

Peter Fleißner

**Physikalische Freihandversuche  
zu Hydrostatik und Hydrodynamik**

**Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Magisters  
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Karl-Franzens-Universität Graz

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

Juli 2007

# Danksagung

Zutiefst bedanken möchte ich mich bei Herrn A.o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Pottlacher für die hervorragende Betreuung und die Bereitstellung der meisten Materialien, die für die vielen Experimente nötig waren.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Claus Cagran für die hilfreichen Besprechungen und das zweimalige Korrekturlesen der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Werkstatt der TU Graz für die Bearbeitung einiger Materialien, sowie bei Frau Mag. Katharina Wiespeiner, Herrn Reinhard Holl, Herrn Dr. Boris Wilthan und Herrn Johann Feyferlik für die Mithilfe beim Vorbereiten, Demonstrieren und Filmen der Versuche.

Weiters bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Zentralen Informatikdienstes der TU Graz, ohne deren Einführungen eine sinnvolle Nachbearbeitung der Film-Materialien bzw. das Erstellen der DVD nicht möglich gewesen wäre.

Ich bedanke mich vielmals bei allen Mitarbeiter der TU Graz für deren Unterstützung und die freundschaftliche Atmosphäre.

Am meisten möchte ich mich aber bei meiner gesamten Familie allen voran bei meinen Eltern bedanken, ohne deren Unterstützung das alles nicht möglich gewesen wäre.

Bei meiner Freundin Margret bedanke ich mich sehr herzlich für die oftmals notwendigen Ermutigungen, und weil sie stets ein offenes Ohr für meine Probleme und Anliegen hatte.

An dieser Stelle möchte ich mich aber auch bei all meinen Freunden und Kollegen, die mir vor und während meiner Studienzeit zur Seite gestanden sind, für ihre Freundschaft und die vielen gemeinsamen Stunden bedanken.

Die Arbeit ist meiner kürzlich verstorbenen Großmutter gewidmet.

# INHALTSVERZEICHNIS

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>EINLEITUNG.....</b>                                       | <b>1</b> |
| <b>2</b> | <b>FACHDIDAKTISCHES.....</b>                                 | <b>2</b> |
| 2.1      | Was ist ein Freihandversuch?.....                            | 2        |
| 2.2      | Fachdidaktische Bedeutung eines Experiments.....             | 2        |
| 2.3      | Forderungen des Lehrplans.....                               | 3        |
| 2.3.1    | Forderungen des Lehrplans für die AHS - Unterstufe.....      | 3        |
| 2.3.2    | Forderungen des Lehrplans für die AHS - Oberstufe.....       | 4        |
| <b>3</b> | <b>ELASTOMECHANIK – HYDROSTATIK – AEROSTATIK.....</b>        | <b>6</b> |
| 3.1      | Stoffkonstanten der Elastomechanik.....                      | 6        |
| 3.1.1    | Elastizitätsmodul.....                                       | 6        |
| 3.1.2    | Schubmodul.....  | 8        |
| 3.1.3    | Torsionsmodul.....   | 9        |
| 3.1.4    | Poisson'sche Zahl.....                                       | 10       |
| 3.2      | Grundgesetze der Hydro- und Aerostatik.....                  | 12       |
| 3.2.1    | Der Druck mit einem Bleistift.....                           | 12       |
| 3.2.2    | Die Fakir – Tomate und der Fakir – Apfel.....                | 13       |
| 3.2.3    | Die allseitige Gleichheit des Drucks.....                    | 14       |
| 3.2.4    | Die hydraulische Presse.....                                 | 15       |
| 3.2.5    | Flüssigkeitsoberflächen normal zur resultierenden Kraft..... | 16       |
| 3.2.6    | Schlauchwaage – kommunizierende Gefäße.....                  | 18       |
| 3.2.7    | Der Schlauchheber.....                                       | 19       |
| 3.2.8    | Das offene Manometer.....                                    | 20       |
| 3.2.9    | Ein einfaches Manometer.....                                 | 21       |
| 3.2.10   | Der Torricelli-Versuch.....                                  | 22       |
| 3.2.11   | Die Glaskugel im Glas.....                                   | 24       |
| 3.2.12   | Die Trägheit der Luft.....                                   | 25       |
| 3.2.13   | Die Magdeburger Halbkugeln.....                              | 26       |
| 3.2.14   | Der hydrostatische Druck.....                                | 27       |
| 3.2.15   | Ein Messgerät für den hydrostatischen Druck.....             | 28       |
| 3.2.16   | Flüssigkeitsschichten.....                                   | 30       |
| 3.2.17   | Auftrieb warmer Luft - Das Prinzip des Schornsteins.....     | 31       |
| 3.2.18   | Die Helium – Seifenblasen.....                               | 34       |
| 3.2.19   | Der schwebende Luftballon.....                               | 35       |
| 3.2.20   | Die Libelle.....   | 36       |
| 3.2.21   | Das Umschütten von Luft.....                                 | 37       |
| 3.2.22   | Holz schwimmt nicht.....                                     | 39       |
| 3.2.23   | Der Tischtennisball im Trichter.....                         | 40       |
| 3.2.24   | Die tanzenden Rosinen.....                                   | 41       |
| 3.2.25   | Der Auftrieb und die Balkenwaage.....                        | 42       |
| 3.2.26   | Die Volumenverdrängung.....                                  | 43       |
| 3.2.27   | Der Cartesianische Taucher.....                              | 44       |
| 3.2.28   | Das Aräometer.....   | 46       |
| 3.2.29   | Das schwimmende Ei.....                                      | 47       |
| 3.2.30   | Luftblasen in unterschiedlich gefüllten Gefäßen.....         | 48       |
| 3.2.31   | Cola-Light ist wirklich leichter.....                        | 49       |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>4</b>   | <b>MECHANISCHE GRENZFLÄCHENERSCHEINUNGEN.....</b>              | <b>51</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Oberflächenspannung .....</b>                               | <b>51</b> |
| 4.1.1      | Seifenmembran .....  | 51        |
| 4.1.1.1    | Der bewegliche Faden .....                                     | 51        |
| 4.1.1.2    | Der Würfel.....  | 53        |
| 4.1.1.3    | Das Prisma.....  | 54        |
| 4.1.2      | Büroklammern auf einer Wasseroberfläche.....                   | 55        |
| 4.1.3      | Der Effekt der Oberflächenspannung.....                        | 56        |
| 4.1.4      | Die vereinten Tropfen.....                                     | 57        |
| 4.1.5      | Die große und die kleine Seifenblase.....                      | 58        |
| 4.1.6      | Die Münze zwischen zwei Gläsern.....                           | 59        |
| 4.1.7      | Die verbundenen Wasserstrahlen.....                            | 60        |
| 4.1.8      | Die anhängliche Wasseroberfläche.....                          | 61        |
| <b>4.2</b> | <b>Grenzflächenspannung.....</b>                               | <b>62</b> |
| 4.2.1      | Benetzende Flüssigkeiten.....                                  | 62        |
| 4.2.2      | Nicht - benetzende Flüssigkeiten.....                          | 63        |
| <b>4.3</b> | <b>Kapillarität.....</b>                                       | <b>64</b> |
| 4.3.1      | Kapillar – Röhrchen.....                                       | 64        |
| 4.3.2      | Die Wasser undurchlässige Strumpfhose.....                     | 66        |
| <b>5</b>   | <b>HYDRODYNAMIK UND AERODYNAMIK.....</b>                       | <b>67</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Ideale Flüssigkeiten und Gase: Bernoulli-Gleichung.....</b> | <b>67</b> |
| 5.1.1      | Der einfache Zerstäuber.....                                   | 69        |
| 5.1.2      | Der Papiertrichter im Trichter.....                            | 70        |
| 5.1.3      | Der Tischtennisball im Trichter.....                           | 71        |
| 5.1.4      | Das aerodynamische Paradoxon.....                              | 72        |
| 5.1.5      | Die Münze und das Papierstück.....                             | 72        |
| 5.1.6      | Die klappernden Löffel.....                                    | 73        |
| 5.1.7      | Der Streichholzlift.....                                       | 74        |
| <b>5.2</b> | <b>Strömungsformen .....</b>                                   | <b>75</b> |
| 5.2.1      | Die Kerze hinter der Flasche.....                              | 76        |
| 5.2.2      | Die Kerzenflamme und der Trichter.....                         | 77        |
| 5.2.3      | Den Ball schweben lassen.....                                  | 78        |
| 5.2.4      | Im Windschatten einer Münze.....                               | 79        |
| 5.2.5      | Das fallende Blatt.....  | 80        |
| 5.2.6      | Der fallende Zylinder.....                                     | 81        |
| 5.2.7      | Das Tragflächenmodell.....                                     | 82        |
| 5.2.8      | Der Hubschrauber.....  | 83        |
| <b>5.3</b> | <b>Reale Flüssigkeiten und Gase .....</b>                      | <b>84</b> |
| 5.3.1      | Die Zähigkeit.....   | 84        |
| 5.3.2      | Der Brunnen mit zwei Gläsern.....                              | 86        |
| 5.3.3      | Der Brunnen mit drei Gläsern.....                              | 87        |
| 5.3.4      | Das Flaschenausleeren.....                                     | 88        |
| 5.3.5      | Der Flaschentornado.....                                       | 89        |
| 5.3.6      | Die Karman'sche Wirbelstraße.....                              | 90        |
| 5.3.7      | Die Funktion der Lunge.....                                    | 91        |
| <b>6</b>   | <b>ANHANG.....</b>   | <b>93</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                              | <b>93</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                             | <b>94</b> |

# 1 Einleitung

Die Idee zur Diplomarbeit stammt von meinem Betreuer, Herrn Prof. G. Pottlacher, in dessen Lehrveranstaltung - Schulversuche 2 - an der technischen Universität Graz sich in den letzten 15 Jahren hunderte von Freihandversuchen mit schriftlichen Erklärungen angesammelt haben. Zuerst wurden die ganzen Versuche den jeweiligen Kapiteln der Physik zugeordnet und anschließend gab es für Studenten die Möglichkeit sich für ein Kapitel zu entscheiden, um darüber eine Diplomarbeit zu verfassen. Ich stieß vor fast zwei Jahren zu diesem Projekt und entschied mich für das Kapitel der Hydrostatik und Hydrodynamik; im Nachhinein erweiterte sich mein Themenbereich aber noch um einige Aspekte.

Das Wichtigste dabei sollte aber sein, dass alle Versuche, die in der Arbeit vorkommen, auch gefilmt und mittels einer DVD der Diplomarbeit beigelegt werden. Auf das eigenständige Aufbauen und Filmen der Versuche, das Schneiden der Videos und Kompilieren der resultierenden DVD ist auch das Hauptaugenmerk dieser Arbeit gerichtet. In der Arbeit selbst soll dann das Material, der Aufbau und die Durchführung der Experimente erläutert werden. Abschließend muss zu jeder Sequenz eine einfache, wenn möglich auch für Schüler verständliche, physikalische Erklärung abgegeben werden. Bei den in der Arbeit verwendeten Abbildungen handelt es sich ausschließlich um Standbilder aus meinen Videos. Die an der Technischen Universität vorhandenen Versuche wurden zum Grundgerüst meiner Versuchsliste, die jedoch noch von meinem Betreuer und mir erweitert wurde. An dieser Stelle möchte ich auch gleich auf das Buch, „Physikalische Freihandexperimente“, Band 1, Aulis Verlag Deubner, welches unter der Koordination von Herrn Helmut Hilscher im Jahr 2004 erschienen ist, verweisen. In diesem Buch sind sehr viele in der Diplomarbeit vorkommende Versuche enthalten und bei meinen Erklärungen wird auch manchmal auf die entsprechenden Experimente verwiesen. Bei der Struktur habe ich mich an das Skriptum für Experimentalphysik von Prof. Dr. H. Jäger gehalten, das an der Technischen Universität in der Vorlesung verwendet wird. Hier möchte ich auch gleich auf die anderen Diplomarbeiten verweisen, die über Freihandversuche aus anderen Kapiteln der Experimentalphysik bei Prof. Dr. G. Pottlacher verfasst wurden.

Diese Arbeit sollte vor allem Lehrern und Lehrerinnen den Einbau von Experimenten in deren Unterricht erleichtern, aber auch für Schüler und Physik-Interessierte eine interessante und hoffentlich selbst erklärende Begegnung mit der Physik darstellen.

## 2 Fachdidaktisches

### 2.1 *Was ist ein Freihandversuch?*

Der Begriff Freihandversuch ist erst sehr jung, jedoch interessiert man sich bereits seit ca. hundert Jahren für einfache physikalische Experimente im Unterricht. Die Versuche soll man mit einfachen Hilfsmitteln aus dem täglichen Leben aufbauen können, so dass ihn jeder Schüler mit wenigen Materialien aus dem Haushalt wiederholen kann. Natürlich sollte dies auch jedem Lehrer mit Hilfsmitteln aus dem Physikkabinett möglich sein.

Dazu möchte ich nur ein Zitat von B. Korn erwähnen, dass vor 25 Jahren niedergeschrieben wurde:

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. [1]

### 2.2 *Fachdidaktische Bedeutung eines Experiments*

Experimente sind vor allem im Physikunterricht von sehr großer Bedeutung, jedoch sollte sich jeder Lehrer darüber Gedanken machen, wann, wo und warum er sie zum Einsatz bringen möchte. Um den Unterricht abwechslungsreicher zu gestalten, können Versuche in vielerlei Hinsicht verwendet werden. Man kann sie dazu nutzen, exemplarisch in ein neues Kapitel einzusteigen, oder um das Erlernte mit einem Experiment zu bestätigen. Es bietet sich aber gerade bei Freihandversuchen die Möglichkeit Schülerexperimente durchzuführen, sowie auch Hausarbeiten oder Referate über diese Versuche und deren Bedeutung halten zu lassen. Hiermit soll auch das selbständige Arbeiten der Schüler forciert und Interesse für die Physik geweckt werden.

Jede Lehrperson sollte sich aber immer daran erinnern, dass eine Überfüllung des Unterrichts mit Experimenten auch negative Auswirkungen haben kann, weil die Schüler das Interesse an Versuchen verlieren könnten.

## 2.3 **Forderungen des Lehrplans**

In den nächsten beiden Unterkapiteln werden die Forderungen des Lehrplans an die AHS Unterstufe sowie auch AHS Oberstufe zitiert. Dabei möchte ich speziell jene Themenbereiche der Physik hervorheben, die auch meine Arbeit betreffen. Nachzulesen sind die gesamten Forderungen im Internet unter der im Anhang genannten Adresse. [2]

### 2.3.1 **Forderungen des Lehrplans für die AHS - Unterstufe**

Bildungs- und Lehraufgabe:

Ausgehend von fachspezifischen Aspekten wird die enge Verflechtung der Physik mit anderen Naturwissenschaften bearbeitet: Der Unterrichtsgegenstand trägt zu allen Bildungsbereichen bei und soll sich keinesfalls nur auf die Darstellung physikalischer Inhalte beschränken.

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;
- Entwickeln von Erklärungsversuchen beziehungsweise Modellvorstellungen und deren Anwendungen 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:

Der Physikunterricht soll zu übergeordneten Begriffen und allgemeinen Einsichten führen, die an Hand weiterer Beispiele auf konkrete Sachverhalte angewendet werden. 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.

An geeigneten Inhalten ist den Schülerinnen und Schülern Gelegenheit zu möglichst selbstständigem Untersuchen, Entdecken bzw. Forschen zu geben. Dies bedingt den

Einsatz von Schülerversuchen. Altersgemäße Denkwege und Deutungsversuche der Schülerinnen und Schüler sind zu berücksichtigen.

... Ausgehend von Alltagserfahrungen sollen die Schülerinnen und Schüler immer intensiver mit dem Teilchenmodell und seinen Auswirkungen auf diverse Körpereigenschaften vertraut gemacht werden.

- Teilchenmodell aller Körper und wichtige Auswirkungen akzeptieren und verstehen;
- Ursache des Schwimmens, Schwebens und Sinkens von Körpern im Wasser verstehen und anwenden können; Dichte von Stoffen, Gewichtsdruck in Flüssigkeiten und in Luft.

Der Traum vom Fliegen:

Ausgehend von Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler sollen die wesentlichsten Vorgänge beim Fliegen nach dem Prinzip "leichter als Luft" und "schwerer als Luft" verständlich gemacht werden.

- Bewegungsmöglichkeiten von Kleinstkörpern, etwa Staubkörnern, Sporen oder Regentropfen verstehen;
- die grundlegenden Vorgänge bei einer Ballonfahrt verstehen;
- das "aktive" Fliegen von beispielsweise Vögeln, Schmetterlingen oder Flugzeugen auf Grund einfachster Modellvorstellungen verstehen.

### 2.3.2 Forderungen des Lehrplans für die AHS - Oberstufe

Bildungs- und Lehraufgabe:

Der Physikunterricht hat zum allgemeinen Bildungsauftrag der Schule, insbesondere der Befähigung zum selbstständigen Wissenserwerb, dem verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt und der verantwortlichen, rationalen Mitwirkung an gesellschaftlichen Entscheidungen fachspezifisch beizutragen und damit in besonderer Weise den Erwerb von Schlüsselqualifikationen und dynamischen Fähigkeiten zu fördern. ...

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 Rüstzeuges 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:

- Informationen sammeln, hinterfragen und argumentieren können
- eigene Arbeiten zielgruppengerecht präsentieren können
- Problemlösungsstrategien einzeln und im Team entwickeln können
- eigenständig arbeiten können
- umweltbewusst handeln können
- mit Expertinnen und Experten sprechen, Expertenmeinungen hinterfragen und grundlegendes Fachvokabular richtig anwenden können
- physikalische Zusammenhänge darstellen können
- Diagramme erstellen und interpretieren können
- konzeptuales Wissen anwenden können
- fachbezogene Fragen formulieren können
- einfache Experimente planen und durchführen können

- Hypothesen entwickeln, einschätzen und diskutieren können
- Gefahren erkennen, einschätzen und sicherheitsbewusst handeln können

Didaktische Grundsätze:

Die Lehrerinnen und Lehrer haben den Bildungsprozess durch Einbettung der Lehrinhalte in lebensweltbezogene Themenbereiche zu unterstützen und so einer verfrühten Abstraktion vorzubeugen. Dabei ist der erhöhte Abstraktionsgrad moderner physikalischer Inhalte durch verstärkte Nutzung von Analogien und audiovisuellen Medien zu kompensieren.

Die Themenwahl ist an folgenden Zielbereichen physikalischer Grundbildung zu orientieren:

- Physik und Gesellschaft: Verantwortungsbewusstes gesellschaftspolitisches Handeln und sachbezogene öffentliche Diskussion physikalischer Technologien
- Physik im Alltag: Beherrschen und Verstehen der Grundprinzipien einfacher physikalisch-technischer Geräte und Systeme im Alltag
- Physik als Erlebnis: Bereicherung des gefühlsmäßigen Erlebens von Natur und Technik und subjektiv befriedigende Beschäftigung mit Physik

... Die individuell verschiedene Leistungsfähigkeit ist durch differenzierte Aufgabenstellungen zu berücksichtigen. Neben dem kognitiven Bereich sind Handlungsfähigkeit und Problemlösungskompetenz zu berücksichtigen. Geeignet sind dafür beispielsweise Interpretation fachbezogener Medienberichte, Planung, Durchführung, Auswertung und Protokollierung von Experimenten, Fragenformulierung und Hypothesenbildung. [2]

## 3 Elastomechanik – Hydrostatik – Aerostatik

### 3.1 Stoffkonstanten der Elastomechanik

Grundsätzlich können Stoffe in drei verschiedenen Aggregatzuständen auftreten, nämlich fest, flüssig oder gasförmig. Vereinfacht kann man sich den festen Zustand, also einen Festkörper, so vorstellen, dass seine atomaren Bausteine ähnlich wie bei einem Kristall angeordnet sind. Bei Festkörpern kann man schließlich zwischen fünf verschiedenen Stoffkonstanten der Elastomechanik unterscheiden, wobei sich die verschiedenen Module im Angreifen der Kraft und der daraus entstehenden Deformation des Stoffes unterscheiden. Der Kompressionsmodul, eine Volumsänderung eines Stoffes nach einer Druckverminderung oder Druckerhöhung, wird hier nicht näher behandelt.

