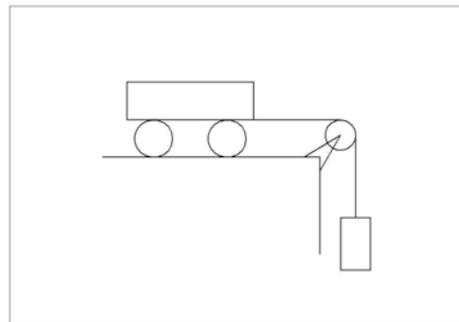


Abb. 69 Beschleunigte Bewegung bei der Translation

## Trägheitsmoment von Trinkhalmen

### Material

- 2 gleich lange Trinkhalme
- 4 Büroklammern
- Schere

### Aufbau und Durchführung

In jedes Ende eines Trinkhalmes wird eine Büroklammer geschoben. Die Enden des zweiten Trinkhalms werden 1,5 cm

eingeschnitten. Man steckt in jedes Ende dieses Trinkhalms eine Büroklammer, allerdings weiter nach innen.

Man nimmt die Trinkhalme abwechselnd zwischen Daumen und Zeigefinger, so dass der Trinkhalm in der Mitte liegt, und beginnt die Halme hin und her zu wippen.

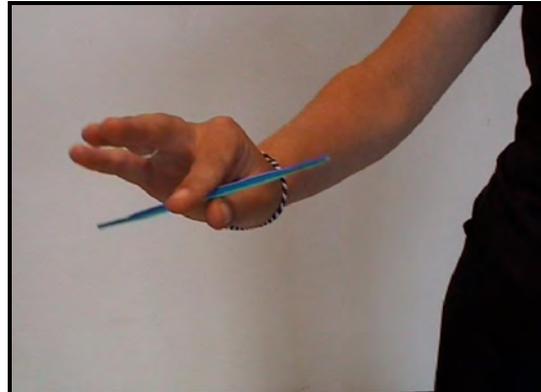


Abb. 70 So hält man die Trinkhalme

### Beobachtung

Der Trinkhalm, an dem die Büroklammern weiter außen befestigt sind, lässt sich schwerer beschleunigen und wieder abbremsen als der Trinkhalm mit den weiter innen liegenden Büroklammern.

### Physikalischer Hintergrund

Die Winkelbeschleunigung  $\vec{\alpha}$  der Trinkhalme ist annähernd die gleiche. Sie ist nach (29) definiert.  $\vec{T}$  ist hier das Drehmoment, das die Finger auf die Trinkhalme übertragen, und  $I$  das Trägheitsmoment.

Da das Trägheitsmoment der Trinkhalme mit den Büroklammern außen viel größer ist als das des anderen Trinkhalms, muss auf ihn ein größeres Drehmoment wirken, da ja die Winkelbeschleunigungen gleich sind.

Das Drehmoment nach setzt sich nach (3) aus der Kraft  $\vec{F}$  und dem Vektor  $\vec{r}$  zwischen Angriffspunkt der Kraft (Trinkhalmmitte) und den Enden der Trinkhalme zusammen.

Da  $r$  für beide Trinkhalme dasselbe ist, muss sich bei einem größeren Drehmoment die Kraft vergrößern.

Das heißt also, dass man beim Trinkhalm mit den Büroklammern außen für die Beschleunigung mehr Kraft anwenden muss, und das fühlt man.

### Welcher Stab fällt schneller um?

#### **Material**

- 2 Trinkhalme
- 2 Murmeln
- Klebeband

#### **Aufbau und Durchführung**

Von einem Trinkhalm werden zwei 4 cm lange Stücke abgeschnitten.

Zwischen den 4 cm langen Trinkhalmstücken wird eine Murmel geklebt. An ein Ende des zweiten Trinkhalms klebt man die zweite Murmel. Nun hat man zwei Stäbe, deren Schwerpunkte in unterschiedlicher Höhe liegen.

Die Stäbe werden nebeneinander gelegt und am unteren Ende mit einem kurzen Klebestreifen auf dem Tisch befestigt.

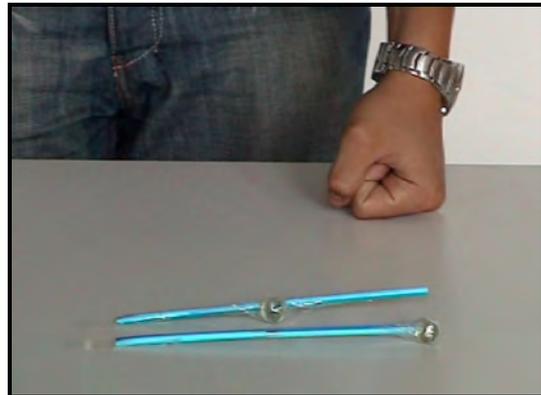
Danach legt man die unten befestigten Stäbe

um und klebt an derselben Stelle, nur auf der anderen Seite, noch einmal ein Klebeband darüber, so dass die Endpunkte der Stäbe gut am Tisch befestigt sind.