#### 3.1.1 Elastizitätsmodul

##### Material

- Eine Feder oder ein Stück Schlauch



Abbildung 1: Elastizität einer Feder



Abbildung 2: Elastizität eines Schlauches

### Aufbau und Durchführung

Man nimmt eine Feder zur Hand und hängt an dessen unteres Ende ein Gewicht, welches man auf den Tisch stellt. Jetzt dehnt man die Feder in Pendelbewegungen hoch und nieder, ohne sie zu überspannen. Ein Schlauchstück fasst man mit den Händen an den Enden und zieht dieses mehrmals auseinander. Sowohl die Feder als auch der Schlauch werden sich stets wieder in die Ausgangslage zurück bewegen.

### Physikalischer Hintergrund

Zieht nun eine Kraft  $F$  an dem Schlauch (bzw. an der Feder), so wird dieser um ein bestimmtes Stück  $\Delta l$  gedehnt, welches sowohl zur angreifenden Kraft sowie zur Ausgangslänge  $l$  des Schlauches proportional ist. Eine Kraft, die senkrecht zur Oberfläche angreift nennt man auch Zug- oder Druckspannung. Wenn die angreifende Kraft zu groß ist, so wird der Schlauch überdehnt, überschreitet auch ohne Krafteinwirkung seine ursprüngliche Länge und verliert an Elastizität. Ist die Kraft groß genug so kann man den Schlauch natürlich auch abreißen.

$$\Delta l = \frac{1}{E} \frac{l \cdot F}{A} \quad 1$$

Hier bezeichnet  $A$  den Querschnitt des Schlauches und  $E$  den so genannten Elastizitätsmodul. In manchen Büchern findet man auch eine dimensionslose Größe  $\varepsilon$ , die eine relative Änderung der Länge beschreibt. Weiters kann man für die angreifende Kraft pro Fläche auch die Spannung  $\sigma$  schreiben, was uns nach Umformung von Formel 1 zum so genannten Hooke-Gesetz führt:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma \quad \text{oder} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \quad 2$$

Solange die Dehnung im elastischen Bereich liegt, gilt diese Gleichung, und sie geht auch wieder zurück sobald die Kraft auslässt.

### 3.1.2 Schubmodul

#### Material

- Radiergummi



**Abbildung 3: Schubmodul anhand eines Radiergummis**

#### Aufbau und Durchführung

Man stellt einen Radiergummi auf der Längsseite stehend auf den Tisch und verschiebt ihn, mit dem Daumen parallel zur horizontalen Ebene. Die Bodenfläche bleibt auf der Unterlage haften, die Fläche unter dem Finger hingegen verschiebt sich um ein paar Millimeter gegen die Auflagefläche.

#### Physikalischer Hintergrund

Als Scherkraft oder Schubkraft  $F$  bezeichnet man eine Kraft parallel zu einer Oberfläche  $A$  eines Körpers. In unserem Fall also ein Deformieren des Radiergummis. Eine Schubspannung  $\tau$  kippt alle Seitenkanten, die senkrecht zu  $A$  stehen, um einen Winkel  $\alpha$ .

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{oder} \quad \tau = G \cdot \alpha \quad 3$$

Solange wir uns im Bereich der Schubelastizität bewegen, ist  $\alpha$  proportional zu  $\tau$ , und der Proportionalitätsfaktor  $G$  heißt Schubmodul oder Torsionsmodul, welcher bei der Verdrillung eines Körpers durch ein angreifendes Drehmoment eine Rolle spielt. [vgl. 3, S 155]

### 3.1.3 Torsionsmodul

#### Material

- Radiergummi



Abbildung 4: Torsionsmodul anhand eines Radiergummis

#### Aufbau und Durchführung

Man fasst einen Radiergummi mit beiden Händen an zwei gegenüberliegenden Seiten, und verdreht die eine Hand im Uhrzeigersinn und die andere entgegen. Natürlich kann man das auch mit einem Schlauch- oder einem Drahtstück zeigen. Es ist es jedoch möglich den Radiergummi abzureißen, wie auf der DVD einmal gezeigt wird.

#### Physikalischer Hintergrund

Bei der Verdrillung wirken zwei entgegen gesetzte Drehmomente  $T$  an den gegenüberliegenden Seitenflächen eines Körpers. Diese Verdrehung im geometrischen Sinne der Grund- bzw. der Deckfläche gegeneinander um einen bestimmten Winkel  $\varphi$  bezeichnet man als Torsionsmodul. Stellt man sich einen Schlauch oder einen Draht mit Radius  $r$  und Länge  $l$  in lauter koaxiale Hohlzylinder zerteilt vor, so ist der innerste gegenüber den äußersten Zylinder um den Winkel  $\alpha$  verdreht, mit

$$\alpha = \frac{r \cdot \varphi}{l} \quad 4$$

Mit Hilfe von Formel 3 kommen wir auf

$$\tau = \frac{G \cdot r \cdot \varphi}{l} \quad 5$$

weilers wird die Änderung der Kraft  $\delta F$  durch die Schubspannung und den Querschnitt des Körpers beschrieben

$$\delta F = 2\pi \cdot r \cdot \tau \cdot \delta r \quad 6$$

In weiterer Folge erhalten wir eine Änderung des Drehmoments  $\delta T$  durch Einsetzen der Formeln 5 und 6. Für den Radius des Schlauches schreiben wir hier  $R_a$ , um das Vorkommen der Variablen in der oberen Integralgrenze zu vermeiden.

$$\delta T = \delta F \cdot r = \frac{G \cdot \varphi \cdot r \cdot 2\pi \cdot r \cdot \delta r}{l} \cdot r = \frac{2\pi \cdot G \cdot \varphi}{l} \cdot r^3 \delta r \quad 7$$

$$T = \int_0^{R_a} \frac{2\pi \cdot G \cdot \varphi}{l} \cdot r^3 \delta r = \frac{\pi \cdot G \cdot R_a^4 \cdot \varphi}{2 \cdot l} \quad 8$$

Schließlich kommt man durch Umformung von Formel 8 auf das Richtmoment  $R$

$$R = \frac{T}{\varphi} = \frac{\pi \cdot G \cdot r^4}{2 \cdot l} \quad 9$$

### 3.1.4 Poisson'sche Zahl

#### Material

- Ein Schlauchstück
- Passenden Metallring



**Abbildung 5: Demonstration der Poisson'schen Zahl anhand eines Schlauches**

#### Aufbau und Durchführung

Der Metallring muss, solange der Schlauch nicht in die Länge gezogen wird, genau an der Außenoberfläche des Schlauches haften bleiben. Fasst man den Schlauch mit beiden Händen an den Enden und dehnt ihn in vertikaler Richtung, so verringert sich sein Durchmesser, und der Metallring wird auf Grund der Schwerkraft abwärts gleiten.

Physikalischer Hintergrund

Durch Dehnung eines Körpers, wie in Kapitel 3.1.1. beschrieben, kommt es auch zu einer Verkleinerung seines Durchmessers  $d$ . In unserem Fall greift nun eine Kraft senkrecht auf die Querschnittsfläche an. Diese relative Änderung des Durchmessers eines Schlauches oder Drahtes bezeichnet man in der Physik als Querkontraktion  $\Delta d$ , was uns in weiterer Folge zur Poisson'schen Zahl  $\mu$  führt.

$$\mu = \frac{-\Delta d}{d} \frac{l}{\Delta l} \quad 10$$

Das negative Vorzeichen und die indirekte Proportionalität sind notwendig, weil der Durchmesser ja kleiner wird, je kräftiger man an dem Schlauch zieht. Die Werte für  $\mu$  können mit Hilfe einer Abschätzung für das Volumen  $V$ , das durch die Dehnung des Schlauches nicht kleiner wird, eingeschränkt werden

$$V = \frac{d^2 \pi \cdot l}{4} \quad 11$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = \varepsilon(1 - 2 \cdot \mu) = \frac{\sigma}{E}(1 - 2 \cdot \mu) \quad 12$$

Weil die Änderung des Volumens  $\Delta V$  größer Null ist und die Konstanten  $\sigma$  und  $E$  sicher nicht negativ sind, muss  $\mu < 0,5$  gelten. Somit kommt man für  $\mu$  auf Werte zwischen 0,2 und 0,5.

## 3.2 Grundgesetze der Hydro- und Aerostatik

### 3.2.1 Der Druck mit einem Bleistift

#### Material

- Bleistift



**Abbildung 6: Druckverteilung bei einem Bleistift**

#### Aufbau und Durchführung

Man nimmt den Bleistift stehend zwischen Daumen und Zeigefinger. Dann erhöht man den Druck indem man die Finger immer kräftiger zusammenpresst. An jenem Finger, wo man die Bleistiftspitze hält, wird man einen wesentlich größeren Schmerz verspüren als am zweiten.

#### Physikalischer Hintergrund

Weil man mit beiden Fingern gegen den Bleistift drückt, wirkt auch auf beide dieselbe Kraft. Da die Auflagefläche der Bleistiftspitze aber viel kleiner als die des anderen Endes und der Druck indirekt proportional zur Auflagefläche ist, wirkt auf den Finger, wo die Bleistiftspitze angreift, ein viel größerer Druck. Deshalb ist hier das Schmerzempfinden auch viel größer. [vgl. 4, S 244]

### 3.2.2 Die Fakir – Tomate und der Fakir – Apfel

#### Material

- kleines Holzbrett
- einige gleich lange, spitze Nägel (ca. 20 Stück)
- Tomate (Apfel, Kartoffel,...)
- Hammer

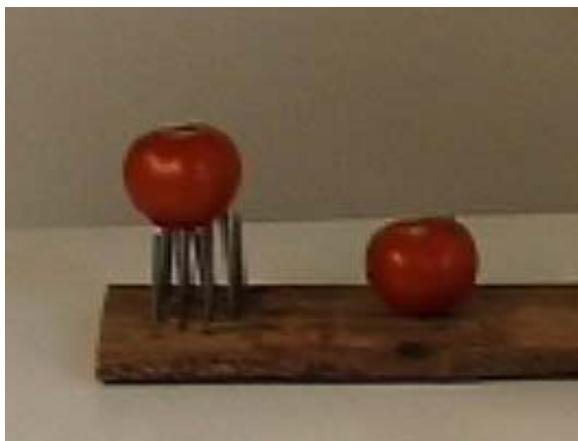


Abbildung 7: Die Fakir-Tomate



Abbildung 8: Der Fakir-Apfel

#### Aufbau und Durchführung

Mit dem Hammer, den Nägeln und dem Holzbrettchen fertigt man sich ein Fakirbrett an. Dabei schlägt man einen einzigen Nagel am einen Ende des Brettes hindurch und alle anderen Nägel am anderen Ende des Brettes. Dann nimmt man in jede Hand eine Tomate (Apfel) und lässt sie aus einer bestimmten Höhe  $h$  auf den einzelnen und auf die mehreren Nägel fallen. Bei einer Fallhöhe von z.B. 30 cm versinkt sie beim einzelnen Nagel, bis sie beim Brettchen ansteht. Die mehreren Nägel dringen bei gleicher Fallhöhe aber nicht einmal bis zur Hälfte in die Tomate ein. Führt man den Versuch mit einem Apfel oder einer Kartoffel durch, so verkleinern sich die Eindringtiefen.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Tomate wird aus derselben Höhe auf das Fakirbrett fallen gelassen. Deshalb kommt sie auch mit derselben Geschwindigkeit also dem gleichen Impuls bei der Spitze bzw. den

Spitzen der Nägel an. Der Druck  $p$  hängt aber von der Kraft  $F$  und der Fläche  $A$ , auf der diese Kraft senkrecht angreift, ab.

$$p = \frac{F}{A} \quad 13$$

Wie tief die Nägel eindringen hängt sowohl vom Druck als auch der Reibung ab. Bei einem einzigen Nagel wird die Tomate mit der Kraft  $F$  nur auf eine Nagelquerschnittsfläche gepresst, wobei bei zum Beispiel 16 (4 mal 4) Nägeln die Tomate mit derselben Kraft auf 16 Nagelquerschnittsflächen gepresst wird. Die Reibung wird mit der immer weiter werden Spitze größer und bremst den Fallkörper. Somit ist sie auf die Tomatenoberfläche bei den mehreren Nägeln um ein Vielfaches größer als bei dem einzelnen Nagel, weshalb die Tomate auch nicht so weit eindringen kann. Bei entsprechend vielen Nägeln wird die Gesamtfläche so groß bzw. die Kraft pro Nagel so klein, dass die Nägel überhaupt nicht mehr in die Oberfläche eindringen. Deshalb ist es auch möglich, sich auf ein Fakirbrett zu legen, ohne Verletzungen davon zu tragen.

Anwendung: Nägel, Zaunstempel, kleine Absätze bei Damenschuhen

### 3.2.3 Die allseitige Gleichheit des Drucks

#### Material

- Wasser
- Spezielles Glasgefäß mit mehreren Löchern und einem Kolben
- Gefäß zum Befüllen

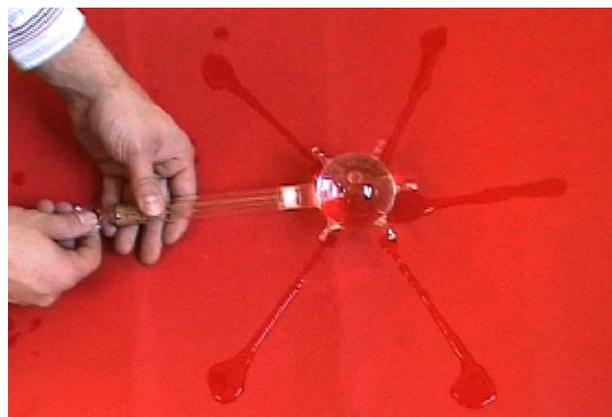


Abbildung 9: Die allseitige Gleichheit des Drucks

#### Aufbau und Durchführung

Man befüllt das Glasgefäß durch ständiges Pumpen des Kolbens zur Gänze mit Wasser. Dann legt man sich einen bunten Bogen Papier auf den Boden oder, um das Zusammenräumen zu erleichtern, in eine große Wanne. Buntes Papier eignet sich besser, weil man die einzelnen Strahlen besser erkennen kann. Dann drückt man den Kolben in einem Schub kräftig nach

Innen und wird erkennen, dass das Ende eines jeden Wasserstrahls gleich weit vom Zentrum des Gefäßes entfernt ist.

### Physikalischer Hintergrund

Hier kommen wir ohne jegliche Formel aus, wir benötigen nur den Satz von der allseitigen Gleichheit des Drucks, welcher besagt:

„Der Druck im Inneren eines Gefäßes und an dessen Grenzflächen ist überall gleich groß, unabhängig von der Form des Gefäßes.“ [vgl. 3, S 158]

## 3.2.4 Die hydraulische Presse

### Material

- Kleine Spritze
- Große Spritze (ca. das 10 fache Volumen der ersten)
- Dünnes Stück Schlauch
- Wasser
- Weitere Person



**Abbildung 10: Hydraulische Presse mit zwei unterschiedlichen Spritzen**

### Aufbau und Durchführung

Man füllt den Schlauch vollständig, sowie die beiden Spritzen zur Hälfte mit Wasser. Anschließend steckt man die Spritzen an jeweils ein Ende des Schlauchs, wobei man darauf achten muss, dass der Schlauch zur Gänze mit Wasser gefüllt bleibt. Dann nimmt jede Person eine Spritze in die Hand und versucht diese mit den Daumen zu betätigen. Die Person mit der kleineren Spritze in der Hand wird bemerken, dass sie den Kolben hineindrücken kann. Im Gegensatz dazu ist es für die andere sehr schwierig den Kolben an der Stelle zu halten, weil durch die Druckübertragung in der Flüssigkeit sein Kolben herausgedrückt wird. Aber warum ist es für ihn schwieriger den Kolben durchzudrücken?

### Physikalischer Hintergrund

Zuerst ist der Satz der allseitigen Gleichheit des Drucks von zuvor von Bedeutung. Greift nun eine Kraft  $F$  senkrecht an einem bestimmten Flächenstück  $A$  an, so beschreibt das Verhältnis Kraft pro Fläche einen Druck  $p$ , wie Formel 13 bereits zeigt. Weil der Druck in der Flüssigkeit aber überall gleich groß ist, wirkt auf den kleinen Kolben mit der kleineren Querschnittsfläche  $A_1$  eine Kraft  $F_1$ , analog wirkt auf den größeren mit Querschnittsfläche  $A_2$  eine Kraft  $F_2$ . Für die beiden gilt:

$$F_1 = p \cdot A_1 \qquad F_2 = p \cdot A_2 \qquad 14$$

Somit ist die Kraft  $F_2$  viel größer als die Kraft  $F_1$ , die von der Flüssigkeit her an den Kolben angreift, weil das Verhältnis von  $F_2$  zu  $F_1$  direkt proportional dem Verhältnis der beiden Kolbenflächen ist. Deshalb ist es auch viel schwieriger oder sogar unmöglich den größeren Kolben hineinzudrücken, solange auf der gegenüberliegenden Seite jemand dagegen hält.

Bemerkung: zu Beginn könnte es passieren, dass man den größeren Kolben an derselben Stelle halten kann, aber das liegt an der Ausdehnung des Schlauches und nicht an der Flüssigkeit oder der größeren Kraft derjenigen Person, denn in diesem Fall müsste dieser Mensch dann schon ca. 10 Mal stärker sein als sein Gegenüber.

Anwendung: hydraulischer Wagenheber, hydraulische Presse

### **3.2.5 Flüssigkeitsoberflächen normal zur resultierenden Kraft**

#### Material

- Wasser
- Tinte
- Glasgefäß
- Spindel



**Abbildung 11: Rotationsparaboloid einer Flüssigkeitsoberfläche**



**Abbildung 12: Rotationsparaboloid bei erhöhter Drehzahl**

### Aufbau und Durchführung

Man befüllt das Gefäß ca. zur Hälfte mit Wasser und gibt reichlich Tinte dazu, damit man die Oberfläche der Flüssigkeit auch gut erkennen kann. Dann stellt man das Gefäß auf die Spindel, wobei man darauf achten muss, dass der Stift an der Unterseite vollständig in die Spindelöffnung eindringt. Schließlich beginnt man an der Kurbel zu drehen, so dass an dem Gefäß ein Drehmoment angreift, bis die Flüssigkeitsoberfläche ein schönes Rotationsparaboloid bildet. Sollte es nicht beim ersten Anlauf klappen, muss man sich durch mehrmaliges Bremsen und Beschleunigen der Kurbelbewegung ein wenig spielen.

### Physikalischer Hintergrund

Eine Voraussetzung, dass so eine Form überhaupt entstehen kann, ist die Tatsache, dass Flüssigkeiten Grenzflächen gegenüber Gasen bilden. Stellt man das Glas auf einen Tisch, so befinden wir uns im homogenen Schwerfeld, und die Flüssigkeitsoberfläche ist horizontal ausgerichtet. Sobald jedoch entsprechende Kräfte wirken, stellt sich die Oberfläche senkrecht zur resultierenden Kraft, also zur Summe aller angreifenden Kräfte. In unserem Fall also die in vertikaler Richtung angreifende Gravitationskraft sowie in horizontaler Richtung angreifende Zentrifugalkraft. Die Resultierende der beiden Kräfte sowie die Neigung der Oberfläche gegenüber der Horizontalen sind abhängig vom Abstand zum Mittelpunkt des

Gefäßes, der Drehachse des entstehenden Rotationsparaboloids. Wenn die Neigung einer Kurve proportional zum Abstand  $x$  ist, spricht man von einer Parabel, deren Scheitel in unserem Fall auf der Drehachse liegen muss. [vgl. 5, S 94f]

### 3.2.6 Schlauchwaage – kommunizierende Gefäße

#### Material

- Wasser
- Tinte
- Ein durchsichtiges Stück Schlauch



Abbildung 13: Die Schlauchwaage

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt den Schlauch ca. zur Hälfte mit eingefärbtem Wasser, indem man eine Öffnung zuhält oder das zweite Ende höher als das zu befüllende hält. Man sollte auch hier wieder mit der Tinte nicht sparen, damit man den Flüssigkeitsstand im Schlauch besser erkennen kann. Schließlich hält man den Schlauch mit beiden Händen an jeweils einem Ende vor sich hin, sodass der Flüssigkeitsstand beide Male gut zu sehen ist. Nun versucht man die Enden des Schlauches so nah wie möglich aneinander zu halten oder sogar zu kreuzen, damit die beiden Flüssigkeitsstände dicht nebeneinander sind. Man wird erkennen, dass sich beide exakt auf gleicher Höhe befinden, egal wie oft man den Schlauch windet oder wie hoch man ihn hält.

#### Physikalischer Hintergrund

Der Satz von den kommunizierenden Gefäßen kommt hier zur Geltung:

„In Gefäßen, die mit einander verbunden sind, liegen die Flüssigkeitsoberflächen in derselben horizontalen Ebene.“ [vgl. 3, S 159]

Am tiefsten Punkt des Schlauches muss ein Druckgleichgewicht herrschen, das bei gleicher Dichte der Flüssigkeit nur dann der Fall sein kann, wenn beide Wasseroberflächen auf

gleicher Höhe sind. Dabei ist noch zu beachten, dass die Form der Gefäße überhaupt keine Rolle spielt, genauso wie der Bodendruck einer Flüssigkeit in einem Gefäß nicht von dessen Form abhängt. Hier und in den folgenden Experimenten benötigen wir auch schon den hydrostatischen Druck. Der Druck in einer bestimmten Tiefe einer Flüssigkeit hängt nur von der Dichte und der Tiefe der Flüssigkeit ab. Der hydrostatische Druck nimmt auch linear zu je tiefer man sich von der Flüssigkeitsoberfläche entfernt.

### 3.2.7 Der Schlauchheber

#### Material

- Wasser
- Ein Stück Schlauch
- Zwei große Gurkengläser
- Bücherstapel



Abbildung 14: Der Schlauchheber

#### Aufbau und Durchführung

Eines der beiden Gefäße füllt man mit Wasser und stellt es z.B. auf einen Bücherstapel auf einen Tisch. Das leere Gefäß stellt man neben den Stapel hin. Dann legt man ein Schlauchende bis auf den Boden des vollen Glases. Am zweiten saugt man solange, bis der Schlauch vollständig mit Wasser gefüllt ist und hängt es schließlich in das zweite Glas. Nun kann man beobachten, wie die Flüssigkeit vom oberen in das untere Gefäß fließt.

#### Physikalischer Hintergrund

Für das Ende im oberen Gefäß entsteht ein Gesamtdruck  $p_1$ , der sich aus dem Luftdruck  $p_L$ , dem Schweredruck des Wassers im Gefäß  $p_G$  und dem Schweredruck des Wassers im Schlauch  $p_S$ , vom höchsten Punkt bis zum Gefäßboden, zusammensetzt. Für das zweite Schlauch-Ende ergibt sich ein Gesamtdruck  $p_2$ , der sich ähnlich zusammensetzt. Nur der

Schweredruck des Schlauches, muss hier natürlich vom höchsten Punkt bis zu diesem Gefäßboden berechnet werden.

$$p_1 = p_L + p_{G_1} - p_{S_1} \quad p_2 = p_L + p_{G_2} - p_{S_2} \quad 15$$

Somit ergibt sich für die beiden Schlauch-Enden eine Druckdifferenz  $\Delta p$ , anhängig von der Dichte  $\rho$ , der Höhe  $h$  zwischen den beiden Wasserständen und der Gravitationskonstanten  $g$ .

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho \cdot A \cdot (h_1 - h_2) \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g \quad 16$$

Die beiden Höhen  $h_i$ , beschreiben den Abstand zwischen Flüssigkeitsoberfläche im entsprechenden Gefäß und höchstem Punkt des Schlauches.  $A$  beschreibt die Querschnittsfläche des Schlauches. Somit ist klar, dass das Wasser genau so lange fließt, bis die Flüssigkeitsstände in beiden Gefäßen in der gleichen horizontalen Ebene liegen, bzw. bis das obere Gefäß geleert ist.

Anwendungen: Ansaugen von Kraftstoff aus einem Tankbehälter

### 3.2.8 Das offene Manometer

#### Material

- Wasser
- Tinte
- Ein durchsichtiges Stück Schlauch



**Abbildung 15: Ein offenes Manometer in Form eines Schlauches**

#### Aufbau und Durchführung

Beim Aufbau des Versuchs geht man gleich vor wie bei Experiment 3.2.6. Man hält den Schlauch so vor sich hin, dass beide Flüssigkeitsoberflächen gut sichtbar sind und beginnt an einem Ende des Schlauches leicht hinein zu blasen. Man wird erkennen, dass der Flüssigkeitsstand an diesem Ende sinkt und somit am anderen Ende steigt. Entfernt man sich mit dem Mund wieder vom Schlauch, so werden sich die Flüssigkeitsstände wieder auf

gleicher Höhe einpendeln. Bläst man kräftig genug hinein, so fließt die Flüssigkeit am anderen Schlauchende sogar aus.

### Physikalischer Hintergrund

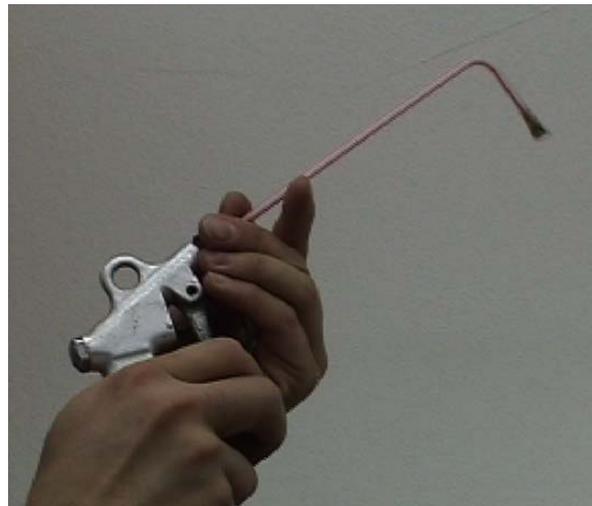
Die physikalische Erklärung ist ähnlich wie bei der Schlauchwaage - im tiefsten Punkt muss ein Druckgleichgewicht herrschen. Da aber der Druck durch das Hineinblasen auf der einen Seite erhöht wird, muss das Wasser auf der anderen Seite höher stehen, um ein Gleichgewicht zu erzielen.

Anwendungen: offene U-Rohr-Manometer

## 3.2.9 Ein einfaches Manometer

### Material

- Strohalm
- Klebeband
- Pressluft



**Abbildung 16: Ein einfaches Manometer mit Hilfe von Pressluft**

### Aufbau und Durchführung

Man klebt einen biegsamen Strohalm an der kürzeren Seite mit Klebeband zu, und klappt das Ende ganz zum längeren Ende hin. (Tipp: Es wäre vielleicht besser die beiden Enden mit einem Gummiband leicht aneinander zu binden, damit der Halm nach einer Auslenkung wieder die Ausgangslage einnimmt.) Dann bläst man vorsichtig Pressluft in den Halm, je nach Dosierung wird das zugeklebte Ende stärker oder schwächer ausgelenkt. Ist der Luftdruck groß genug, so richtet sich der Trinkhalm wieder völlig gerade aus.

### Physikalischer Hintergrund

Die physikalische Erklärung beruht auf demselben Prinzip wie zuvor beim offenen Manometer, nur mit dem Unterschied, dass hier Innen und Außen in der Ausgangslage derselbe atmosphärische Luftdruck wirkt. Sobald man aber mit der Pressluft auf der einen Seite hinein bläst, erhöht sich der Druck im Strohhalm, da das zweite Ende zugeklebt ist. Dadurch möchte sich der Halm ausdehnen, weshalb sich das kürzere Ende immer mehr und mehr aufrichtet.

Anwendungen: Technische Manometer, z.B. Bourdon'sche Röhre

### 3.2.10 Der Torricelli-Versuch

#### Material

- Hohes Glas
- Wasser
- Stück Papier oder Karton



**Abbildung 17: Das Torricelli-Experiment**

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt das Glas je nach Belieben mit Wasser, der Effekt kommt jedoch besser zur Geltung, wenn man es fast voll macht. Dann legt man das Papierstück, das überall mindestens um einen Zentimeter über den Glasrand hinaus ragen sollte, auf das Gefäß. Während man mit der Handfläche das Papierstück auf den Glasrand presst, dreht man mit der anderen Hand das Glas um und hält es so vor sich hin. Zuvor sollte man sich allerdings eine Wanne darunter auf den Tisch stellen, oder das Experiment überhaupt über einem Waschbecken durchführen.

Schließlich versucht man vorsichtig jene Hand, die sich ja jetzt unterhalb des Glases befindet, vom Papierstück zu nehmen. Dieses sollte nämlich am Glasrand hängen bleiben und somit das Wasser im Glas halten.

### Physikalischer Hintergrund

Das Papierstück wird durch den uns umgebenden atmosphärischen Luftdruck an die Glasöffnung gepresst. Der Luftdruck beträgt auf Meeressniveau ca.  $100000 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [bar]}$ , was einem hydrostatischen Druck einer zehn Meter hohen Wassersäule entspricht. Somit könnte man mit einem Schlauch eine zehn Meter hohe Wassersäule konstruieren, z.B. von einem Fenster eines Wohnblocks aus und diesen mit einem starken Stück Papier abdecken. Es dürfte normaler Weise kein Wasser auslaufen. Für Quecksilber entspricht dieser Wert einer Höhe von ca. 76 cm. Das ergibt sich durch den Quotienten der beiden Dichten, der indirekt proportional zu dem Quotienten der Höhen ist.

$$\frac{\rho_{\text{Hg}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = 13,6 = \frac{h_{\text{H}_2\text{O}}}{h_{\text{Hg}}} \quad 17$$

Der Luftdruck ist zwar für uns nicht spürbar, jedoch mit Hilfe von solchen Experimenten wahrnehmbar. Das Papier benötigen wir hier nur, um ein Einreißen der Wasseroberfläche zu verhindern. Wenn die Öffnung klein genug ist, wie z.B. bei einer Pipette, würde das Wasser auch so im Gefäß bleiben.

### 3.2.11 Die Glaskugel im Glas

#### Material

- Reagenzglas
- Dazu passende Glaskaraffe
- Wasser



**Abbildung 18: Demonstration des Luftdrucks mit ineinander passenden Gefäßen**

#### Aufbau und Durchführung

Man muss beachten, dass die Glaskaraffe gerade noch in das Reagenzglas passen muss und sollte dieses Experiment gleich bei einem Waschbecken durchführen. Dann füllt man das Reagenzglas vollständig mit Wasser. Dann stellt man die Glaskaraffe mit der geschlossenen Seite darauf und stellt beide Gläser in dieser Anordnung auf den Kopf. Währenddessen muss man die Karaffe nochmals leicht in das Glas hineindrücken, da sie sonst während dem Umdrehen hinunter fallen könnte oder zuviel Wasser ausfließt. Man kann auch andere Gefäße verwenden, wichtig ist dabei nur, dass eines gerade noch in die Öffnung des anderen passt. Schließlich sollte die Karaffe, unter ständigem Ausfließen von Wasser, langsam hoch steigen, bis sie im Reagenzglas oben ansteht.

#### Physikalischer Hintergrund

Der atmosphärische Luftdruck sorgt wieder dafür, dass die Glaskaraffe bis oben in das Reagenzglas hinaufgedrückt wird, anstatt auf den Boden zu fallen. Dafür muss der Abstand zwischen den beiden Glaswänden aber klein genug sein, damit das Wasser gleichmäßig ausfließen kann. Wenn der Abstand zu groß wird, strömt das Wasser auf einmal aus und reißt die Karaffe mit sich. Das ausströmende Wasser bildet eine Dichtung zwischen den beiden Glasgefäßen und verhindert das Nachströmen von Luft. Es kann passieren, dass am Ende des Experiments langsam Luft zwischen Glaskaraffe und Reagenzglas strömt, weshalb die Kugel wieder aus dem Glas heraus gleitet, da der Luftdruck von allen Seiten wirkt.

### 3.2.12 Die Trägheit der Luft

#### Material

- Hammer
- Dünnes langes Holzbrett
- Zeitungspapier

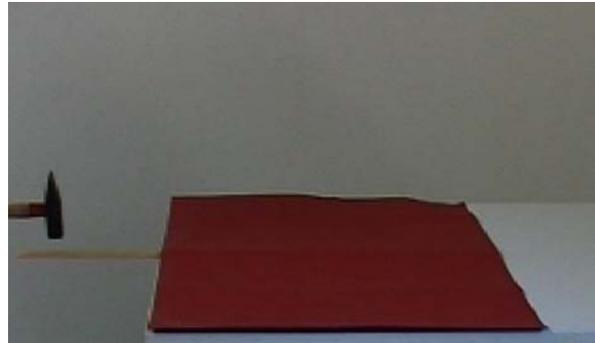


Abbildung 19: Demonstration der Trägheit von Luft

#### Aufbau und Durchführung

Man legt das Holzbrettchen so auf den Tisch, dass noch gut ein Drittel über dessen Kante hinausragt. Dann bedeckt man den auf dem Tisch verbleibenden Teil mit einigen Bögen Zeitungspapier oder, wie in der Abbildung zu sehen, mit einem großen Bogen Zeichenpapier. Wenn man langsam auf den frei liegenden Teil des Brettchens drückt, werden die Zeitungen angehoben. Nimmt man hingegen den Hammer zur Hand und schlägt mit voller Wucht auf das überstehende Ende des Holzstücks, so bricht dieses sofort ab und die Zeitungsbögen bewegen sich nur minimal. Vorsicht, es kann passieren, dass der überdeckte Teil des Holzstücks nach dem Schlag mit entsprechender Wucht nach vorne fliegt.

#### Physikalischer Hintergrund

Auf Meeresniveau herrscht ein Luftdruck von ca. einem Bar. Die Zeitungsbögen werden mit diesem Druck auf die Tischfläche gepresst, wobei es nötig ist die Bögen möglichst gewissenhaft über dem Brettchen auszustreifen. Deshalb kann am Rand der Zeitung Luft nicht so schnell nachströmen, wie das Papier in die Höhe gedrückt wird. Zieht man für die Zeitungsfäche z.B. ein Ausmaß von 0.5 Quadratmetern heran so wirkt ca. eine Kraft von 50 [kN] von oben auf die Zeitungsfäche. Beim Schlag mit einem Hammer kann man aber maximal eine Kraft von einigen kN erreichen. Deshalb ist es nicht möglich bei voller Wucht das Zeitungspapier hochzuheben. [vgl. 4, S 388]

### 3.2.13 Die Magdeburger Halbkugeln

#### Material

- Magdeburger Halbkugeln
- Vakuumpumpe
- Eine zweite Person



Abbildung 20: Magdeburger Halbkugeln

#### Aufbau und Durchführung

Zuerst befeuchtet man die Dichtung etwas und legt sie zwischen die beiden Magdeburger Halbkugeln. (Als Freihandversuch kann man es mit zwei Gummi-Saugglocken versuchen, die man ein paar Mal fest gegeneinander presst.) Dann öffnet man das Ventil und steckt den Schlauch der Vakuumpumpe an. Anschließend schaltet man die Vakuumpumpe ein und wartet ca. eine Minute. Nun schließt man das Ventil wieder, stellt die Vakuumpumpe ab und nimmt den Schlauch von der Öffnung. Jetzt kommt die zweite Person zum Einsatz - jeder greift sich den Griff einer Halbkugel und beide versuchen diese auseinander zu ziehen. Wenn sich die beiden auch noch so bemühen, es wird ihnen nicht gelingen, die Halbkugeln zu trennen. Öffnet man hingegen das Ventil, so lassen sie sich sofort trennen und die Dichtung fällt auf den Boden.

#### Physikalischer Hintergrund

Eigentlich passiert hier dasselbe wie beim Versuch zuvor, nur mit viel mehr Technik. Die Dichtung zwischen den Magdeburger Halbkugeln sorgt dafür, dass von außen keine Luft mehr in die Kugel gelangt. Nun wird dieser zusammengesetzten Kugel die Luft fast zur Gänze entzogen, bis man ein Vorvakuum erreicht. Schließt man nun das Ventil, so kann auch hier keine Luft mehr in das abgeschlossene System gelangen, wo nun ein Unterdruck herrscht. Der umgebende Luftdruck ist um ein Vielfaches größer als der Druck in der Kugel und presst die beiden Halbkugeln aneinander. Daher ist es für zwei Personen unmöglich diese

wieder in zwei Teile zu trennen. *Otto von Guericke* hat dieses Experiment in Magdeburg im Jahr 1657 das erste Mal öffentlich demonstriert. Er hat in zwei hohlen Kupfer-Halbkugeln, die einen Durchmesser von ca. 50 cm gehabt haben und luftdicht aneinander gepresst worden sind, so einen enormen Unterdruck erzeugen können, dass es nicht einmal für acht Pferde auf jeder Seite möglich gewesen ist, die Kugeln zu trennen. Deshalb auch der historische Name „Magdeburger Halbkugeln“.

### 3.2.14 Der hydrostatische Druck

#### Material

- Große Plastikflasche
- Wasser
- Tinte
- Nagel
- Klebeband
- Wanne



**Abbildung 21: Der hydrostatische Druck in einer gefüllten Flasche**

#### Aufbau und Durchführung

Zuerst bohrt man in die Plastikflasche drei Löcher vertikal untereinander, wobei man ruhig die Größe der Flasche ausnutzen kann, indem man das erste im oberen Drittel, das zweite in der Mitte und das dritte ca. drei bis vier Zentimeter oberhalb des Bodens positioniert. Anschließend verschließt man die Öffnungen mit einem langen Streifen Klebeband, wobei man darauf achten muss, dass die Flasche jetzt wieder dicht ist. Nun befüllt man das Gefäß mit stark eingefärbtem Wasser, fasst es mit einer Hand bei der Öffnung und hält es hoch über die Wanne. Mit der zweiten Hand zieht man nun das Klebeband in einem Zug von der Plastikflasche wonach das Wasser aus allen drei gebohrten Öffnungen gleichzeitig ausfließen kann. Man wird sofort erkennen, dass der Wasserstrahl aus dem obersten Loch am wenigsten weit spritzt und der unterste Wasserstrahl am weitesten, also mit dem größten Druck.

Physikalischer Hintergrund

Hier kommt wieder der Satz vom hydrostatischen Druck zur Geltung, der bereits bei Versuch 3.2.6. zum ersten Mal verwendet wurde. Da der Druck in einer Flüssigkeit eben nur von der Tiefe abhängt, in der man sich befindet, und linear mit der Tiefe zunimmt, nimmt der Druck vom oberen Loch bis zum untersten auch linear zu. Deshalb spritzt der unterste Strahl auch am weitesten, da hier der größte hydrostatische Druck herrscht. Sinkt der Flüssigkeitspegel immer näher Richtung oberstes Loch, so wird dieser Strahl auch immer kürzer bis er verschwindet, weil der Wasserstand unter das Niveau des Loches weiter sinkt. Alle drei Strahlen werden aber immer kürzer, weil das Flüssigkeitsvolumen, das sich über ihnen befindet immer kleiner wird.