Man hält die Trinkhalme nun aufrecht mit einem kleinen Neigungswinkel und lässt sie fallen.

#### **Beobachtung**

Der Trinkhalm mit der Murmel in der Mitte fällt schneller um.



**Abb. 71** Die zwei Stäbe nebeneinander liegend



**Abb. 72** Der Stab mit der Murmel in der Mitte fällt schneller um

## Physikalischer Hintergrund

Hier kann man annehmen, dass der Trinkhalm masselos ist und der Schwerpunkt des Trinkhalmes der Schwerpunkt der Murmel ist.

Durch die Gewichtskraft wirkt auf die Stäbe ein Drehmoment  $T$  um einen festen Drehpunkt, der die Befestigung der Stäbe am Tisch ist.

Die Gewichtskraft ist nach (13) definiert, wobei  $m$  die Masse der Murmeln ist.

Für das daraus resultierende Drehmoment ergibt sich dann die Formel

$$T = rmg \cdot \cos \beta . \quad (31)$$

$m$  ... Masse des Stabes

$r$  ... Abstand zwischen Schwerpunkt des Stabes und Drehpunkt

$\beta$  ... Winkel zwischen Tisch und aufgerichtetem Stab

Das Trägheitsmoment  $I$  des Stabes setzt sich aus der Masse  $m$  und dem Abstand  $r$  nach (11) zusammen.

Nun kann man die Winkelbeschleunigung  $\alpha$ , die die Stäbe beim Loslassen erfahren, nach (29) beschreiben.

Durch Einsetzen von (11) und (31) in (29) erhält man für  $\alpha$

$$\alpha = \frac{rmg \cdot \cos \beta}{mr^2} . \quad (32)$$

$m$  und  $r$  kann man kürzen

$$\alpha = \frac{1}{r} g \cdot \cos \beta . \quad (33)$$

Das heißt, je weiter der Schwerpunkt vom Drehpunkt entfernt ist, desto kleiner ist die Winkelbeschleunigung  $\alpha$ .

Da der Schwerpunkt des Stabes mit der Murmel in der Mitte näher beim Drehpunkt liegt, fällt er auch schneller um als der Stab mit der Murmel am Ende.

## 2.2.6 Hauptträgheitsmomente

Es gibt drei ausgezeichnete Achsen durch den Schwerpunkt, die normal aufeinander stehen. Um diese Achsen nimmt das Trägheitsmoment entweder ein Maximum, ein Minimum oder einen Sattelpunkt an. Diese Trägheitsmomente heißen Hauptträgheitsmomente und die dazugehörigen Achsen nennt man Hauptträgheitsachsen.

### Hauptträgheitsachsen einer Schachtel

#### Material

- Schachtel

#### Aufbau und Durchführung

Die Schachtel wird um jede der in der Abbildung 76 eingezeichneten Achsen hochgeworfen.

#### Beobachtung

Um die Achsen A und B dreht sich die Schachtel gleichmäßig.

Bei der Drehung um die Achse C beginnt die Schachtel zu torkeln und man kann sie nicht mehr in der Lage auffangen, in welcher man sie hochgeworfen hat.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Achsen A, B und C sind Hauptträgheitsachsen. Um diese Achsen ist freie Rotation möglich.

A ist die Achse, bei der das Trägheitsmoment ein Maximum annimmt. Drehungen um diese Achse sind stabil.



Abb. 73 Rotation um die Achse A



Abb. 74 Rotation um die Achse C

Die Achse B ist diejenige mit dem minimalen Trägheitsmoment, auch hier sind die Drehungen stabil.

Bei der Achse C nimmt das Trägheitsmoment einen Sattelpunkt an. Die Schachtel beginnt bei der Drehung um diese Achse zu torkeln, die Drehung ist labil.

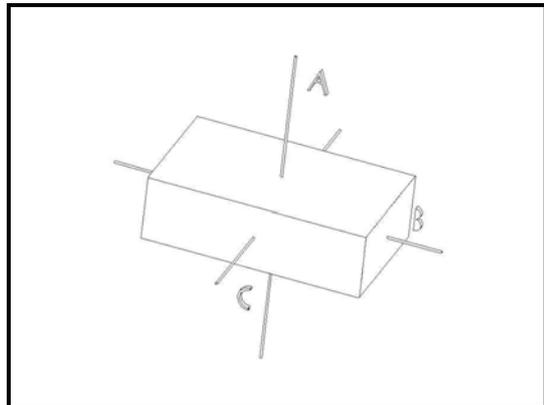
Man nennt die Achsen A und B auch freie Achsen, weil die Rotation um sie stabil ist.

### **Bemerkung**

Beim Auswuchten von Rädern sorgt man dafür, dass das Rad sich um eine freie Achse dreht, sonst kann beim Rotieren der Räder ein Drehmoment entstehen, das eventuell zu Schüttelbewegungen und zur Zerstörung von Lagern und Aufhängungen führt.



**Abb. 75** Torkelbewegung um die Achse C



**Abb. 76** Lage der Hauptträgheitsachsen

## 2.2.7 Der Drehimpuls

Der Drehimpuls  $\vec{L}$  beschreibt die Richtung und Geschwindigkeit bei einer Drehbewegung um einen bestimmten Punkt.

Wird der Bahnimpuls

$$p = mv \quad (34)$$

mit dem Radius  $r$  der Kreisbahn multipliziert, erhält man den Drehimpuls

$$L = mvr = mr^2\omega = I\omega \quad (35)$$

mit (11) und (16).

|          |                 |                       |
|----------|-----------------|-----------------------|
| $L$      | $[kgm^2s^{-1}]$ | Drehimpuls            |
| $v$      | $[s^{-1}]$      | Geschwindigkeit       |
| $r$      | $[m]$           | Bahnradius            |
| $\omega$ | $[s^{-1}]$      | Winkelgeschwindigkeit |

Wenn sich ein starrer Körper um eine Achse dreht, führen alle Massenpunkte Kreisbewegungen mit der Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}$  aus.

Die skalare Definition des Drehimpulses ist

$$L = \sum_i m_i r_i^2 \omega. \quad (36)$$

Der Drehimpuls ist eine vektorielle Größe

$$\vec{L} = m\vec{r} \times \vec{v}. \quad (37)$$

Nach der Rechtsschraubenregel hat er die gleiche Richtung wie die Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}$ . Das Trägheitsmoment ist hier eine skalare Größe, weil es sich um Drehungen um feste Achsen handelt

$$\vec{L} = I\vec{\omega}. \quad (38)$$

Den Drehimpuls kann man aber auch anhand der Grundgleichung der Drehbewegung definieren

$$\vec{T} = I\vec{\alpha} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt}. \quad (39)$$

Wird der Drehimpuls nach der Zeit abgeleitet, so erhält man das Drehmoment. Das bedeutet, dass eine Änderung des Drehimpulses ein Drehmoment bewirkt. Man nennt dieses Prinzip das „Aktionsprinzip der Drehbewegung“

$$\vec{T} = \frac{d\vec{L}}{dt}. \quad (40)$$

Für den Drehimpuls gilt auch ein Erhaltungssatz:

„In einem abgeschlossenen System bleibt die vektorielle Summe aller Drehimpulse konstant.“

Die mathematische Formulierung lautet

$$\vec{L}_{ges} = \sum_i \vec{L}_i = const. \quad (41)$$

## Die kreisende Kugel

### Material

- Kugel
- Schnur (ca. 1 m)
- leere Zwirrspule

### Aufbau und Durchführung

Die Kugel wird an einem Ende der Schnur befestigt. Das andere Ende der Schnur fädelt man durch die Zwirrspule, bis etwa 20 cm von ihr herabhängt. Man bringt nun die Kugel dazu, um die Zwirrspule zu kreisen. Danach zieht man langsam an dem Faden, damit der Abstand zwischen Zwirrspule und Kugel verkleinert wird.



Abb. 77 Die kreisende Kugel

### Beobachtung

Je kürzer der Abstand zwischen Kugel und Zwirrspule ist, desto schneller beginnt die Kugel zu kreisen.

### Physikalischer Hintergrund

Durch das Anziehen an der Schnur wird der Bahnradius verkleinert und somit auch das Trägheitsmoment  $I$  nach (11).

$m$  ... Masse der Kugel (Masse der Schnur kann vernachlässigt werden)

$r$  ... Bahnradius

Der Gesamtdrehimpuls  $\vec{L}_{ges}$  bleibt nach (41) innerhalb des Systems konstant. Die Gesamtenergie wird aber aufgrund der Zentripetalkraft

$$F_{ZP} = m\omega^2 r \quad (42)$$

größer.

Das bedeutet: Wenn das Trägheitsmoment  $I$  kleiner wird, muss sich die Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}$  vergrößern. Darum kreist die Kugel bei kleinerem Bahnradius viel schneller um die Zwirrspule.