Für die Gewichtskraft  $F_G$ , die auf die Bodenfläche  $A$  eines Behälters der Höhe  $h$  wirkt, gilt folgende Formel, wobei  $m$  die Masse,  $V$  das Volumen,  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit und  $g$  die Erdbeschleunigung ist.

$$F_G = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g \quad 18$$

Für den Druck erhalten wir

$$p = \frac{F_G}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g \quad 19$$

Diese kurze Herleitung liefert uns eine wichtige Beziehung für den hydrostatischen Druck.

### 3.2.15 Ein Messgerät für den hydrostatischen Druck

Material

- Glas
- Geöffnete saubere Dose
- Wasser
- Tinte
- Bohrer
- Durchsichtiger Strohhalm
- Klebstoff und Klebeband
- Luftballon



**Abbildung 22: Ein Messgerät für den hydrostatischen Druck**

### Aufbau und Durchführung

Zu Beginn bohrt man genau in Strohalmstärke ein Loch in den Boden der Dose. Jetzt stülpt man die Haut eines Luftballons, ohne sie zu spannen, anstelle des Deckels über die Dose, und fixiert sie zusätzlich mit Klebeband am Mantel der Dose. Der Luftballon übernimmt in diesem Fall die Funktion einer Membran. Anschließend stellt man die Dose auf den Kopf, steckt den Strohhalm durch das Loch und dichtet ihn zum Dosenrand hin mit Klebstoff ab. (Tipp: Man darf ihn nur ca. einen Millimeter durch die Öffnung ragen lassen, da man sonst später Probleme beim Befüllen bekommt.) Nachdem man den Klebstoff aushärten lässt, befüllt man sein selbst konstruiertes Messgerät mit stark eingefärbtem Wasser über den Strohhalm mit Wasser, bis die gesamte Dose voll ist. Nun gibt man langsam noch etwas Flüssigkeit dazu, bis der Flüssigkeitsstand am unteren Ende des Halms gut zu sehen ist. Daraufhin fasst man das Ganze am oberen Ende des Halms und markiert mit einem dunklen Stift den Flüssigkeitsstand.

Jetzt ist unser Messgerät fertig und man lässt es vorsichtig in ein mit Wasser gefülltes Gefäß sinken. Je weiter man die Dose eintauchen lässt, desto höher steigt der Flüssigkeitsstand im Strohhalm. Zieht man das Messgerät wieder ganz aus dem Wasser sollte der Flüssigkeitsstand wieder ungefähr bei der Markierung liegen, vielleicht ein bisschen darunter, weil sich der Gummi des Luftballons ein wenig ausgedehnt hat.

### Physikalischer Hintergrund

Hier möchte ich nur auf den vorherigen Versuch verweisen, denn wir haben ein Messgerät konstruiert, das den hydrostatischen Druck anzeigt. Dieser wurde im vorherigen Experiment ausführlich erläutert. Deshalb steigt auch hier der Flüssigkeitsstand im Strohhalm, je weiter man die Dose ins Wasser eintaucht, weil der hydrostatische Druck mit der Eintauchtiefe zunimmt.

### 3.2.16 Flüssigkeitsschichten

#### Material

- Glas
- Löffel
- Wasser
- Zuckerwasser
- Öl
- Spiritus



**Abbildung 23: Schichtung von verschiedenen Flüssigkeiten**

#### Aufbau und Durchführung

Zuerst rührt man sich ein Zuckerwasser aus einem Teil Zucker und zwei Teilen Wasser an und lässt es als unterste Schicht im Glas. Auf der DVD ist statt Zuckerwasser Quecksilber verwendet worden, was wir aber aus Sicherheitsgründen lieber weglassen. Nun gibt man nach und nach die anderen Flüssigkeiten in das Gefäß, indem man sie ganz langsam über einen Löffel hinein fließen lässt. Man muss darauf achten, dass man den Löffel stets ganz knapp oberhalb des Flüssigkeitsstandes positioniert. Die Schichtdicken sollten nicht mehr als zwei Zentimeter betragen. Als nächstes gibt man also Wasser in das Glas, daraufhin das Öl und anschließend falls vorhanden Spiritus. Wenn man vorsichtig genug war, durchmischen sich die verschiedenen Flüssigkeitsschichten nicht. Höchstens zwischen dem Zuckerwasser und dem Wasser kann es nach Stunden zu einer Vermischung kommen, was man aber mit Quecksilber auch verhindern kann. Denn wie man in der Abbildung sehen kann, haben sich die Flüssigkeiten auch nach Monaten nicht vermischt.

#### Physikalischer Hintergrund

Der Auftrieb in einer spezifisch schwereren Flüssigkeit ist für eine leichtere Flüssigkeit größer als ihre Gewichtskraft. Deshalb schwimmt eine leichtere Flüssigkeit auch auf einer mit höherer Dichte. Sind zwei Flüssigkeiten jedoch mischbar, so kommt es auf Grund der Diffusion zu einer Vermischung der beiden, die jedoch nur sehr langsam fortschreitet. [vgl.4, S 267f]

### 3.2.17 Auftrieb warmer Luft - Das Prinzip des Schornsteins

#### Material

- Teebeutel
- Zwei Feuerzeuge



**Abbildung 24: Anzünden des Teebeutels**

#### Aufbau und Durchführung

Man öffnet die Metall-Klammer des Teebeutels ganz vorsichtig mit z.B. einer Schere, sodass der Stoff selbst unbeschädigt bleibt. Dann öffnet man den Beutel und entleert den Tee vollständig. Jetzt breitet man ihn ganz aus und stellt ihn mit der Zylinder-Querschnittsfläche nach unten gerade auf einen Tisch oder auf den Boden. Schließlich nimmt man die zwei Feuerzeuge zur Hand und zündet den Beutel zeitgleich an zwei gegenüberliegenden Stellen des oberen Endes an. Der Teebeutel sollte nun gleichmäßig von oben nach unten abbrennen, bis nur mehr sein Asche-Gerüst übrig ist. Dieses hebt schließlich während dem Erlöschen der letzten Flammen ab und steigt ein bis zwei Meter in die Höhe.



**Abbildung 25: Das Aschegerüst des Teebeutels beim Abheben**

#### Physikalischer Hintergrund

Das Aschegerüst des Teebeutels hat nur ein minimales Gewicht, und durch die Hitze der Flammen haben wir in den Zwischenräumen überall heiße Luft. Diese aber wiederum hat eine geringere Dichte als kalte Luft, weshalb sie auch aufsteigt und in diesem Zuge den Teebeutel mitnimmt.

Das Prinzip des Schornsteins

Zuerst möchte ich an dieser Stelle die barometrische Höhenformel herleiten, die für dieses und die beiden folgenden Experimente von großer Bedeutung ist.

Im Gegensatz zum hydrostatischen Druck bei Flüssigkeiten beobachten wir bei Gasen eine exponentielle Abnahme des Druckes mit zunehmender Höhe  $h$ , den so genannten aerostatischen Druck  $p$ .

Für kleine Änderungen des Druckes  $\delta p$  erhalten wir

$$\delta p = -\rho \cdot g \cdot \delta h \quad 20$$

Ähnlich dem hydrostatischen Druck. Bei gleich bleibender Temperatur ist aber die Dichte  $\rho$  stets proportional zum Druck  $p$  relativ zum Ausgangsdruck  $p_0$  bzw. zur Ausgangsdichte  $\rho_0$ .

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} \quad 21$$

Umformen dieser Gleichung und Einsetzen in Formel 20 liefert

$$\delta p = -\frac{p}{p_0} \cdot \rho_0 \cdot g \cdot \delta h \quad 22$$

Daraus folgt nach Trennung der Variablen

$$\int_{p_0}^p \frac{\delta p}{p} = \int_0^h -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot \delta h \quad 23$$

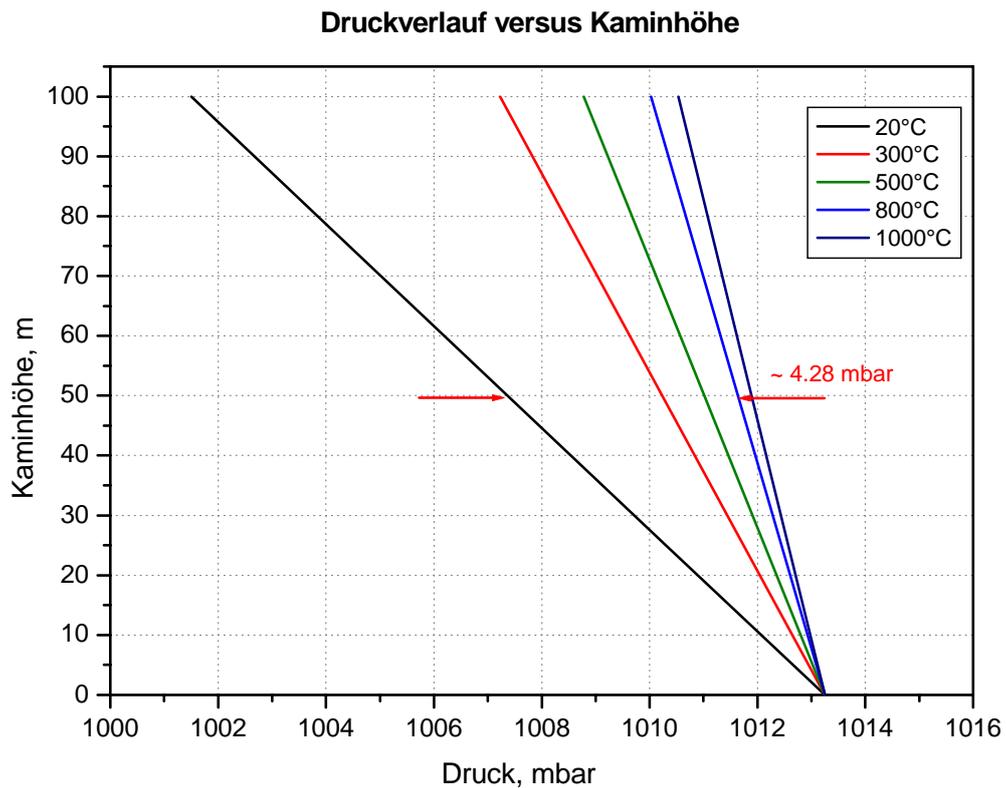
Da wir im rechten Integral nur Konstanten haben bekommen wir nach Einsetzen der Grenzen

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h \rightarrow \frac{p}{p_0} = e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}} \quad 24$$

Schließlich kommen wir zur barometrischen Höhenformel

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}} \quad 25$$

In einem Kamin ist, aufgrund einer angenommenen Temperatur von ca. 800° C, der Druck höher als außerhalb, weil die Dichte heißer Luft um einiges geringer ist als jene kalter Luft. Bei einem Ausgangsdruck von z.B. 1013,25 [mbar] erhalten wir für die Dichten von Luft bei 20°  $\rho_{0(20^\circ\text{C})} = 1,2041 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  bzw. bei 800°C  $\rho_{0(800^\circ\text{C})} = 0,3289 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Um den Druckverlauf in einem Kamin besser zu veranschaulichen möchte ich folgendes Diagramm mit Tabelle zitieren.



| Höhe [m] | Druck bei 20°C [mbar] | Druck bei 800°C [mbar] | Differenzdruck [mbar] |
|----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 0,1      | 1013,238              | 1013,247               | 0,009                 |
| 1        | 1013,132              | 1013,218               | 0,086                 |
| 5        | 1012,660              | 1013,089               | 0,429                 |
| 10       | 1012,069              | 1012,927               | 0,858                 |
| 15       | 1011,480              | 1012,766               | 1,286                 |
| 20       | 1010,890              | 1012,605               | 1,715                 |
| 25       | 1010,301              | 1012,444               | 2,142                 |
| 30       | 1009,712              | 1012,282               | 2,570                 |
| 35       | 1009,124              | 1012,121               | 2,997                 |
| 40       | 1008,536              | 1011,960               | 3,424                 |
| 45       | 1007,948              | 1011,799               | 3,851                 |
| 50       | 1007,361              | 1011,638               | 4,277                 |

Abbildung 26: Graphik und Tabelle zur Demonstration des Druckverlaufs im Kamin [6]

### 3.2.18 Die Helium – Seifenblasen

#### Material

- Pustefix
- Helium

#### Aufbau und Durchführung

Entweder man rührt sich selbst eine Seifenlösung an und bastelt eine Blasevorrichtung, oder man wählt den bequemeren Weg und besorgt sich ein so genanntes Pustefix. Es ist zu empfehlen, die Öffnung der Helium-Flasche mit einem Gummi-Schlauch zu verlängern, damit man flexibler ist. Man kann auch mit dem Schlauch direkt in die Seifenlösung eintauchen, hält ihn dann mit der Öffnung nach oben und dreht die Düse der Flasche langsam auf. Es bildet sich eine Helium-Seifenblase nach der anderen, die gleich zur Decke empor steigen. Will man hingegen den Plastikring in die Seifenlösung eintauchen, so sollte man die Düse der Helium-Flasche etwas mehr aufdrehen, damit man einen besseren Heliumstrom hat. Dann werden die Blasen schnell hintereinander entstehen und im Idealfall alle aufsteigen. Erzeugt man zwischenzeitlich Seifenblasen mit Luft, so werden sie alle zu Boden sinken. Damit der Effekt besser zur Geltung kommt, kann man auch abwechselnd Helium- bzw. Luftblasen erzeugen.

#### Physikalischer Hintergrund

Verantwortlich für das Aufsteigen der Helium-Seifenblasen ist die geringere Dichte, die das Gas gegenüber der Luft hat. Sobald das Volumen der Heliumblasen groß genug ist, steigen sie auch auf. Die Seifenhaut ist zwar um einiges schwerer als Luft, jedoch ist Helium um ein Vielfaches leichter, weshalb die Seifenblasen in die Höhe steigen, sobald der Auftrieb das Gewicht der Seifenhaut aufhebt bzw. überwiegt.



**Abbildung 27: Mit Helium bzw. Luft gefüllte Seifenblasen**

### 3.2.19 Der schwebende Luftballon

#### Material

- Luftballon
- Großen geschlossenen Behälter
- Kohlenmonoxid



**Abbildung 28: Der Luftballon schwebt auf Kohlendioxid**

#### Aufbau und Durchführung

Man bläst einen Luftballon sehr groß auf, und bindet den Knoten so nah wie möglich zur Ballonwand hin. Den überstehenden Teil des Gummis entfernt man mit einer Schere, damit das Gewicht des Ballons so klein wie möglich ist. Dann stellt man den Behälter, z.B. einen großen Papierkorb, auf den Boden vor sich hin und befüllt ihn vollständig mit Kohlenmonoxid, oder einem anderen Gas, welches schwerer als Luft ist. Jetzt gibt man den Luftballon in den Behälter und wird beobachten, dass dieser darin schwebt. Um es besser zu veranschaulichen, lässt man den Ballon einmal neben dem Behälter los, er wird zu Boden fallen. Daraufhin befördert man ihn ein weiteres Mal in den Behälter, wo er abermals nicht sinkt.

#### Physikalischer Hintergrund

Das Kohlenmonoxid ist schwerer als Luft und sinkt deshalb in den Behälter hinein. Im Luftballon befindet sich Atemluft, deren Dichte nur ein wenig größer als die der uns umgebenden Luft ist. Die Dichte des Kohlenmonoxids ist aber auch größer als die der Atemluft, weshalb der Ballon auch im Behälter schwebt und daneben zu Boden fällt. Wir haben hier einen ähnlichen Fall wie bei den Helium-Seifenblasen nur mit anderen Gasen.

### 3.2.20 Die Libelle

#### Material

- Stativ mit einer Libelle
- Wasserwaage

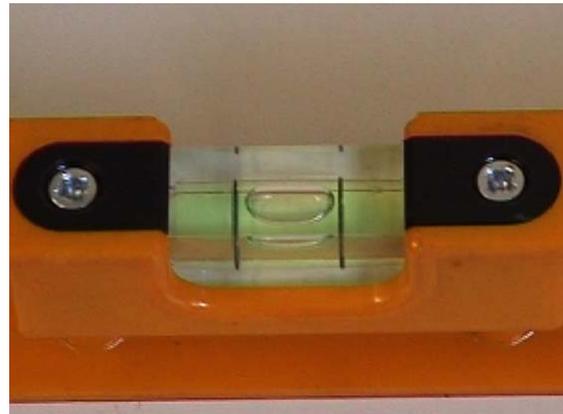


Abbildung 29: Die Libelle einer Wasserwaage

#### Aufbau und Durchführung

Jeder Mensch, der schon einmal mit einer Wasserwaage zu tun gehabt hat, weiß, dass sich die Luftblase in der Flüssigkeit immer am höchst möglichen Punkt befindet. Die Begrenzungslinien, die bei der Eichung der Geräte eingezeichnet worden sind, dienen dem Benützer als Hilfsmittel.

#### Physikalischer Hintergrund

Wie weit ein Körper in eine Flüssigkeit eintaucht, hängt von dessen Gewicht, dessen Volumen und in weiterer Folge vom Auftrieb ab. Dies wird im Prinzip von Archimedes kurz zusammengefasst: „Der Auftrieb eines Körpers ist gleich groß wie das Gewicht der Flüssigkeit, welche von diesem Körper verdrängt wird.“

Der Auftrieb ist eine Kraft  $F_{\text{Auftrieb}}$ , die aufwärts gerichtet ist. Auf einen Körper, der sich in einer Flüssigkeit befindet, wirken zwei Drücke, einer  $p_2$  auf dessen Grundfläche  $A$  und einer  $p_1$  auf dessen Deckfläche. Zur Herleitung verwenden wir einen Quader. Mit Hilfe von Formel 19 für den hydrostatischen Druck erhalten wir eine resultierende Kraft  $F$ , die Auftriebskraft

$$F_{\text{Auftrieb}} = p_2 \cdot A - p_1 \cdot A = \rho \cdot g \cdot A \cdot (h_2 - h_1) = \rho \cdot g \cdot V \quad 26$$

Wobei hier die Dichte der Flüssigkeit mit  $\rho$  und die Eintauchtiefen in die Flüssigkeit mit  $h_i$  bezeichnet sind. Ist die Dichte eines Körpers gleich der Dichte der Flüssigkeit, in die er eintaucht, so schwebt der Körper in der Flüssigkeit. Ist hingegen die Dichte des Körpers kleiner als die Dichte der Flüssigkeit, dann schwimmt der Körper und sinkt genau wieder soweit ein, bis sich Auftriebskraft und Gewichtskraft das Gleichgewicht halten.

$$F_{\text{Auftrieb}} = \rho \cdot \bar{V} \cdot g = F_G$$

27

$\bar{V}$  Volumen der verdrängten Flüssigkeit

Da das Gewicht von Gasen im Vergleich zu Flüssigkeiten aber vernachlässigbar ist, jedoch das Volumen verhältnismäßig groß ist, steigen Gasblasen aufgrund des Auftriebs in Flüssigkeiten zum höchst möglichen Punkt auf. Ein einfaches Beispiel ist z.B. das Hineinblasen von Luft in ein mit Wasser gefülltes Gefäß über einen Trinkhalm. Die Schwierigkeit liegt hier nur darin, eine Luftblase in ein vollständig gefülltes und abgeschlossenes Gefäß zu bringen. Man muss einmal versuchen einen größeren Ball unter Wasser zu drücken. Das ist gar nicht so leicht, wie es aussieht.