## **Bemerkung**

Mit diesem Versuch kann man schön das 2. Keplersche Gesetz zeigen. Es lautet:

*„Der Fahrstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.“*

Das bedeutet, dass die Planeten, die sich näher bei der Sonne befinden auch schneller um diese kreisen.

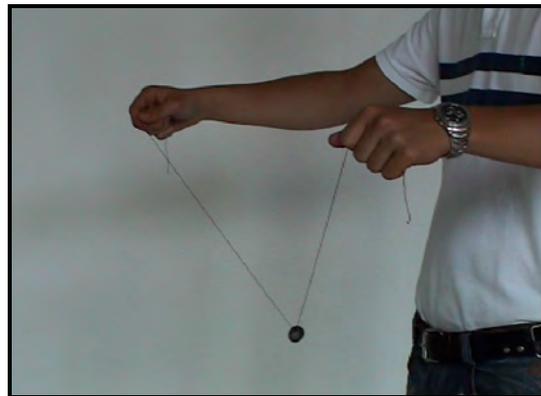
## **Knopfirouette**

### **Material**

- Knopf
- Faden (60 cm lang)

### **Aufbau und Durchführung**

Der Faden wird durch den Knopf gefädelt, bis sich der Knopf in der Mitte des Fadens befindet.



**Abb. 78** Versuchsaufbau

Man nimmt beide Fadenenden in die Hand, so dass der Faden horizontal liegt, aber nur lose gespannt ist, und lässt den Knopf kreisen.

Während der andauernden Rotation entfernt man die Hände langsam voneinander.

### **Beobachtung**

Je weiter sich die Hände voneinander entfernen, desto schneller kreist der Knopf.

### **Physikalischer Hintergrund**

Wenn wir die Hände auseinander bewegen, verringert sich der Radius der Kreisbahn, die der Knopf ausführt, und dadurch wird auch das nach (11) Trägheitsmoment  $I$  kleiner.

Da der Gesamtdrehimpuls  $\vec{L}_{ges}$  nach (41) konstant bleibt und das Trägheitsmoment sich verkleinert, wird die Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}$  größer und als Folge dessen kreist auch der Knopf schneller.

## Rad auf einem Drehtisch

### Material

- Drehtisch
- Rad, das um eine Achse drehbar ist

### Versuch 1

#### Aufbau und Durchführung

Die Versuchsperson steht auf dem ruhenden Drehtisch und hält das Rad so, dass die Achse des Rades parallel zur Drehstuhlachse liegt.

Nun wird das Rad von der Person angedreht.



Abb. 79 Das Rad am Drehtisch

#### Beobachtung

Sobald das Rad in Bewegung ist, beginnt der Drehtisch in die entgegengesetzte Richtung zu rotieren.

#### Physikalischer Hintergrund

Wenn der Drehtisch und das Rad in Ruhe sind ( $\omega_1 = \omega_2 = 0$ ), so sind auch die Drehimpulse am Drehtisch  $L_1$  und am Rad  $L_2$  Null.

Daraus ergibt sich für den Gesamtdrehimpuls des ruhenden Systems

$$L_{ges} = L_1 + L_2 = 0. \quad (43)$$

Durch das Andrehen des Rades entsteht ein kurzes Drehmoment, das einen Drehimpuls  $L_2$  erzeugt. Da nach dem Drehimpulssatz der Gesamtdrehimpuls erhalten bleibt, ergibt sich

$$L_1 = -L_2. \quad (44)$$

Der Drehtisch beginnt sich also als Ausgleich zu drehen, er erhält den gleichen Drehimpuls wie das Rad. Das Minus vor dem  $L_2$  bedeutet, dass sich der Drehtisch in die andere Richtung dreht.

## ***Versuch 2***

### **Aufbau und Durchführung**

Die Person steht auf dem ruhenden Drehtisch und bekommt ein rotierendes Rad in die Hand. Sie bremst nun das Rad ab.

### **Beobachtung**

Wenn die Versuchsperson das rotierende Rad in die Hand bekommt, beginnt sich der Drehtisch nicht zu drehen.

Wird das Rad abgebremst, fängt der Tisch an, sich in die Richtung zu drehen, in die sich das Rad zuerst gedreht hat.

### **Physikalischer Hintergrund**

Das Rad, das übergeben wurde, hat einen bestimmten Drehimpuls  $L_1$ . Der Tisch beginnt sich jedoch nur dann zu drehen, wenn die Person innerhalb des Systems den Drehimpuls ändert. Das geschieht, wenn sie das Rad abbremst.



**Abb. 80** Das Rad wird außerhalb des Systems angedreht

## ***Versuch 3***

### **Aufbau und Durchführung**

Die Versuchsperson steht auf dem Drehtisch und bekommt ein drehendes Rad mit der Achse parallel zur Tischachse in die Hand. Sie kippt das Rad, bis die Achsen senkrecht aufeinander stehen.

Danach kippt sie es noch einmal, bis das Rad insgesamt um  $180^\circ$  gedreht wurde.



**Abb. 81** Das rotierende Rad wird übergeben

### Beobachtung

Nachdem das rotierende Rad übergeben wurde, dreht sich der Drehstuhl nicht. Es beginnt sich erst zu drehen, wenn das Rad gekippt wird. Wurde die Achse um  $180^\circ$  gekippt, dreht er sich schneller.

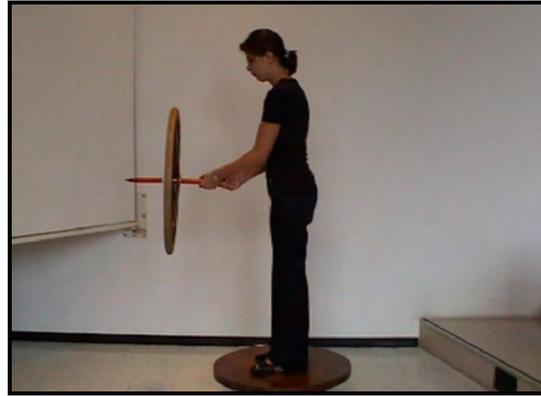


Abb. 82 Das Rad wird um  $90^\circ$  gekippt

### Physikalischer Hintergrund

Am Anfang dreht sich der Drehtisch nicht, der Drehimpuls  $L_1$  ist Null. Das Rad rotiert bereits und hat den Drehimpuls  $L_2$ . Wenn die Person nun das drehende Rad in die Hand bekommt, wird innerhalb des Systems der Drehimpuls nicht geändert, der Tisch bleibt in Ruhe.



Abb. 83 Das Rad wird um insgesamt  $180^\circ$  gekippt

Der Gesamtdrehimpuls  $L_{ges}$  ist nach (41) konstant

Wenn das Rad in die Horizontale geschwenkt wird, gilt für den Gesamtdrehimpuls

$$L_{ges} = 0 + L_1' = const. \quad (45)$$

Daraus folgt

$$L_1' = L_2. \quad (46)$$

Das bedeutet, dass der Tisch nun denselben Drehimpuls erfährt wie das Rad bei der Übergabe.

Wenn man die Radachse um weitere  $90^\circ$  dreht, gilt für den Gesamtdrehimpuls

$$L_{ges} = L_2 + 0 = -L_2 + L_1' \quad (47)$$

$$\Rightarrow L_1' = 2L_2. \quad (48)$$

Der Drehtisch erfährt insgesamt den doppelten Drehimpuls.

## Die rotierende Bohrmaschine

### Material

- Bohrmaschine
- reißfeste Schnur
- Stativ zum Aufhängen

### Aufbau und Durchführung

Die Bohrmaschine wird mit der Schnur senkrecht aufgehängt, so dass der rotierende Teil unten hängt. (Siehe Abb.85)

Der Schalter der Bohrmaschine wird fixiert. Nun steckt man die Bohrmaschine nur für sehr kurze Zeit am Strom an.

### Beobachtung

Wird die Bohrmaschine angesteckt, dreht sich das Gehäuse in die entgegengesetzte Richtung wie der Rotor.



Abb. 84 Die rotierende Bohrmaschine

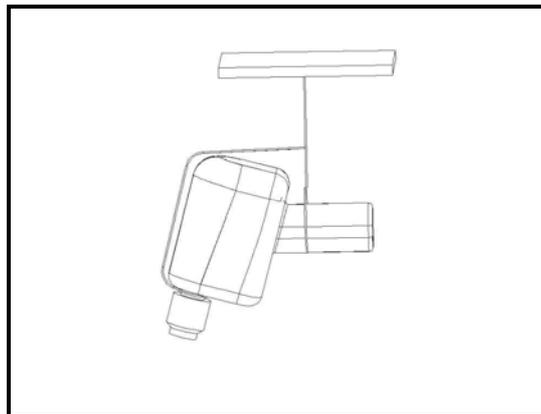


Abb. 85 Aufhängevorrichtung für die Bohrmaschine

### Physikalischer Hintergrund

Wenn die Bohrmaschine in Ruhe hängt, ist der Gesamtdrehimpuls  $L_{ges}$  Null.

Durch das Anstecken an der Stromquelle beginnt das Bohrfutter zu rotieren. Es erfährt einen Drehimpuls  $L_1$ . Da der Drehimpuls innerhalb des Systems geändert wurde, erfährt auch die gesamte Bohrmaschine als Ausgleich einen Drehimpuls  $L_2$ .