### 3.2.21 Das Umschütten von Luft

#### Material

- Zwei Gläser
- Großer durchsichtiger Behälter
- Wasser



**Abbildung 30: Umschütten von Luft unter Wasser**

#### Aufbau und Durchführung

Die beiden Gläser sollten gleich groß sein und müssen so neben einander in den Behälter passen, dass man eines davon auch umdrehen kann. Sobald man das kontrolliert hat, befüllt man das große Gefäß mit Wasser, bis der Wasserstand ca. die doppelte Höhe der Gläser beträgt. Jetzt gibt man das erste Gefäß mit der Öffnung nach unten in den Behälter, achtet darauf, dass kein Wasser in das Glas eintritt und hält es so unter Wasser fest. Man kann es ruhig leicht mit der Öffnung gegen den Boden des Behälters drücken. Nun gibt man das zweite Glas mit der Öffnung leicht zur Seite und nach oben geneigt hinein, damit es mit Wasser voll läuft. Ab jetzt muss man darauf achten, dass beide Gläser stets zur Gänze unter

Wasser sind. Unter Wasser dreht man das zweite Glas auch mit der Öffnung nach unten und bringt die Gläser im Behälter so neben einander, dass sich die Öffnung des zweiten Glases oberhalb der Öffnung des ersten mit Luft gefüllten Glases befindet. Man beginnt langsam das luftgefüllte Glas zur Seite zu neigen, damit nacheinander Luftblasen aufsteigen können. Dabei muss man darauf achten, dass man mit dem der Öffnung des zweiten Glases die hochsteigenden Blasen auffängt. Kippt man das erste Glas immer mehr zur Seite bis dessen Öffnung schon wieder leicht nach oben zeigt, so ist es nun auch vollständig mit Wasser gefüllt. Wenn man geschickt genug war, sollte sich die gesamte Luft, die zu Beginn im ersten Glas war, nun im zweiten Glas befinden. Nimmt man beide Gläser in dieser Position aus dem Wasser, so erkennt man, dass nun im zweiten Glas nur Luft ist und im ersten nur Wasser.

### Physikalischer Hintergrund

Die physikalische Erklärung ist um einiges kürzer als die Durchführung dieses Experiments. Gasblasen und somit auch Luftblasen sind in Flüssigkeiten stets an der höchst möglichen Stelle, bzw. haben das Bedürfnis nach oben zu steigen. Die Luft kann aus dem ersten Glas aber beim Eintauchen nicht austreten, da sie von allen Seiten von Glas blockiert wird, außer von der unteren. Nach unten kann die Luft aber in Flüssigkeiten nicht fließen. Beim Auffangen der Luftblasen mit dem zweiten Glas spielt wieder der Auftrieb eine große Rolle. Die Luftblasen steigen bis zum Boden des zweiten Glases hoch, und das Volumen der Luftblase, verdrängt genau die dementsprechende Menge an Wasser aus dem Glas. Wenn das untere Glas größer als das obere ist, so würden die Luftblasen nachdem das obere Glas mit Luft gefüllt ist, zum Wasserstand des Behälters hochsteigen und sich dort wieder in der Luft auflösen.

### 3.2.22 Holz schwimmt nicht

#### Material

- Holzkegel
- Glas
- Wasser
- Öl

#### Aufbau und Durchführung



**Abbildung 31: Ein nicht schwimmendes Stück Holz**

Mit Hilfe einer Hautcreme oder eines Öls streicht man einen leichten Film auf die Unterseite des Kegels. Man kann es auch mit flüssigem Kerzenwachs versuchen, indem man das Holzstück eintaucht und auf einer Glasplatte hart werden lässt. Ich habe den Rand des hölzernen Eierbeckens (Holzkegel) leicht mit einem Ölfilm überzogen. Diese kleine Schicht dichtet den Boden des Holzstücks besser mit dem Grund des Glases, der völlig eben sein muss, ab. Der Eierbecher ist vom Vorteil, weil er als Grundfläche nur einen ganz schmalen Kreisring besitzt, der es erleichtert eine plane Ebene zu bekommen. Dann stellt man das Holzstück mit der eingeschmierten Seite nach unten in das Glas und drückt es mit dem Zeigefinger leicht an. Währenddessen füllt man das Glas mit Wasser, wobei der Wasserpegel im Glas um einige Zentimeter über das Holzstück steigen muss. Jetzt entfernt man ganz vorsichtig den Zeigefinger. Ist es einem gelungen den Finger wegzunehmen, ohne das Holzstück auch nur ein bisschen anzuheben, so bleibt dieses am Grund des mit Wasser gefüllten Gefäßes stehen. Versetzt man dem Glas nun einen leichten Stoß, sodass das Holzstück leicht wippt, so wird dieses sofort aufsteigen und auf der Wasseroberfläche schwimmen.

#### Physikalischer Hintergrund

Das Wichtigste bei diesem Experiment sind die Grundfläche des Holzstückes und die Bodenfläche des Glases, die beide völlig eben sein müssen. Denn ein Körper kann nur einen Auftrieb erfahren, wenn auch Flüssigkeit unter ihn gelangen kann, was die beiden ebenen

Flächen aber verhindern. Dabei muss man aber auch darauf achten, dass das verwendete Holzstück auch an den Seitenflächen keinen Auftrieb erfährt. Weil es sich mit der Zeit über die Seitenflächen mit Wasser ansaugt, steigt es aber ohnehin von selbst hoch. Durch das Wippen des Holzstückes kann das Wasser auch unter die Grundfläche gelangen und der Eierbecher erfährt einen Auftrieb. Das Holzstück steigt bis zur Wasseroberfläche hoch, weil die Dichte von Holz kleiner ist als die des Wassers und schwimmt, sobald Auftrieb und Gewicht gleich groß sind.

### 3.2.23 Der Tischtennisball im Trichter

#### Material

- Trichter
- Tischtennisball
- Fließendes Wasser



**Abbildung 32: Tischtennisball im Sog eines Trichters**

#### Aufbau und Durchführung

Man legt den Tischtennisball in den Trichter und dann hält man beides zusammen unter einen fließenden Wasserhahn. Der Ball wird sich immer zur Ausflussmündung hin drängen, egal wie viel Wasser auch im Trichter ist. Sobald man aber mit der zweiten Hand mit einem Finger die Ausflussöffnung zuhält, steigt der Ball hoch und schwimmt auf der Wasseroberfläche im Trichter.

#### Physikalischer Hintergrund

Solange das Wasser abfließen kann, erfährt der Tischtennisball auch keinen Auftrieb. Der hydrostatische Druck in einer Flüssigkeit nimmt ja mit der Tiefe zu, weshalb auch der Druck auf die Unterseite eines Körpers größer ist als auf die Oberseite. Solange das Wasser aber abfließen kann, fehlt der Druck auf die Unterseite des Balls. Sobald man die Abflussöffnung

zuhält, kann das Wasser nicht mehr länger abfließen und der Ball erfährt an seiner Unterseite einen Druck nach oben und steigt auf. Da das Gewicht des Balls aber so viel geringer als jene des Wassers ist, steigt er auf bis zur Wasseroberfläche im Trichter und schwimmt.

### 3.2.24 Die tanzenden Rosinen

#### Material

- Rosinen
- Mineralwasser
- Glas



**Abbildung 33: Rosinen in einem Glas Mineralwasser**

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt das Glas mit Mineralwasser, welches stark mit Kohlensäure versetzt sein muss, und gibt dann ca. 10 Rosinen hinein. Sie werden zu Boden sinken, jedoch werden einige gleich wieder hochsteigen bis zur Wasseroberfläche und sinken dann wieder bis zum Grund des Glases. Es kann sogar vorkommen, dass eine Rosine kurzzeitig in derselben Mineralwassertiefe oberhalb des Bodens verweilt. Die Rosinen werden mehrmals hochsteigen und wieder sinken.

#### Physikalischer Hintergrund

Damit ein Körper in einer Flüssigkeit schwimmt, muss seine Auftriebskraft größer sein als seine Gewichtskraft. Die Dichte der Rosinen ist aber höher als die Dichte von Wasser, weshalb sie zu Beginn auch alle zu Boden sinken. Im Mineralwasser befinden sich aber unzählige Kohlendioxidbläschen, von denen sich einige an die Oberfläche der Rosinen hängen. Vor dem Öffnen ist das Kohlendioxid auf Grund des höheren Drucks in der Flasche im Wasser gelöst und die Bläschen entstehen erst danach. Lässt man ein mit Kohlendioxid

versetztes Getränk längere Zeit geöffnet stehen, so entweicht nahezu das gesamte Gas, und es schmeckt abgestanden. Die Oberfläche der Rosinen muss sehr rau sein, weshalb der Versuch mit z.B. Zitronenkernen auch weniger gut funktioniert. Sobald genügend Bläschen an der Oberfläche der Rosine haften, wird diese aufsteigen. Die kleinen Blasen vergrößern zwar das Volumen der Rosine, ihr Gewicht jedoch nur vernachlässigbar. Das geschieht bis das Rosinen-Bläschen-Gemisch eine geringere Dichte als das Mineralwasser aufweist und die Rosine bis zur Oberfläche hoch steigt. Dort zerplatzen die einzelnen Bläschen wieder und die Rosine sinkt zu Boden. Löst sich während dem Aufsteigen ein Bläschen von der Rosine, sodass sich Auftriebskraft und Gewichtskraft die Waage halten, schwebt sie kurzzeitig bis entweder weitere Bläschen zerplatzen oder andere andocken.

### 3.2.25 Der Auftrieb und die Balkenwaage

#### Material

- Balkenwaage
- Zwei gleich schwere Gewichte
- Behälter
- Wasser



Abbildung 34: Auftrieb eines Gewichts bei einer Balkenwaage

#### Aufbau und Durchführung

Man stellt die Balkenwaage auf einen Tisch und hängt im gleichen Abstand vom Zentrum des Balkens jeweils ein Gewicht mit einem Kilogramm, sodass die Waage im Gleichgewicht ist. Jetzt füllt man den Behälter, worin ein Gewicht leicht Platz finden muss, mit Wasser und hält ihn unter eines der beiden Gewichte. Hebt man den Behälter an, bis ein Teil des Gewichts unter die Wasseroberfläche ragt, wird dieses Gewicht sofort angehoben und die Balkenwaage kippt aus dem Gleichgewicht. Hält man den Behälter noch höher so wird das zweite Gewicht sinken, bis es die Tischplatte erreicht. Nimmt man den wassergefüllten Behälter wieder weg, so muss sich die Balkenwaage, bei entsprechend guter Aufhängung, wieder zurück ins Gleichgewicht stellen.

### Physikalischer Hintergrund

Die Balkenwaage mit den beiden Gewichten steht zu Beginn im Gleichgewicht, weil die Massen links und rechts vom Zentrum genau gleich weit entfernt und gleich groß sind. Deshalb wirkt auf beiden Seiten dieselbe Gewichtskraft nach unten. Stellt man ein mit Wasser gefülltes Gefäß so unter eines der beiden Gewichte, damit dieses unter die Wasseroberfläche reicht, erfährt das Gewicht auch eine Auftriebskraft, die aber nach oben gerichtet ist. Somit können sich die beiden Gewichte nicht mehr die Waage halten, weil auf das eine nur die Gewichtskraft hingegen auf das zweite dieselbe Gewichtskraft weniger der Auftriebskraft wirkt. Deshalb muss das Gewicht, das einen Auftrieb erfährt, auch steigen und bringt daraufhin die Balkenwaage aus dem Gleichgewicht.

### 3.2.26 Die Volumenverdrängung

#### Material

- Schiffchen aus Papier oder Karton
- Kleine Stahlkugel
- Glasbehälter
- Wasser
- Schnur
- Stift oder Gummiband



**Abbildung 35: Volumenverdrängung unterschiedlich geformter Gegenstände**

#### Aufbau und Durchführung

Man bastelt sich ein Schiffchen aus Papier oder Karton, oder sucht sich eine kleine Kartonschachtel. Dann bindet man an die Stahlkugel eine Schnur und legt die Kugel in die Schachtel. Den Behälter füllt man etwa zur Hälfte mit Wasser, sodass der Karton darin schwimmen kann. Jetzt gibt man die Schachtel mit der Stahlkugel darin in den Behälter und lässt die Schnur über den Behälter heraus ragen. Mit einem Stift oder einem Gummiband markiert man genau den Wasserstand im Behälter. Daraufhin hebt man mit Hilfe der Schnur die Stahlkugel aus seinem Schiffchen und lässt sie daneben ins Wasser fallen. Man wird feststellen, dass sich der Wasserstand jetzt unterhalb der Markierung befindet.

### Physikalischer Hintergrund

Formel 29 über den Auftrieb in einer Flüssigkeit besagt ja, dass die Auftriebskraft genau dem Volumen der verdrängten Flüssigkeit entspricht. Somit wird durch das Schiffchen, wenn sich die Stahlkugel in ihm befindet, viel mehr Flüssigkeit verdrängt, weil das Gewicht der Kugel auf die Grundfläche des Schiffchens wirkt. Aufgrund dieses größeren Gewichts wird auch eine viel größere Menge an Flüssigkeit verdrängt, als im zweiten Fall, wenn die Kugel im Wasser liegt. Die Flüssigkeit kann aber nicht ausströmen, sondern der Flüssigkeitsstand wandert im Behälter nach oben. Legt man aber nun die Kugel ins Wasser so ist das Volumen der Flüssigkeit die jetzt verdrängt wird, viel kleiner, weil das Volumen der Stahlkugel viel kleiner ist, als das Volumen des Schiffchens mit der Stahlkugel darin. Der Teil des Volumens den das Kartonschiffchen alleine verdrängt ist minimal. Weiters ist die Dichte von Stahl um ein Vielfaches höher als die Dichte von Wasser, darum ist auch das Volumen der verdrängten Flüssigkeit um ein Vielfaches höher. Deshalb sinkt auch der Flüssigkeitsstand im Behälter, weil das Volumen der verdrängten Flüssigkeit kleiner geworden ist.

### 3.2.27 Der Cartesianische Taucher

#### Material

- Glasflasche
- Wasser
- Schere
- Zündholzkopf

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt eine Glasflasche vollständig mit Wasser und stellt sie auf einen Tisch. Dann schneidet man nur den Kopf eines Zündholzes mit einem Messer oder einer Schere ab und legt ihn auf die Wasseroberfläche. Nun schließt man die Glasflasche mit dem Zündholzkopf



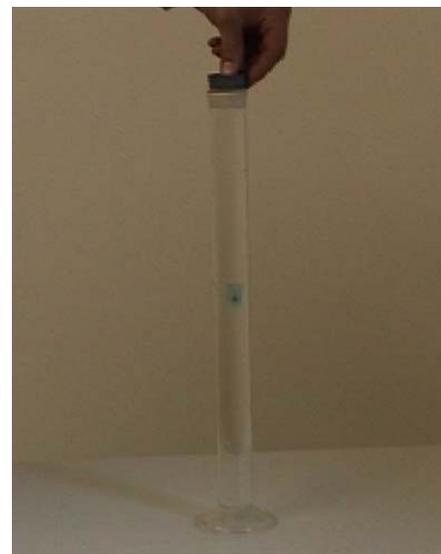
**Abbildung 36: Ein Modell des Cartesianischen Tauchers**

darin mit dem Daumen ab und presst die Flasche fest gegen die Tischplatte. Dabei muss man darauf achten, dass die Flasche nicht umkippt und man die Öffnung gut abdichtet. Je stärker man drückt, desto tiefer wird der Zündholzkopf sinken. Dabei kann man sich jetzt natürlich spielen, indem man ihn bis zum Boden sinken lässt, durch Nachlassen wieder hoch steigen lässt, oder bei genügend Geschick schweben lässt.

### Physikalischer Hintergrund

Durch den Druck auf die Flasche ändern sich der Druck in der Flüssigkeit und der Druck auf den Zündholzkopf. Da sich im Zündholzkopf aber viele Luftbläschen befinden, werden diese auch komprimiert und es kann Wasser in den Zündholzkopf eindringen. Dadurch erhöht sich das Gewicht des Zündholzkopfes, und er beginnt zu sinken. Je mehr man die Luft komprimiert desto mehr Wasser kann eindringen und umso weiter sinkt er. Verringert man hingegen den Druck wieder beginnt er wieder zu steigen, weil sich die Luftbläschen wieder ein wenig ausweiten können. Gleichgewicht herrscht genau dann, wenn sich der Auftrieb des Zündholzkopfes zusammen mit den Luftbläschen und dem Wasser in sich mit ihrem Gewicht die Waage halten.

Der originale Cartesianische Taucher ist ein kleines mit Luft gefülltes Plastikteufelchen mit nur einer kleinen Öffnung an seiner Seite und ist im Fachhandel erhältlich. Dieser beginnt während dem Hochsteigen auch noch sich zu drehen, da das Wasser an der Seite wieder aus dem Taucher ausströmt, wodurch dieser ein Drehmoment erfährt.



**Abbildung 37: Das Original des Cartesianischen Tauchers**

### 3.2.28 Das Aräometer

#### Material

- Zwei Gläser
- Strohhalm
- Schere
- Stift
- Salz
  
- Wasser
- Knetmasse

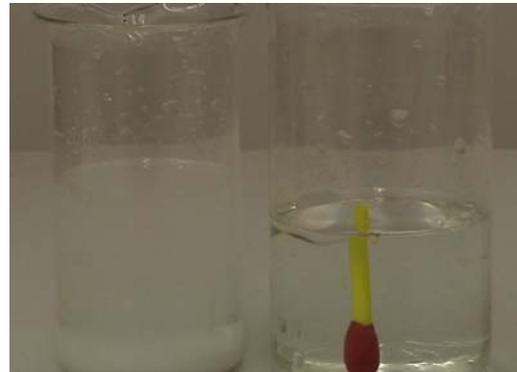


Abbildung 38: Das Aräometer im Wasser

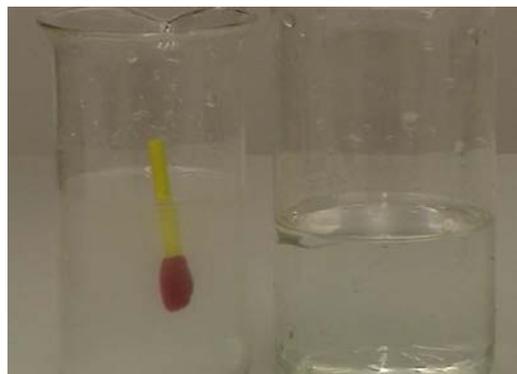


Abbildung 39: Das Aräometer in einer Salzwasserlösung

#### Aufbau und Durchführung

Man schneidet von einem Strohhalm ein ca. fünf Zentimeter langes Stück ab und beschwert eines der beiden Enden mit einer Kugel aus Knetmasse. Dann füllt man zwei Gläser halb voll mit Wasser und rührt in eines der beiden Salz ein, so dass man eine gesättigte Salzlösung bekommt. Nun gibt man den Strohhalm in eines der beiden Gefäße und markiert mit einem Stift die Eintauchtiefe. Daraufhin setzt man den Strohhalm in das zweite Gefäß und vergleicht die Markierung mit der Eintauchtiefe in der dieser Flüssigkeit. Man wird beobachten, dass der Strohhalm in die Salzlösung weniger tief eintaucht als ins Wasser.

#### Physikalischer Hintergrund

Wie in Formel 27 gezeigt, schwimmt ein Körper mit geringerer Dichte als die der Flüssigkeit, wenn sich Auftriebskraft und Gewichtskraft die Waage halten. Für die Auftriebskraft ist aber, wie aus Formel 27 zu sehen ist, die Dichte der Flüssigkeit und das Volumen der verdrängten

Flüssigkeit von Bedeutung. Somit erfährt derselbe Körper in einer Flüssigkeit mit höherer Dichte auch mehr Auftrieb, da die Gewichtskraft des Körpers gleich bleibt. Wenn wir das Volumen als Grundfläche mal der Höhe des Körpers anschreiben erhalten wir für die Gewichtskraft und die Auftriebskraft

$$F_A = \rho_F \cdot A \cdot h_F \cdot g \quad \text{bzw.} \quad F_G = \rho_K \cdot A \cdot h_K \cdot g \quad 28$$

Da der Körper aber schwimmt, können wir die beiden gleichsetzen

$$\rho_F \cdot A \cdot h_F \cdot g = \rho_K \cdot A \cdot h_K \cdot g \rightarrow h_F = h_K \cdot \frac{\rho_K}{\rho_F} \quad 29$$

Für den Teil des Körpers der aus der Flüssigkeit heraus ragt, erhalten wir

$$\Delta h = h_K - h_F = h_K \left( 1 - \frac{\rho_K}{\rho_F} \right) \quad 30$$

Die Höhe und die Dichte des Körpers bleiben gleich, deshalb hängt die Eindringtiefe  $\Delta h$  des Körpers nur von der Dichte der Flüssigkeit ab, was ja bereits aus Formel 27 für die Auftriebskraft hervorgeht. Aus Formel 30 können wir folgern: Je höher die Dichte der Flüssigkeit, desto weiter ragt der Körper aus der Flüssigkeit heraus.