Der Gesamtdrehimpuls bleibt nach (43) bzw. (44) erhalten, dass die Bohrmaschine in die entgegengesetzte Richtung rotiert.

Nun wird wieder der Drehimpuls im gesamten System geändert, indem man die Bohrmaschine ausschaltet. Das Bohrfutter wird abgebremst, deshalb beginnt sich auch die Bohrmaschine in die andere Richtung zu drehen.

## „Wedeln“

### Material

- Blatt Papier oder Drehtisch

### Aufbau und Durchführung

Die Versuchsperson stellt sich auf das Blatt Papier oder auf den Drehtisch. Sie verdreht nun den Körper ruckartig in eine Richtung und dann in die andere Richtung.



**Abb. 86** Oberkörper und Beine drehen sich in entgegengesetzte Richtung

### Beobachtung

Die Beine drehen sich auf dem Papier bzw. auf dem Drehtisch in die andere Richtung.

### Physikalischer Hintergrund

Vor der Drehbewegung des Oberkörpers ist der Gesamtdrehimpuls  $L_{ges}$  nach (43) Null.

Durch das ruckartige Drehen wird der Drehimpuls innerhalb des Systems „menschlicher Körper“ geändert (44).

$L_1$  ... Drehimpuls, den der Oberkörper erfährt

$L_2$  ... Drehimpuls, den die Beine erfahren

Die Beine erfahren also als Ausgleich einen Drehimpuls in die entgegengesetzte Richtung wie die Drehung beim Oberkörper.

### Bemerkung

Bei Sportarten wird diese Art von Ausgleich oft angewandt, so z. B. beim Wedeln beim Schifahren oder beim Turmspringen.

Wenn eine Katze aus einer großen Höhe hinunterfällt, erreicht sie durch kräftige Drehung des Hinterteils, dass sie wieder auf den Beinen landet. Durch den Drehimpulsausgleich kann sie ihrem Körper die richtige Richtung geben.

## Der Wackelstein

### Material

- Wackelstein

### Aufbau und Durchführung

Der Wackelstein wird auf den Tisch gelegt. Einmal wird er nach rechts gedreht und einmal nach links.



Abb. 87 Der Wackelstein

### Beobachtung

In eine Richtung dreht sich der Wackelstein mit konstanter Geschwindigkeit. Dreht man ihn in die andere Richtung beginnt er jedoch nach einiger Zeit zu schwingen, stoppt und dreht sich in die andere Richtung weiter.

### Physikalischer Hintergrund

Jeder Wackelstein hat eine stabile Drehrichtung, wo nur Drehung auftritt. Dreht man ihn jedoch in die andere Richtung, beginnt er zu schlagen und erfährt aufgrund der Reibungskraft ein Drehmoment, solange, bis er sich wieder in die stabile Drehrichtung dreht.

Jeder starre Körper besitzt drei Hauptträgheitsachsen, die durch dessen Schwerpunkt gehen. Der Wackelstein sieht zwar auf den ersten Blick symmetrisch aus, ist es aber nicht. Beim ihm stimmen die Richtungen der Hauptträgheitsachsen nicht mit den geometrischen Symmetrieachsen überein und eine der Trägheitsachsen führt etwas schräg durch dessen plane Oberfläche. Dies wird durch eine leicht asymmetrische Massenverteilung hervorgerufen: Die Rundung der Unterseite kann z. B. etwas schief sein. Ein Wackelstein besitzt also eine Unwucht und schlägt deshalb. Wird er entgegen seiner Vorzugsdrehrichtung gedreht, rollt er etwas unsymmetrisch auf dem ellipsoiden Unterteil ab und fängt wegen der Reibung an zu wackeln. Wackelt ein Wackelstein, gibt es horizontale Reibungskräfte am Kontaktpunkt Tisch-Wackelstein in Tischebene. Er kippt bei jeder Schwingung leicht auf die Seite mit dem Übergewicht und die Reibung erzwingt eine kleine Drehung um seine vertikale Achse. Bei jeder Schwingung geht ein wenig der Energie in Drehbewegung über, bis sich der Wackelstein nur noch dreht (in Vorzugsrichtung). Eine möglichst exakte Erklärung ist nur

mittels komplizierter, unanschaulicher Kreiselgesetze möglich und es gibt eine Fülle von Veröffentlichungen.<sup>3</sup> [4]

### **Bemerkung**

Ursprünglich wurde solch ein Wackelstein "Celt" genannt, weil die seltsame Bewegung bei archäologischen Untersuchungen an prähistorischen keltischen Äxten und Steinkeilen entdeckt wurde.

Wackelsteine sind durch Verwitterung entstandene Felsblöcke, die sehr leicht beweglich sind und auf ihrer Unterlage balancieren. Deshalb waren sie bereits bei den Kelten Kultobjekte und werden auch Keltensteine oder Celt genannt.

In Österreich findet man solche Felsblöcke im Waldviertel.

---

<sup>3</sup> <http://www.wundersamessammelsurium.de/Mechanisches/KeltischerWackelstein/index.html>

## 2.2.8 Analogien Translation und Rotation

| Rotation   | Translation   |
|--|---|
| Drehwinkel $\varphi$   | Ortsvektor $\vec{r}$  |
| Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$   | Geschwindigkeit $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$               |
| Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha} = \dot{\vec{\omega}}$           | Beschleunigung $\vec{a} = \dot{\vec{v}}$                      |
| Rotationsenergie $W_k = \frac{1}{2}\omega^2 I$                     | Translationsenergie $W_k = \frac{1}{2}mv^2$                   |
| Trägheitsmoment $I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$                       | Masse $m$   |
| Drehmoment $\vec{T}$   | Kraft $\vec{F}$   |
| Drehimpuls $\vec{L} = I\vec{\omega}$                               | Impuls $\vec{p} = m\vec{v}$                                   |
| Bewegungsgleichung $\vec{T} = \dot{\vec{L}} = I\dot{\vec{\omega}}$ | Bewegungsgleichung $\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m\dot{\vec{v}}$ |
| Erhaltungssatz:<br>$\vec{L}_{ges} = \sum_i \vec{L}_i = const$      | Erhaltungssatz:<br>$\vec{p}_{ges} = \sum_i \vec{p}_i = const$ |

## 2.3 Drehbewegungen um freie Achsen

Hier ist der Körper nur in einem oder in überhaupt keinem Punkt fixiert. Er dreht sich um Achsen, die durch diesen Punkt und den Massenmittelpunkt gehen.

Eine freie Achse ist eine Drehachse durch den Schwerpunkt, bei welcher der Körper eine Drehbewegung ausführt, ohne dass auf ihn äußere Kräfte wirken. Das heißt, dass auf diese Drehachse kein Drehmoment bzw. Kräftepaar wirken darf. Die Rotation um freie Achsen muss daher stabil sein.

Stabile Achsen sind nur diejenigen des größten und kleinsten Trägheitsmoments durch den Massenmittelpunkt, wobei die Achse mit größtem Trägheitsmoment stabiler ist.

## Nachweis von freien Achsen an verschiedenen Körpern

### Material

- Bohrmaschine
- Holzklotz
- Schraube
- Rohr mit Loch am Rand
- rechteckige Metallplatte mit Loch am Rand
- reißfester dünner Faden

### Aufbau und Durchführung

In den Holzklotz wird an der kleinsten Seitenfläche zentriert eine Schraube gebohrt, an der man einen etwa 30 cm langen Faden befestigt.

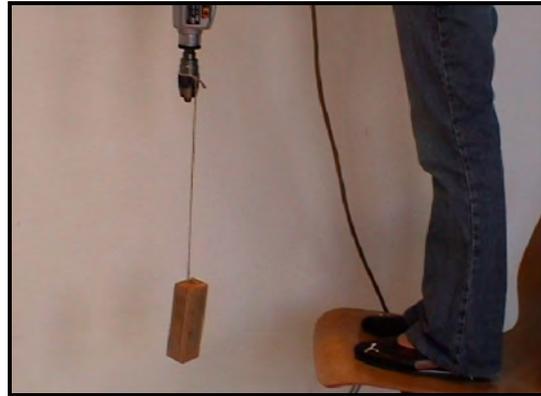
Durch die Löcher im Rohr und in der Platte werden auch 30 cm lange Fäden geknüpft.

Dann nimmt man den Faden am Holzklotz und befestigt das lose Ende gut am Bohrfutter und schaltet die Bohrmaschine ein.

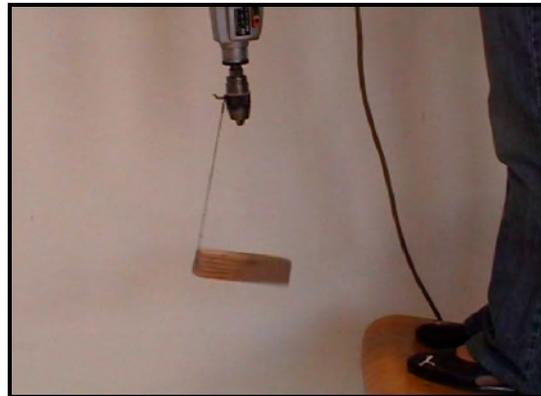
Danach führt man dasselbe mit den anderen Gegenständen durch.