### 3.2.29 Das schwimmende Ei

#### Material

- Hart gekochtes Ei
- Salz
- Wasser



**Abbildung 40: Ein Ei schwimmt in einer Salzwasserlösung**

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt ein Glas mit Wasser und legt ein hart gekochtes Ei hinein, es wird sofort untergehen. Nun gibt man unter ständigem Umrühren immer mehr Salz in das Glas, bis man

eine konzentrierte Salzlösung hergestellt hat. Ist die Salzlösung stark genug, so steigt das Ei auf und schwimmt in der Flüssigkeit. Ist man mit dem Beigeben von Salz vorsichtig genug, so kann man auch ein Schweben des Eis in der Salzlösung erreichen.

### Physikalischer Hintergrund

Die Erklärung ist dem vorherigen Experiment sehr ähnlich. Wie wir bereits einige Male gehört haben, steigt die Auftriebskraft proportional mit der Dichte der Flüssigkeit. Je konzentrierter die Salzlösung wird, desto höher wird ihre Dichte und desto mehr Auftrieb erfährt das Ei. Sobald die Dichte der Salzlösung gleich groß ist wie die Dichte des Eis, beginnt das Ei zu schweben. Wenn die Dichte der Flüssigkeit höher wird als jene des Eis, beginnt das Ei sogar zu schwimmen.

## 3.2.30 Luftblasen in unterschiedlich gefüllten Gefäßen

### Material

- Zwei Gläser
- Zwei Strohhalm
- Salz
- Wasser



**Abbildung 41: Luftblasen bei unterschiedlichen Flüssigkeitsständen**

### Aufbau und Durchführung

Zuerst füllt man beide Gläser mit Leitungswasser, wobei in einem gut doppelt so viel Flüssigkeit als im zweiten sein sollte. Jetzt stellt man je einen Strohhalm in jedes Glas und beginnt in die beiden oberen Enden der Halme zugleich hinein zu blasen. Je nach Stärke des Atemstoßes steigen immer zuerst im Gefäß mit weniger Flüssigkeit Blasen auf. Wenn man vorsichtig genug Luft hinein presst, steigen nur im weniger gefüllten Glas Luftblasen auf. Füllt man beide Gläser genau gleich hoch mit Wasser, so werden die Luftblasen in beiden Gefäßen gleichzeitig aufsteigen, wenn man kräftig genug hinein bläst. Bei gleichem Flüssigkeitsstand gibt man schließlich in eines der beiden Gläser nach und nach Salz hinzu

und stellt so eine gesättigte Salzlösung her. Presst man erneut durch beide Strohhalmte zugleich Luft hinein, so steigen die Luftblasen zuerst im Wasser auf.

### Physikalischer Hintergrund

Der hydrostatische Druck ist verantwortlich für den Druck in einer Flüssigkeit in einer bestimmten Tiefe. Deshalb steigen in dem Glas, das nur halb soviel Flüssigkeit wie das andere beinhaltet, zuerst Blasen auf, sobald man den Gesamtdruck, der am Boden des Glases herrscht, überwunden hat. Sind nun beide Gläser mit der gleichen Flüssigkeit



**Abbildung 42: Luftblasen bei gleicher Füllhöhe aber unterschiedlicher Dichte**

exakt gleich hoch mit Wasser gefüllt, so steigen beim Hineinblasen nach Überwindung des Gesamtdrucks, der am Grund des Glases herrscht, in beiden Gläsern gleichzeitig Blasen auf.

Bei der gesättigten Salzlösung steigen deshalb bei gleicher Füllhöhe die Luftblasen zuerst im Wasser auf, weil der Gesamtdruck am Boden des Glases, welches das Salzwasser beinhaltet, höher ist. Da Salzwasser eine höhere Dichte als Leitungswasser aufweist, ist auch der hydrostatische Druck höher, weil er direkt proportional zur Dichte der Flüssigkeit ist.

### **3.2.31 Cola-Light ist wirklich leichter**

#### Material

- Dose Cola
- Dose Cola-Light
- Großen Behälter
- Wasser



**Abbildung 43: Auftrieb von Cola bzw. Cola-Light**

### Aufbau und Durchführung

Man füllt einen großen durchsichtigen Behälter ca. bis zur doppelten Dosenhöhe mit Wasser und gibt die beiden verschlossenen Dosen hinein. Man wird beobachten, dass die gewöhnliche Cola-Dose untergeht und die Cola-Light-Dose hingegen im Wasser schwimmt.

### Physikalischer Hintergrund

Der Auftrieb eines Körpers in einer Flüssigkeit ist gleich groß wie das Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeit, wie wir in Formel 29 beim Prinzip von Archimedes bereits gelesen haben. Die Auftriebskraft ist für beide Dosen gleich groß, da sie exakt dasselbe Volumen besitzen, jedoch ist das Gewicht der Cola-Dose größer als jenes der Cola-Light-Dose. Dies beruht auf der Tatsache, dass Zucker schwerer ist als der künstliche Süßstoff und dass die beigegebene Menge des Zuckers um einiges höher ist als die des Süßstoffes. Somit ist die Dichte der Cola-Dose höher als die des Leitungswassers, weshalb die Dose auch zu Boden sinkt. Die Dichte der Cola-Light-Dose hingegen ist geringfügig kleiner als jene des Wassers, weshalb sie nicht untergeht sondern an der Wasseroberfläche schwimmt.

Mit Hilfe einer Senkspindel haben wir für Cola-Light eine Dichte von ca.  $1002 \text{ kg/m}^3$  und für Cola eine Dichte von ca.  $1040 \text{ kg/m}^3$  messen können. Das Experiment mit den geschlossenen Dosen ist dennoch mit Vorsicht zu behandeln, da es durch unterschiedliche Abfüllmengen bzw. einer unterschiedlichen Konzentration an Kohlendioxid für Cola bzw. Cola-Light zu anderen Ergebnissen kommen kann. So ist es durchaus möglich, dass beide Dosen sinken.

## 4 Mechanische Grenzflächenerscheinungen

### 4.1 Oberflächenspannung

Das Verlangen einer Flüssigkeit, ihre Oberfläche  $A_O$  so klein wie möglich zu halten, bezeichnet man als Oberflächenspannung  $\sigma$ . Die Oberflächenenergie  $E_O$  ist abhängig von der Oberflächenspannung.

$$E_O = \sigma \cdot A_O \quad 31$$

Die Oberflächenspannung ist eine Anziehungsenergie der einzelnen Flüssigkeitsmoleküle. Auf ein Teilchen im Inneren einer Flüssigkeit wirken Kräfte, die kugelsymmetrisch ausgerichtet sind und sich deshalb aufheben. Ein Teilchen am Rand einer Flüssigkeit erfährt eine resultierende Kraft tangential zur Oberfläche nach Innen. Diese Randteilchen wollen die Oberfläche so klein wie möglich halten. Bei z.B. einem gefüllten Glas sind die Kräfte an der Wasseroberfläche am Glasrand alle tangential nach Innen gerichtet. Diese Kraft  $F_R$  setzt sich aus der Oberflächenspannung und der Randlänge  $l_R$  zusammen.

$$F_R = \sigma \cdot l_R \quad 32$$

#### 4.1.1 Seifenmembran

##### 4.1.1.1 Der bewegliche Faden

###### Material

- U-förmigen Metallbügel
- Faden
- Glas
- Seifenlösung



**Abbildung 44: Seifenhaut zwischen Metallbügel und Faden**

Aufbau und Durchführung

Man stellt in einem Glas mit einem Waschmittel eine Seifenlösung her oder verwendet ein Pustefix. Dann biegt man sich aus einem ca. 15 cm langen feinen Kupferdraht einen U-förmigen Metallbügel. An dessen Enden formt man zwei kleine Haken, und befestigt dort ein Stück Faden, der um ein oder zwei Zentimeter länger sein soll als der Abstand zwischen den beiden Enden. Jetzt bindet man in der Mitte dieses Fadens ein weiteres kurzes Stück Faden an.

Diese Anordnung taucht man als Ganzes in die Seifenlösung, sodass sich beim Herausnehmen zwischen dem Metallbügel und dem Fadenstück eine Seifenhaut bildet. Man beobachtet, dass der Faden zum Mittelpunkt dieser entstandenen Fläche hin gezogen wird. Ziehen wir am zweiten Fadenstück, so vergrößern wir diese Fläche, wobei wir eine bestimmte Arbeit verrichten müssen. Lassen wir den Faden wieder vorsichtig los, so wird sich die Fläche sofort wieder in ihren Ausgangszustand zurückziehen.

Physikalischer Hintergrund

Wie in der Einleitung erwähnt, haben Flüssigkeiten das Bestreben ihre Oberfläche zu minimieren. Um die Erklärung etwas zu vereinfachen stellen wir uns an Stelle des Fadens einen beweglichen Metallbügel vor, der sich auf dem U-förmigen Gestänge hin und her schieben lässt. Die Kraft der Seifenhaut, die den Bügel heranzieht, ist in Formel 32 beschrieben. In Ruhelage gilt nun

$$\sigma = \frac{F_R}{2 \cdot l_R} \quad 33$$

Man muss beachten, dass eine Seifenhaut zwei Oberflächen besitzt, weshalb wir auch die Länge des Randes doppelt nehmen müssen. Somit muss man beim Vergrößern der Oberfläche folgende Arbeit  $W$  verrichten, wobei  $\Delta s$  den Weg beschreibt, um den der Bügel verschoben wird.

$$W = F_R \cdot \Delta s = \sigma \cdot 2 \cdot l_R \cdot \Delta s = \sigma \cdot \Delta A \quad 34$$

Die neue Oberfläche wird durch  $\Delta A$  beschrieben. Die Arbeit, die nötig ist um ein Oberflächenstück zu erzeugen, bezeichnet man als Oberflächenenergie oder Oberflächenenergiedichte  $w_0$ .

$$w_0 = \frac{W}{A} \quad 35$$

### 4.1.1.2 Der Würfel

#### Material

- Kupferdraht
- Glas
- Seifenlösung



**Abbildung 45: Minimalflächen bei einem Würfel 1**

#### Aufbau und Durchführung

Man bastelt sich aus dem Kupferdraht einen Würfel und lasst an einem Eckpunkt einen kleinen Griff vorstehen, damit man den Würfel leicht mit zwei Fingern fassen kann, ohne dabei eine Seitenfläche zu berühren. Es ist vom Vorteil die einzelnen Kanten an den Eckpunkten zu löten, um doppelte Kanten zu vermeiden. Eine Seifenlösung stellt man sich wie in Versuch 4.1.1.1. her und taucht den Würfel darin ein. Je nachdem, wie man den Würfel eintaucht bzw. wieder herauszieht, können zwei verschiedene Minimalflächen entstehen. Entweder es bildet sich in der Mitte eine kleine Kante, von der aus sich vier Oberflächen mit den parallelen Seitenkanten und zwei Mal vier Oberflächen zu den restlichen Kanten bilden. Gelingt es einem beim Herausziehen aus der Flüssigkeit eine kleine Luftblase aufzufangen, so bildet sich im Zentrum des Gestänges ein weiter kleinerer Würfel aus Seifenhaut von dessen Seitenkanten aus jeweils eine Oberfläche zur parallelen nächsten Seitenkante des Kupferwürfels entsteht. (siehe Abbildungen)

#### Physikalischer Hintergrund

Die Seifenhaut versucht ihre Oberfläche, wie zu Beginn des Kapitels erklärt worden ist, minimal zu halten und deshalb entstehen je nach Geschick, jedoch meistens mit einem Verhältnis von drei zu eins zugunsten des ersten Falls, beim Herausziehen die zwei beschriebenen Minimalflächen bzw. Figuren.



**Abbildung 46: Minimalflächen bei einem Würfel 2**

### 4.1.1.3 Das Prisma

#### Material

- Kupferdraht
- Glas
- Seifenlösung



**Abbildung 47: Minimalflächen bei einem Prisma**

#### Aufbau und Durchführung

Man bastelt sich aus dem Kupferdraht ein Prisma, indem man sich zuerst ein gleichseitiges Dreieck zusammen biegt. Daraufhin lötet man nochmals drei gleich lange Kanten an jeden Eckpunkt, sodass die drei freien Enden in einem Punkt zusammentreffen. Einen kleinen Griff sollte man sich auch an einen Eckpunkt anlöten. Das entstandene Prisma taucht man nun in die Seifenlösung (siehe 4.1.1.1.) ein und zieht es vorsichtig heraus. Dabei sollte sich genau in der Mitte des Prismas ein Schnittpunkt ergeben, indem sich die von den Seitenkanten ausgehenden Seifenhaut-Oberflächen schneiden.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Seifenhaut versucht ihre Oberfläche wieder minimal zu halten, deshalb versuchen sich die einzelnen Oberflächen so weit wie möglich zusammen zu ziehen.

## 4.1.2 Büroklammern auf einer Wasseroberfläche

### Material

- Wasser
- Gurkenglas
- Einige Büroklammern
- Spülmittel
- Strohhalm



**Abbildung 48: Büroklammern schwimmen auf Wasser**

### Aufbau und Durchführung

Man füllt das Glas mit Leitungswasser, bis schon eine leichte Wölbung der Flüssigkeit über den Glasrand hinaus zu erkennen ist. Dann versucht man vorsichtig über den Glasrand einige Büroklammern auf die Wasseroberfläche zu legen. Einige werden sinken, doch es sollte gelingen ein paar an der Wasseroberfläche zum Schwimmen zu bringen. Weil sich die Oberfläche bereits nach oben über den Glasrand hinaus wölbt, schwimmen die Büroklammern zum Rand hin, doch man kann versuchen, sie mit Hilfe einer feinen Nadel wieder ins Zentrum zu befördern. Daraufhin träufelt man mit Hilfe eines Strohhalm ein oder zwei Tropfen Spülmittel in die Mitte der Wasseroberfläche. Man beobachtet, dass die Büroklammern sofort bis zum Boden des Glases untergehen.

### Physikalischer Hintergrund

Die Oberflächenspannung des Wassers ist vergleichbar mit einer Haut, die sich zusammen hält. Durch die zur Oberfläche tangential wirkenden Kräfte entsteht eine Kraft, die der Schwerkraft minimal entgegen wirkt. [vgl. 5, S 100] Durch diese geringen Kräfte werden die Büroklammern trotz der höheren Dichte aufgrund ihrer flachen Form an der Wasseroberfläche gehalten. An Stelle der Büroklammern kann man auch Cent – Stücke, Rasierklingen oder Reismägen verwenden. Sobald man einen Tropfen Spülmittel auf die Wasseroberfläche gibt,

werden auf Grund der lösenden Wirkung die tangential wirkenden Kräfte gehemmt. Deshalb sinkt auch die Oberflächenspannung des Wassers und die Büroklammern fallen zu Boden.

### 4.1.3 Der Effekt der Oberflächenspannung

#### Material

- Flache Schale
- Wasser
- Staub
- Spülmittel



**Abbildung 49:** Ein Seifentropfen verringert die Oberflächenspannung von Wasser

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt eine flache Schale mit Wasser und verstreut Staub ganz fein über die gesamte Wasseroberfläche. Man kann auch Kreidenstaub, Sägemehl oder Pfeffer verwenden. Dann lässt man mit einer Pipette oder mit einem Finger, den man zuvor in Spülmittel eintaucht, einen Tropfen Seifenlösung in die Mitte der Wasseroberfläche fallen. Der Staub wird sich blitzartig an den Rand der Schale zurückziehen.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Seife reduziert wie in Versuch 4.1.2. die Oberflächenspannung des Wassers. Weil sich die Oberfläche des Wassers minimal halten will, zieht sie sich an den Rand der Schale zurück. Währenddessen breitet sich vom Zentrum der Schale aus das Spülmittel-Wasser-Gemisch mit einer geringeren Oberflächenspannung aus.

#### 4.1.4 Die vereinten Tropfen

##### Material

- Nicht – benetzende Flüssigkeit
- Blatt Papier



**Abbildung 50: Ein aus zwei kleineren entstandener Quecksilbertropfen**

##### Aufbau und Durchführung

Man träufelt mit einer Pipette zwei Tropfen Quecksilber auf ein weißes Blatt Papier. Versuche mit Quecksilber müssen ausnahmslos in einer dichten Metallwanne durchgeführt werden, um ein Ausbreiten der Dämpfe im Raum zu verhindern. Durch leichtes Rütteln am Papier bringt man die zwei Tropfen zusammen, die sich schließlich zu einem großen Tropfen vereinen.

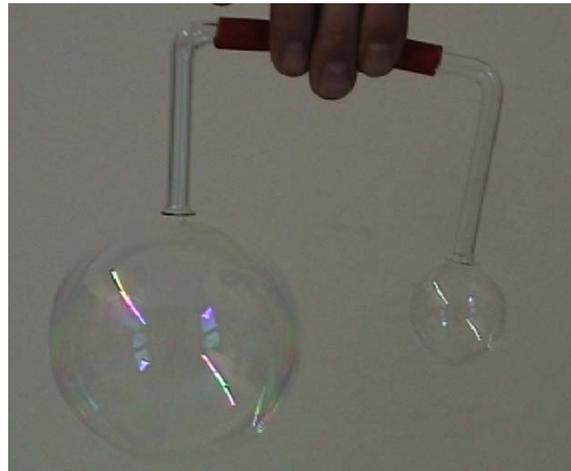
##### Physikalischer Hintergrund

Die Tropfen besitzen eine sehr hohe Oberflächenspannung. Bringt man die beiden Tropfen nun aufeinander, so werden ihre Oberflächenspannungen durch den Zusammenstoß kurzzeitig gestört. Jedoch laufen sie sofort zu einem großen Quecksilbertropfen zusammen, weil sie die Oberfläche minimal halten wollen. Sie gehen lieber eine Verbindung miteinander ein als eine Bindung mit dem Papier, weil, wie wir später hören werden, die resultierende Kraft an der Grenzfläche Festkörper - Flüssigkeit bei den nicht benetzenden Flüssigkeiten ins Innere der Flüssigkeit gerichtet ist.

### 4.1.5 Die große und die kleine Seifenblase

#### Material

- Pustefix
- Zwei Schlauchstücke



**Abbildung 51: Die kleine Seifenblase bläst die größere auf**

#### Aufbau und Durchführung

Man taucht jeweils ein Ende der Schlauchstücke in die Seifenlösung und bläst daraufhin durch die anderen beiden Enden zugleich in die Schläuche hinein, sodass sich zwei Seifenblasen bilden. Nun steckt man die hinteren Enden der Schlauchstücke ineinander und hält den verbundenen Schlauch mit den zwei Seifenblasen an den Enden ruhig vor sich hin. Man wird beobachten, dass die kleinere Seifenblase die größere aufbläst, bis die kleine völlig verschwindet. Ein Dreiwegehahn würde den Versuchsaufbau natürlich um einiges erleichtern.

#### Physikalischer Hintergrund

In der kleineren Seifenblase herrscht offensichtlich ein höherer Druck, weshalb die Luft über den Schlauch zur großen Seifenblase strömt. Bei Betrachtung eines minimalen Oberflächenstücks  $\delta A$  der Seifenblase ergibt sich

$$\delta A = \delta x \cdot \delta y \quad 36$$

An den beiden Seitenflächen  $\delta y$  greift jeweils eine Tangentialkraft  $\delta F$  an.

$$\delta F = 2 \cdot \sigma \cdot \delta y \quad 37$$

Bei gegebenem Radius  $r$  einer Seifenblase haben diese beiden Kräfte folgenden Winkel zueinander

$$\delta \varphi = \frac{\delta x}{r} \quad 38$$

Es ergibt sich betragsmäßig folgende Normalkraft

$$\delta^2 F = \delta F \cdot \delta \varphi = 2 \cdot \sigma \cdot \delta y \cdot \frac{\delta x}{r} \quad 39$$

An den Seitenflächen  $\delta x$  greift dieselbe Normalkraft an. Durch das Aufblasen herrscht aber ein Überdruck in der Seifenblase, sonst würde ja jede Seifenblase sofort in sich zusammen fallen bzw. von den resultierenden Kräften nach Innen zerstört werden. [vgl. 5, S 102]

$$\Delta p = \frac{2 \cdot \delta^2 F}{\delta A} = \frac{4 \cdot \sigma}{r} \quad 40$$

Damit herrscht in einer Seifenblase mit Radius  $r$  ein größerer Druck  $\Delta p$  als in einer Seifenblase mit Radius  $R$ , wobei  $r < R$  gilt, weshalb die kleine Seifenblase die große aufbläst.

#### 4.1.6 Die Münze zwischen zwei Gläsern

##### Material

- Zwei Gurkengläser
- Wanne
- Blatt Papier
- Münze
- Wasser



Abbildung 52: Eine Münze zwischen zwei Gläsern

##### Aufbau und Durchführung

Man füllt beide Gläser mit Wasser und stellt sie in eine flache Wanne, um kleinere Überschwemmungen zu vermeiden. Eines der beiden muss randvoll das zweite zumindest halb voll sein. Anschließend stellt man das halbvolle Glas mit der Öffnung nach unten auf das volle, siehe Torricelli - Experiment 3.2.10. Dieses ‚geschlossene‘ Gefäß öffnen wir einen Spalt, indem wir das obere Gefäß so weit zur Seite kippen, dass wir z.B. eine 2 € - Münze in den Spalt bringen. Das Wasser oberhalb des Spalts wird dabei nicht austreten.

##### Physikalischer Hintergrund

Die Oberflächenspannung des Wassers entlang des Spaltes ist so groß, dass sie dem Druck, der durch die Flüssigkeit im oberen Gefäß erzeugt wird, standhalten kann. Jedoch ist hier zu beachten, dass dieser Druck nur minimal ist, denn wir haben bereits in Experiment 3.2.10.

erfahren, dass allein der atmosphärische Luftdruck eine zehn Meter hohe Wassersäule hochhalten könnte.

#### 4.1.7 Die verbundenen Wasserstrahlen

##### Material

- Plastikflasche
- Bohrer
- Tinte
- Wasser
- Wanne



**Abbildung 53: Drei Wasserstrahlen werden zu einem verbunden**

##### Aufbau und Durchführung

Man bohrt ein paar Zentimeter oberhalb des Flaschenbodens drei kleine Löcher horizontal nebeneinander. Die Löcher sollten mindestens einen Abstand von einem Millimeter haben, da sie ansonsten immer einen gemeinsamen Strahl bilden. Jetzt füllt man stark eingefärbtes Wasser in die Flasche, während dessen man die Löcher mit einem Finger verschlossen hält. Nun hält man die Flasche über die Wanne und entfernt den Finger von den Öffnungen, sodass drei gleich starke Wasserstrahlen neben einander aus der Flasche spritzen. Fährt man mit einem Finger schnell über die drei Löcher, so verbinden sich die Strahlen zu einem gemeinsamen Wasserstrahl.

##### Physikalischer Hintergrund

Die Erklärung ist jener von Experiment 4.1.4. sehr ähnlich. An der Außenfläche der Wasserstrahlen herrscht eine Spannung, die auch während dem Fließen bemüht ist, die Oberfläche so klein wie möglich zu halten. Da sich die einzelnen Moleküle gegenseitig anziehen, erhält man für die Moleküle am Rand eine resultierende Kraft nach Innen. Durch das Wischen des Fingers werden die drei Strahlen gestört aber auch zusammengeführt. Da die

Flüssigkeit stets ihre Oberfläche minimal hält, fließt nur mehr ein einziger Wasserstrahl weiter.

#### 4.1.8 Die anhängliche Wasseroberfläche

##### Material

- Kleine Schale
- Starkes Blatt Papier
- Schnur
- Wasser

##### Aufbau und Durchführung

Zuerst schneidet man sich aus einem starken Blatt Papier ein Stück aus, das überall ca. einen Zentimeter über den Schalenrand hinaus reicht. Nun bohrt man durch die Mitte ein kleines Loch und steckt einen halben Meter langen Faden hindurch, auf dessen eine Seite man einen Knopf macht. Man kann auch noch zwei kleine Nadeln im rechten Winkel zueinander durch den Knopf stecken, damit er nicht mehr durch das Loch hindurch rutschen kann. Man füllt die Schale randvoll mit Wasser und legt das Stück Papier mit dem Knopf und den Nadeln nach unten auf die Wasseroberfläche. Dabei muss man darauf achten, dass das Papier auf den gesamten Rand der Schale aufliegt. Schließlich kann man ganz vorsichtig versuchen, die gefüllte Schale mit der überstehenden Schnur anzuheben.

Es ist vom Vorteil, den Faden an der oberen Seite des Papiers anzukleben, da durch das Loch, den Knoten und den Nadeln die Oberflächenspannung des Wassers geschwächt wird.

##### Physikalischer Hintergrund

Durch die Tangentialkräfte, die in der Wasseroberfläche wirken, wird auch das Papier an die Oberfläche herangezogen, da es ein wenig mit Wasser benetzt wird. Da das Papier von der Wasseroberfläche ganz leicht angezogen wird, kann man die Schale mit samt dem Wasser vorsichtig hochheben. Dies funktioniert aber nur für sehr kleine und leichte Schalen, mit Glasgefäßen sollte man es besser nicht versuchen. Es ist auch vom Vorteil die Schale nicht



**Abbildung 54: Die anhängliche Wasseroberfläche**

ganz voll zu machen, damit der Flüssigkeitsstand zum Zentrum hin noch ein wenig abfällt. Dann ist auch das Papier nach unten gewölbt und dessen Spannung hilft ein wenig mit, die Anordnung im Zentrum hoch zu heben.

## 4.2 Grenzflächenspannung

Die Oberflächenspannung ist eine spezielle Form der Grenzflächenspannung. Bei Grenzflächen zwischen zwei Flüssigkeiten oder Grenzflächen zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern treten stets drei Grenzflächenspannungen zugleich auf. Jene zwischen Flüssigkeit und Festkörper, jene zwischen Flüssigkeit und Gas und die Grenzfläche zwischen Festkörper und Gas.

### 4.2.1 Benetzende Flüssigkeiten

#### Material

- Blatt Papier
- Tinte
- Pipette oder kleine Spachtel

#### Aufbau und Durchführung

Mit Hilfe einer Pipette oder einer kleinen Spachtel gibt man einige Tropfen Tinten auf ein Blatt Papier. Wenn man die Tropfen genau betrachtet zerlaufen sie auf dem Blatt. Der Winkel zwischen der Oberfläche des Tropfens und des Blattes ist spitz, man spricht von einem Benetzen der Grenzfläche zwischen dem Tropfen und dem Blatt Papier.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Tinte besitzt eine sehr niedrige Oberflächenspannung, vergleichbar mit einem Wasser-Spülmittel-Gemisch. Wenn nun ein Festkörper, wie in unserem Fall das Blatt Papier, die

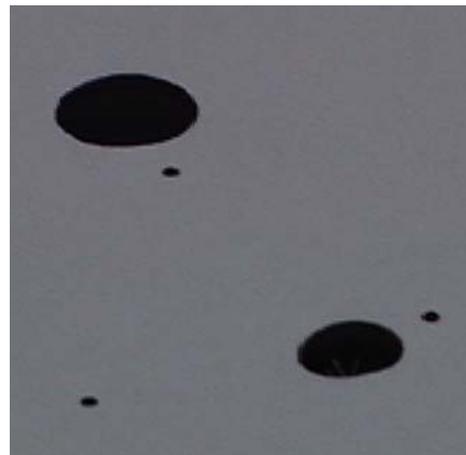


Abbildung 55: Tintentropfen auf Papier - benetzende Flüssigkeit

Moleküle einer Flüssigkeit stärker anzieht als die Flüssigkeitsmoleküle untereinander, so spricht man von einer Benetzung. Die Grenzfläche Flüssigkeit und Luft möchte gar nicht bestehen, deshalb wird der Tropfen auseinander gezogen. Man kann auch einen Öltropfen auf Wasser geben, und stellt sich die drei Grenzflächen als entsprechend angreifende Kräfte vor. Dann zieht die tangential zur Grenzschicht Luft-Wasser angreifende Kraft den Öltropfen auseinander, weil sie größer ist als die Resultierende der beiden anderen Kräfte. Bei benetzenden Flüssigkeiten ist der Winkel zwischen Oberfläche der Flüssigkeit und der Grenzfläche Flüssigkeit – Festkörper spitz. Man kann es auch vergleichen mit einem mit Tinte gefülltem Glas, wo die Flüssigkeit zum Rand des Glases hin immer höher steigt. Hier tritt ebenfalls ein spitzer Winkel zwischen der Flüssigkeitsoberfläche und der Grenzfläche Glas-Tinte auf. Ein oberes Flüssigkeitsmolekül am Rand des Glases verspürt sowohl Adhäsionskräfte in Richtung Wand und zur Luft hin, als auch Kohäsionskräfte ins Innere der Flüssigkeit. Sobald die Adhäsionskräfte größer sind als die Kohäsionskräfte zeigt die resultierende Kraft zur Wand hin. Wie wir aus Experiment 3.2.5. wissen richtet sich die Flüssigkeitsoberfläche immer senkrecht zur resultierenden Kraft aus, weshalb der Winkel für die benetzenden Flüssigkeiten auch zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  liegen muss.

#### 4.2.2 Nicht - benetzende Flüssigkeiten

##### Material

- Blatt Papier
- Quecksilber

##### Aufbau und Durchführung



**Abbildung 56: Quecksilbertropfen auf Papier - nicht benetzende Flüssigkeit**

Man träufelt mit einer Pipette ein paar Tropfen Quecksilber auf ein Blatt Papier. In der Schule kann man es auch mit Hilfe von Wassertropfen auf einer Wachsoberfläche zeigen. Dann beobachtet man die Quecksilbertropfen genauer und wird erkennen, dass es beinahe lauter kleine Kugeln sind.

### Physikalischer Hintergrund

Im Gegensatz zu den benetzenden Flüssigkeiten gehen die Flüssigkeitsmoleküle lieber eine Bindung mit sich selbst als mit dem Blatt Papier bzw. der Luft ein. Die Flüssigkeit hat also eine hohe Oberflächenspannung gegenüber dem Blatt Papier und die Grenzfläche Festkörper-Luft besteht eher als die Grenzfläche Festkörper-Flüssigkeit. Deshalb erhalten wir auch ein gegenteiliges Resultat als zuvor, denn der Winkel zwischen der Flüssigkeitsoberfläche und der Grenzfläche Festkörper-Quecksilber wird stumpf. Man kann es wiederum mit einem gefüllten Gefäß vergleichen. Für ein Flüssigkeitsmolekül am Rand des Glases ist nun die Resultierende der beiden Adhäsionskräfte kleiner als die Kohäsionskraft, die ja in die Flüssigkeit hinein zeigt. Deshalb erhalten wir eine resultierende Kraft, die ebenfalls ins Innere der Flüssigkeit zeigt und in weiterer Folge einen Winkel zwischen Oberfläche der Flüssigkeit und Grenzfläche Quecksilber-Glas der bestimmt größer als  $90^\circ$  sein muss.

## 4.3 Kapillarität

Unter der so genannten Kapillarität versteht man ein Ansteigen des Flüssigkeitstands in einem dünnen Röhrchen oder Kapillaren. Beeinflusst wird dieser Prozess durch die Oberflächenspannung, die mehr oder weniger gute Benetzung der Innenfläche des Rohres, den Durchmesser des Kapillaren und durch die drei Grenzflächenspannungen.

### 4.3.1 Kapillar – Röhrchen

#### Material

- Zwei unterschiedlich dicke Kapillaren
- Tinte
- Kleines Gefäß
- Ein Blatt Papier

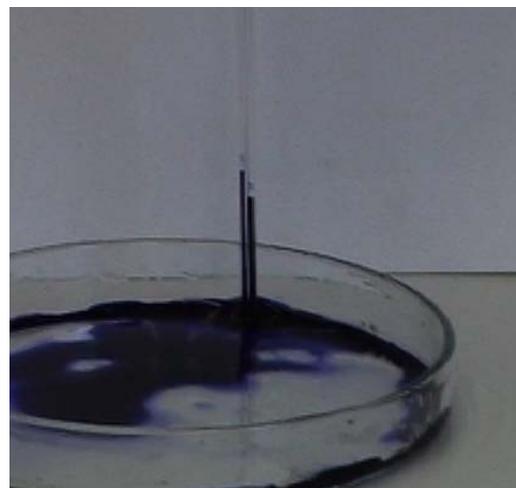


Abbildung 57: Zwei Kapillaren mit unterschiedlichem Durchmesser

Aufbau und Durchführung

Man stellt in einem kleinen Gefäß eine Tinte-Wasser-Lösung her und stellt zwei Kapillaren mit unterschiedlichem Durchmesser hinein. Man wird beobachten, dass die Flüssigkeit in den Röhrchen höher und höher steigt, bis der Flüssigkeitsstand konstant bleibt. Um es besser zu veranschaulichen hält man die beiden Kapillaren nun vor ein weißes Blatt Papier, um abzulesen wie hoch die Flüssigkeit gestiegen ist. Es ist schön zu sehen, dass der Flüssigkeitsstand in dem dünneren Kapillaren höher ist als im dickeren.

Physikalischer Hintergrund

Die Tinte benetzt die Innenwand des Röhrchens beinahe vollständig, was bedeutet, dass der Winkel zwischen Flüssigkeitsoberfläche und Röhrchen sehr klein ist. Um die Flüssigkeit hochzuheben ist eine Arbeit nötig, die eine Kraft  $F_R$  tangential zur Oberfläche, siehe Formel 32 verrichtet. Jedoch besteht die Grenzschicht Wasser-Luft (Flüssigkeit-Gas) nur ungern, weshalb sie sich so klein wie möglich halten möchte und somit den Flüssigkeitsstand in die Höhe zieht. Dem wirkt aber die Gewichtskraft der Flüssigkeitssäule  $F_G$  entgegen. Zum Gleichgewicht kommt es, sobald sich die beiden Kräfte aufheben.

$$F_R = \sigma \cdot l_R = m \cdot g = F_G \quad 41$$

$$\sigma \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = r^2 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot g \quad 42$$

Somit kommen wir zu einer Steighöhe  $h$

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot \rho \cdot g} \quad 43$$

Da der Radius des Röhrchens im Nenner vorkommt, ist es verständlich, dass die Steighöhe für dünnere Kapillaren auch größer ist.

### 4.3.2 Die Wasser undurchlässige Strumpfhose

#### Material

- Großes Gurkenglas
- Strumpfhose
- Gummiring
- Wasser
- Wanne



**Abbildung 58: Demonstration der Wasserundurchlässigkeit einer Strumpfhose**

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt ein großes Gurkenglas gut zur Hälfte mit Wasser. Dann stülpt man einen Teil einer Strumpfhose über die Öffnung und befestigt ihn zusätzlich mit einem Gummiring unterhalb des Schraubverschlusses. Jetzt dreht man die Flasche über einer Wanne oder einem Waschbecken um und wird beobachten, dass kein Wasser ausfließt. Es kann passieren, dass während dem Umdrehen ein kleiner Teil der Wassermenge ausfließt.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Oberflächenspannung des Wassers, die durch die Strumpfhose verstärkt wird, und der atmosphärische Luftdruck halten das Wasser im Glas. Die Strumpfhose hat viele kleine Maschen, durch die normalerweise Luft ins Innere des Gefäßes kommen müsste, jedoch werden die unzähligen kleinen Löcher durch die Wasseroberfläche verstopft. Wegen der Oberflächenspannung wölbt sich die Flüssigkeit über die Löcher der Strumpfhose.

Deshalb ist es auch möglich das Glas durch die Strumpfhose hindurch zu füllen, weil die Luft im Gefäß noch durch die umliegenden Maschen entweichen kann.

## 5 Hydrodynamik und Aerodynamik

Strömende Medien werden mit Hilfe von Stromlinien beschrieben. Die Tangenten an den einzelnen Punkten dieser Linien beschreiben die momentane Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeits- oder Gasteilchen. Je höher die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen, desto enger aneinander werden die Strömungslinien gezeichnet, und es ergibt sich eine so genannte Stromliniendichte. In weiterer Folge erhält man einen Volumsfluss. Er wird beschrieben durch das Volumen  $V$ , das durch eine Fläche, die senkrecht zur Geschwindigkeit  $v$  steht, in einer bestimmten Zeit  $t$  fließt. Den Volumsfluss kann man also gleich der Flüssigkeitssäule setzen, die in einer bestimmten Zeit durch eine Öffnung  $A$  fließt. [vgl. 3, S 172f]

$$\Phi_v = \frac{V}{t} = A \cdot v \quad \text{Volumsfluss} \quad 44$$

Für eine beliebige Fläche und eine sich ändernde Geschwindigkeit kommt man zu folgender allgemeinen Formel

$$\Phi_v = \int_A \vec{v} \cdot \delta\vec{A} \quad 45$$

Aufgrund der Inkompressibilität von Flüssigkeiten und der Erhaltung der Masse in abgeschlossenen Systemen muss der Gesamtfluss durch eine Öffnung  $A$  gleich Null sein. Also die Summe der einströmenden und ausströmenden Teilchen ist gleich Null.

Betrachtet man nun eine Flüssigkeit, die durch ein sich verengendes Rohr, das frei von Quellen und Senken sein muss, fließt, so ergeben sich für unterschiedliche Querschnittsflächen  $A$  auch unterschiedliche Geschwindigkeiten  $v$ . Allgemein gilt:

$$A_1 > A_2 \Rightarrow v_1 < v_2 \quad 46$$

Für den Volumsfluss, der durch beide Querschnitte gleich groß sein muss, erhalten wir

$$\Phi_v = \oint \vec{v} \cdot \delta\vec{A} = v_1 \cdot A_1 - v_2 \cdot A_2 = 0 \quad \text{oder} \quad 47$$

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad \text{„Kontinuitätsgleichung“} \quad 48$$

### 5.1 Ideale Flüssigkeiten und Gase: Bernoulli-Gleichung

Ideale Flüssigkeiten und Gase müssen reibungsfrei und inkompressibel sein. Wasser erfüllt diese Forderungen nur teilweise, was für uns aber ausreichend ist. Die Bernoulli-Gleichung ist in diesem Kapitel von sehr großer Bedeutung, weshalb ich eine Herleitung der Formel

erwähnen möchte. Aufgrund der Gültigkeit des mechanischen Energiesatzes und des zuvor gezeigten Flüssigkeitsstromes erfährt ein Flüssigkeitsteilchen mit Masse  $m$  im engeren Rohr eine Zunahme der kinetischen Energie, wegen der höheren Geschwindigkeit  $v$ .

$$\frac{m \cdot v_1^2}{2} < \frac{m \cdot v_2^2}{2} \quad 49$$

Die potentielle Energie muss somit um genau diesen Betrag abnehmen. Aus der Wärmelehre ergibt sich für eine Flüssigkeit mit Volumen  $V$ , die unter einem Druck  $p$  steht, folgende potentielle Energie

$$E_{\text{pot}} = p \cdot V \quad 50$$

Die letzten beiden Formeln liefern uns folgenden Energiesatz

$$p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2 = \frac{m \cdot v_2^2}{2} - \frac{m \cdot v_1^2}{2} \quad 51$$

Für ein schief stehendes Rohr muss man auch noch die Höhe  $h$ , vom Massenpunkt zum tiefsten Punkt des Rohrs, beachten

$$p \cdot V + \frac{m \cdot v^2}{2} + m \cdot g \cdot h = \text{const} \quad 52$$

Wenn man noch durch das Volumen  $V$  dividiert, kommt man zur Bernoulli-Gleichung

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h = \text{const} \quad 53$$

Der Gesamtdruck setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Teil zusammen und muss konstant bleiben, wobei  $\rho$  die Dichte des Mediums beschreibt.

$$p + \rho \cdot g \cdot h \quad \text{statischer Druck} \quad 54$$

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad \text{dynamischer Druck} \quad 55$$

Allgemein muss immer gelten:

$$p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}} = \text{const} \quad 56$$

Wegen der Bernoulli-Gleichung kommt es in sich verengenden Röhren immer zu einer Abnahme des statischen und einer Zunahme des dynamischen Drucks in einer Flüssigkeit. Man kommt also zu dem Schluss, dass einerseits der statische Druck geringer, andererseits der dynamische Druck in strömenden Flüssigkeiten oder Gasen größer ist, als in ruhenden, wo der dynamische Druck immer Null ist. Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und der Bernoulli-Gleichung sollen alle Experimente in diesem Kapitel erklärt werden.