### Beobachtung

Die Gegenstände beginnen zu rotieren und nach einer gewissen Zeit beginnen sie sich stabil, also ohne jede Torkelbewegung, um eine Achse zu drehen. Schaltet man die Bohrmaschine aus, rotieren sie einige Zeit um diese Achse weiter.



**Abb. 88** Der Klotz dreht sich um die Achse mit kleinstem Trägheitsmoment



**Abb. 89** Der Klotz dreht sich um die Achse mit größtem Trägheitsmoment



**Abb. 90** Das Quadrat dreht sich um die Achse mit minimalem Trägheitsmoment

### Physikalischer Hintergrund

Die Gegenstände sind nicht an eine raumfeste Achse gebunden, daher sind nur Drehungen um die Achsen mit größtem und kleinstem Trägheitsmoment stabil. Das bedeutet, dass kleine Störungen die Bewegung des Körpers nicht ändern können. Am Anfang drehen sich die Gegenstände um eine Hauptträgheitsachse, die minimal ist. Durch die große Störung, die die Drehung verursacht, geht die Bewegung aber in eine Drehung um eine andere Hauptträgheitsachse über, welche das größte Trägheitsmoment hat. Hier ist die Rotation stabiler.



**Abb. 91** Das Quadrat dreht sich um die Achse mit maximalem Trägheitsmoment



**Abb. 92** Das Rohrstück rotiert um die Achse mit kleinstem Trägheitsmoment



**Abb. 93** Das Rohrstück rotiert um die Achse mit größtem Trägheitsmoment

## Frisbee

### **Material**

- Frisbeescheibe

### **Aufbau und Durchführung**

Die Frisbeescheibe wird geworfen.

### **Beobachtung**

Wenn man die Frisbeescheibe richtig weggeworfen hat, ist die Drehung stabil, die Scheibe beginnt nicht zu torkeln.



**Abb. 94** Der Frisbee wurde geworfen

### **Physikalischer Hintergrund**

Die Symmetrieachse des Frisbees ist eine freie Achse. Solange die Scheibe um diese Achse rotiert, ist die Bewegung der Scheibe stabil.

## Bibliographie

- [1] *Hahn H.:* Physikalische Freihandexperimente, Band 1, Verlag Otto Sale, Berlin, 1905. S. IV.
- [2] *Heyder W.:* Die Stellung des Freihandversuchs im System der Experimente des Physikunterrichts und seine Bedeutung für die Entwicklung des Erkenntnisvermögens der Schüler, Dissertation am Pädagogischen Institut Güstrow der Universität Rostock, 1967. S. 42-43.
- [3] *Korn B.:* Der Freihandversuch in der Sekundarstufe I, Hausarbeit am Institut für Didaktik der Physik der Universität Siegen, 1981. S. 27.
- [4] *Holzhey C. und Puschmann H.:* Der Keltische Wackelstein - ein bemerkenswerter Kreisel, Junge Wissenschaft 1, Heft 2, 1986. S. 6-15.

## Literaturverzeichnis

- *Prof. Dr. Jäger H.:* Skriptum zur Vorlesung Experimentalphysik 1, 26. Auflage, Institut für Experimentalphysik Technische Universität Graz, 2002.
- *Meschede D.:* Gerthsen Physik, 22. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- *Otten E. W.:* Repetitorium Experimentalphysik, Ernst W. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- *Rentzsch W.:* Experimente mit Spaß: Bewegungen und Kräfte, Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, Wien, 1995.
- *Hirschler H. u.a.:* Physikalische Freihandexperimente, Band 1 Mechanik, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2004.
- *Kabus K.:* Mechanik und Festigkeitslehre, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1988.

## Ein herzliches Danke ...

- ... Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Pottlacher für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit verfassen zu können, für seine ausgezeichnete Betreuung und die Verfügungstellung von Räumlichkeiten und Geräten. Seine motivierenden Worte während meiner Arbeit halfen mir besonders.
- ... Herrn Hofrat Dipl.-Ing. Architekt Peter Javurek und Herrn Daniel Gruber für die Hilfestellung beim Bearbeiten der Filme.
- ... Herrn Dr. Boris Wilthan für seine Hilfsbereitschaft.
- ... Stefanie Schwarzl und Thomas Zilk für ihre Bereitschaft, die Experimente vor der Kamera durchzuführen und ihre produktive Mitarbeit.
- ... Katharina Wiespeiner für die gute Zusammenarbeit.
- ... meinem Vater für die Beratung beim Skizzenzeichnen.
- ... meinen Eltern und meinem Bruder für das Korrekturlesen.
- ... meinen Eltern für die moralische und finanzielle Unterstützung während meiner Schul- und Studienzeit.