### 5.1.1 Der einfache Zerstäuber

#### Material

- Zwei Strohhalm mit unterschiedlichen Durchmessern
- Glas
- Wasser
- Farbiger Hintergrund



**Abbildung 59: Modell eines Zerstäubers mit Hilfe von zwei Strohhalmen**

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt ein Glas mit Wasser und hält den Trinkhalm mit dem kleineren Durchmesser senkrecht hinein, wobei er über die Flüssigkeitsoberfläche herausragen muss. Jetzt nimmt man eine Öffnung des zweiten Halms in den Mund und hält ihn horizontal ausgerichtet mit der zweiten Öffnung zur herausragenden Öffnung des ersten Halms hin, sodass die beiden Halme senkrecht zueinander stehen. Die Öffnung des zweiten Halms sollte größer sein, damit man den Luftstrom besser um das obere Ende des stehenden Trinkhalms konzentrieren kann. Jetzt bläst man kräftig in den Strohhalm mit dem größeren Durchmesser hinein, wobei man darauf achten muss, dass die Öffnung oberhalb jener des kleineren Halms liegt. Je stärker man hinein bläst, desto höher steigt die Flüssigkeit im dünneren Trinkhalm, bis sie schließlich über die Öffnung hinaus fließt und durch den Luftstrom aus dem dickeren Strohhalm zerstäubt wird. Man sollte einen farbigen Bogen Papier hinter das Gefäß stellen, damit man das Zerstäuben und den Wasserstand im Strohhalm besser sehen kann. Natürlich kann man stattdessen auch eine eingefärbte Flüssigkeit verwenden.

#### Physikalischer Hintergrund

Der Luftstrom wird über die Öffnung des aus dem Trinkglas herausragenden Strohhalmes abgelenkt. Aufgrund der Bernoulli-Gleichung herrscht im Luftstrom und dadurch auch im stehenden Halm ein geringerer statischer Druck als in der Luft, die den Versuchsaufbau

umgibt. Dieser höhere Druck drückt auf den Flüssigkeitsstand im Glas, und somit das Wasser im stehenden Trinkhalm nach oben. Je stärker man hinein bläst, desto größer wird die Differenz der statischen Drücke im Trinkhalm und außerhalb, weshalb es bei entsprechender Stärke des Luftstroms bis zum Überfließen der Flüssigkeit kommt und diese dann zerstäubt wird.

Anwendungen: Bunsenbrenner, Zerstäuber, Saugspritzpistolen

### 5.1.2 Der Papiertrichter im Trichter

#### Material

- Trichter
- Ein Blatt Papier



**Abbildung 60: Ein Papiertrichter im Trichter**

#### Aufbau und Durchführung

Man legt das Blatt Papier so zusammen, dass man einen Trichter erhält, der ungefähr gleich groß ist wie der Küchentrichter. Dann hält man den Papiertrichter in den herkömmlichen hinein und beginnt in die kleine Öffnung hinein zu blasen. Der Papiertrichter wird nicht aus dem Küchentrichter hinaus geblasen, sondern zur Wand des Küchentrichters hin gedrückt. Während dem Hineinblasen kann man die Öffnungen sogar senkrecht nach unten halten, und der Papiertrichter wird trotzdem nicht zu Boden fallen.

#### Physikalischer Hintergrund

Der Luftstrom, der über die kleine Öffnung in den Trichter gelangt, wird durch den Papiertrichter abgelenkt. Die Luft bewegt sich zwischen Innenwand des Küchentrichters und Papiertrichter entlang. Wegen der Bernoulli-Gleichung ist aber der statische Druck im Luftstrom geringer als der statische Druck der ruhenden Luft, weshalb der Papiertrichter in den herkömmlichen Trichter hinein gedrückt wird. Je stärker man hineinbläst, umso größer

wird der dynamische Druck im Luftstrom, der ja in der umgebenden Luft gleich Null ist. Deshalb wird auch die Differenz der statischen Drücke größer, da der Gesamtdruck laut Gleichung 56 konstant bleiben muss.

### 5.1.3 Der Tischtennisball im Trichter

#### Material

- Trichter
- Tischtennisball



**Abbildung 61: Der Tischtennisball im Trichter**

#### Aufbau und Durchführung

Man hält einen Tischtennisball in einen Trichter und bläst kräftig in die kleine Öffnung des Trichters hinein. Der Tischtennisball wird nicht aus dem Trichter hinaus geblasen sondern zur kleinen Trichteröffnung hin gedrückt.

#### Physikalischer Hintergrund

Die Erklärung ist gleich jener von Experiment 5.1.2. Der Luftstrom wird durch den Tischtennisball, den man ja zu Beginn festhalten muss, der Trichterwand entlang abgelenkt. Da der Raum zwischen Trichterwand und Tischtennisball nur sehr eng ist, muss der dynamische Druck in diesem Bereich sehr groß sein, was aber einen geringen statischen Druck bedeutet. Der außen herrschende statische Luftdruck ist somit um einiges größer als der statische Druck im Luftstrom, weshalb der Tischtennisball in den Trichter hineindrückt wird.

### 5.1.4 Das aerodynamische Paradoxon

#### Material

- Zwei Blätter Papier



**Abbildung 62: Luftstrom zwischen zwei Blättern Papier**

#### Aufbau und Durchführung

Man hält die zwei Blätter mit je einer Hand ca. drei bis fünf Zentimeter nebeneinander vor sein Gesicht hin. Jetzt bläst man kräftig zwischen die beiden Blätter hinein. Sie werden nicht auseinander gedrückt, sondern stoßen zusammen.

#### Physikalischer Hintergrund

Der Luftstrom, der zwischen den beiden Blättern fließt, weist einen großen dynamischen und in weiterer Folge einen deutlich geringeren statischen Druck als die umgebende Luft auf. Der äußere statische Luftdruck presst die beiden Blätter somit aneinander und nicht, wie man vorher vermuten könnte, auseinander.

### 5.1.5 Die Münze und das Papierstück

#### Material

- 2 € Münze
- Ein Blatt Papier



**Abbildung 63: Die Münze und das Papierstück**

### Aufbau und Durchführung

Man schneidet sich aus dem Blatt Papier eine Kreisscheibe mit exakt dem gleichen Durchmesser wie die 2 € Münze aus. Jetzt legt man die Papierscheibe auf den Tisch hin und hält die Münze in einem Abstand von einem Zentimeter darüber. Beginnt man nun kräftig von oben auf die Münze zu blasen, so zieht es das zurechtgeschnittene Papierstück sofort an die Unterseite der Münze. Wenn man kräftig genug drauf bläst, kann man den anfänglichen Abstand zwischen Münze und Papierscheibe sogar noch um einiges vergrößern.

### Physikalischer Hintergrund

Durch das Blasen auf die Münze entsteht um diese herum und somit auch zwischen Münze und Papierstück bzw. Tisch ein Luftstrom, in dem der herrschende statische Druck auf Grund des größeren dynamischen Drucks, um einiges geringer als der umgebende atmosphärische Druck ist. Da der übliche Luftdruck aber auch von unten auf die Papierscheibe wirkt, wird das Papierstück zur Unterseite der Münze hin gedrückt. Sobald man aufhört zu blasen, fällt das Papierstück wieder auf den Tisch zurück.

## 5.1.6 Die klappernden Löffel

### Material

- Zwei Suppenlöffel
- Fließendes Wasser

### Aufbau und Durchführung

Man fasst mit jeweils einer Hand einen Löffel ganz vorsichtig mit zwei Fingern am oberen Ende des Griffs indem die



**Abbildung 64: Die klappernden Löffel**

Außenwölbungen zueinander zeigen. Jetzt hält man die Wölbungen ca. einen Zentimeter voneinander entfernt unter einen fließenden Wasserhahn. Es ist ein leises, rasches Klappern der Löffel zu hören.

### Physikalischer Hintergrund

Die Erklärung ist jener von Experiment 5.1.5. sehr ähnlich. Der statische Druck im Wasserstrahl ist kleiner als der herrschende statische atmosphärische Druck, weshalb die beiden Löffel aneinander gepresst werden. Durch den fließenden Wasserstrahl werden sie jedoch auch immer wieder auseinander gedrückt, weshalb es zum Klappern und zu einer Pendelbewegung der Löffel kommt. Sobald das Wasser zwischen den Wölbungen der beiden Löffel entlang fließt, kann man die oberen Enden sogar noch etwas weiter voneinander entfernen, ohne dass die Wölbungen auseinander schwingen. Weil das Wasser stets das Verlangen hat, die Oberfläche möglichst gering zu halten, wird das Zusammenpressen der beiden Löffel noch ein wenig verstärkt.

## 5.1.7 Der Streichholzlift

### Material

- Streichholzschachtel
- 10 Streichhölzer

### Aufbau und Durchführung

Man nimmt die Streichholzschachtel auseinander und nimmt den äußeren Teil in eine Hand. Einige Streichhölzer legt man ganz dicht parallel neben einander auf den Tisch hin. Jetzt hält man den äußeren Teil der Streichholzschachtel ganz dicht oberhalb der Streichhölzer. Atmet man nun kräftig durch die Streichholzschachtel ein, indem man den nach oben ragenden Teil mit den Lippen gut verschließt, so werden die Streichhölzer an den unteren Rand des Kartons gepresst. Wenn man kräftig und lange genug einatmet, kann man die Streichhölzer in den zweiten Teil der Streichholzschachtel befördern.



**Abbildung 65: Der Streichholzlift**

### Physikalischer Hintergrund

Durch das kräftige Einatmen herrschen in der Streichholzsachtel ein hoher dynamischer und ein kleiner statischer Druck. Der statische Druck der Umgebungsluft ist aber wegen der Bernoulli-Gleichung größer als jener in der Sachtel, weshalb die Streichhölzer an die Unterkante des Kartons gepresst werden. Beim Bewegen der Streichholzsachtel samt den Streichhölzern ändert sich, solange man noch kräftig genug einatmet, die Differenz der statischen Drücke nicht. Auf diese Weise kann man die Streichhölzer solange befördern, als die Differenz des statischen Drucks zwischen dem Luftstrom der Atemluft und dem umgebenden Luftdruck aufrecht erhalten werden kann.

## 5.2 **Strömungsformen**

Man unterscheidet zwei Arten von Strömungsformen, die laminare und die turbulente Strömung. Dabei ist zu beachten, dass die Laminar- bzw. Potentialströmung frei von jeglichen Wirbeln und Rotationen ist. Während einer Strömung um einen Körper wirken auf diesen keine Kräfte, weil die Geschwindigkeit der Strömung vor und nach dem Körper gleich groß ist. Man erhält ein symmetrisches Strömungsbild mit gleichem Druck vor und nach dem Körper. Die Geschwindigkeit muss während dem Umfließen größer sein, weil die Strecke länger als die gedachte geradlinige ist. Die Flüssigkeitsteilchen müssen daher eine größere kinetische und, auf Grund des Erhaltungssatzes, eine geringere potentielle Energie aufweisen. Bei laminaren Strömungen sind die Stromlinien Geraden, die parallel zueinander liegen, bei turbulenten hingegen reißen die Stromlinien ab und börteln auf. An allen Seitenflächen eines Körpers, der sich in einer strömenden Flüssigkeiten oder Gas befindet, wirken stets Reibungskräfte. [vgl. 3, S 178f]

## 5.2.1 Die Kerze hinter der Flasche

### Material

- Kerze
- Feuerzeug oder Streichhölzer
- Flasche



**Abbildung 66: Die Kerzenflamme im Luftstrom hinter einem Hindernis**

### Aufbau und Durchführung

Man stellt eine brennende Kerze auf einen Tisch und ca. fünf Zentimeter davor eine Flasche. Nun bläst man aus kurzer Entfernung auf Höhe der Kerzenflamme gegen die Flasche. Dabei muss man darauf achten, dass die Flasche und die dahinter stehende Kerze genau auf der Bahn des Luftstroms der Atemluft liegen. Die Kerzenflamme wird erlöschen, obwohl die Flasche genau vor ihr im Luftstrom steht.

### Physikalischer Hintergrund

Die Atemluft erzeugt eine annähernd laminare Strömungsform. Wenn der Luftstrom nun auf die Flasche trifft, so fließen die einzelnen Luftteilchen mit einer höheren Geschwindigkeit als vor der Flasche um diese herum. In Stromlinien gezeichnet kann man sich das so vorstellen, dass sich die einzelnen Strömungslinien um die Flasche herum krümmen, wobei sie aufgrund der höheren Geschwindigkeit um die Flasche näher aneinander liegen. Somit ist der Luftstrom nach der Flasche im Idealfall wieder gleich geradlinig als zuvor, und bringt daher die Kerzenflamme zum Erlöschen. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten kann es nach der Flasche auch zu einer teilweise turbulenten Strömung kommen, welche die Kerzenflamme aber ebenfalls auslöschen kann.

## 5.2.2 Die Kerzenflamme und der Trichter

### Material

- Trichter
- Kerze
- Feuerzeug bzw. Streichhölzer



**Abbildung 67: Die Kerzenflamme zieht es in den Trichter**

### Aufbau und Durchführung

Man stellt eine brennende Kerze auf den Tisch hin und bläst aus ca. 10 Zentimeter Entfernung durch die Ausflussöffnung eines Trichters hindurch gegen die Kerzenflamme. Wenn man vorsichtig genug bläst, wird die Kerzenflamme nicht erlöschen sondern zum Trichter hin gezogen.

### Physikalischer Hintergrund

Da die Abflussöffnung des Trichters um einiges schmaler ist als die Trichteröffnung hat der Luftstrom in dem schmalen Rohr aufgrund der Kontinuitätsgleichung eine höhere Geschwindigkeit. Eine höhere Geschwindigkeit hat aber einen geringeren statischen Druck zur Folge, weshalb zwischen Kerzenflamme und Trichter ein kleinerer statischer Druck gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck entsteht. Dadurch wird die Kerzenflamme zum Trichter hin gedrückt. Bläst man fester in den Trichter hinein so entsteht an dessen Ende eine starke turbulente Strömung und die Kerzenflamme erlischt.

### 5.2.3 Den Ball schweben lassen

#### Material

- Föhn
- Styropor-Ball oder Tischtennisball oder Luftballon



**Abbildung 68: Ein Porocellball im Luftstrom eines Föhns**

#### Aufbau und Durchführung

Man schaltet einen Föhn ein und richtet ihn so aus, dass der Luftstrom senkrecht nach oben zeigt. Jetzt legt man einen Styropor-Ball ca. 10 Zentimeter oberhalb des Föhns in den Luftstrom hinein. Der Ball wird zu schweben beginnen, wobei der Abstand zum Föhn nur von der Stärke des Luftstroms abhängt. Man kann den Föhn nun bis zu  $45^\circ$  zur Seite neigen, und der Ball wird trotzdem in der Strömung weiter schweben und nicht zu Boden fallen. Während des Schwebens wird sich der Ball auch zu drehen beginnen.

#### Physikalischer Hintergrund

Damit ein Körper in einer Flüssigkeit oder einem Gas schwebt, müssen die Gewichtskraft und die Auftriebskraft, die auf den Körper wirken, gleich groß sein. Die Auftriebskraft wird aber nicht wie z.B. bei Versuch 3.2.18. bei den Heliumseifenblasen durch die geringere Dichte erzeugt, sondern durch den Impulsübertrag der einzelnen Luftteilchen, die mit einer gewissen Geschwindigkeit auf den Ball treffen. Auf Grund der Bernoulli-Gleichung wird der Ball im Luftstrom gehalten, weil der statische Druck in der Strömung geringer ist als der statische Druck der umgebenden Luft. Solange die aus dem Föhn strömende Luft den Ball gleichmäßig umströmt, bleibt dieser auch in Ruhe. Da es aber zu Unregelmäßigkeiten im Luftstrom kommt, wird der Ball an einer Seite kräftiger umströmt als auf der anderen und beginnt zu rotieren. Da der Ball je nach Oberfläche einen bestimmten Reibungskoeffizient hat, greifen die Luftteilchen an der Oberfläche des Balls an und ziehen diese mit sich. Durch die größere Reibungskraft an einer Seite des Balls, entsteht dort ein leichter Unterdruck, der eine Querkraft hervorruft. Diese Kraft bezeichnet man auch als Magnus-Effekt, der nur bei

rotierenden Körpern in Strömungen auftritt. Dieser Vorgang drückt den Ball leicht zur Strömung hin und versetzt ihn in weiterer Folge in leichte Pendelbewegungen.

Wenn man den Föhn immer schräger stellt, wird der Ball solange in der Strömung bleiben, bis die Gewichtskraft Überhand gewinnt, und der Ball auf der Bahn einer Wurfparabel zu Boden fällt.

#### 5.2.4 Im Windschatten einer Münze

##### Material

- 2 € Münze
- Ein Blatt Papier

##### Aufbau und Durchführung

Man schneidet sich wie in Experiment 5.1.5. eine Papierscheibe aus, deren Durchmesser exakt dem der Münze entspricht. Nun hält man die Münze und das Papierstück vor sich hin und lässt sie getrennt voneinander fallen. Die Münze wird um einiges schneller am Boden ankommen als die Papierscheibe. Legt man nun die Papierscheibe auf die Münze und lässt beides zusammen in dieser Anordnung fallen, so wird das Papierstück an der Oberfläche der Münze bleiben und gleich schnell zu Boden fallen, solange sich die Münze nicht verdreht.

##### Physikalischer Hintergrund

Da die Oberfläche des Papierstücks und die der Münze gleich groß sind, erfahren sie auch denselben Luftwiderstand und somit die gleiche Reibungskraft. Jedoch ist das Gewicht der Münze um einiges höher, weshalb sie auch schneller zu Boden fällt. Legt man nun das Papierstück auf die Münze, so erfährt dieses auch keinen Luftwiderstand mehr, da die Luft bereits von der Münze verdrängt wird. Die Papierscheibe befindet sich im Windschatten der Münze. Deshalb fallen die beiden auch zusammen zu Boden.



**Abbildung 69: Papierstück im Windschatten einer Münze**

## 5.2.5 Das fallende Blatt

### Material

- Ein Blatt Papier



**Abbildung 70: Ein fallendes Blatt Papier**

### Aufbau und Durchführung

Man lässt ein Blatt Papier aus Kopfhöhe zu Boden fallen. Dabei wird man beobachten, dass es nicht geradlinig, sondern nur sehr langsam mit horizontalen Pendelbewegungen zu Boden gleitet.

### Physikalischer Hintergrund

An den Enden des Blatts entsteht auf Grund der höheren Strömungsgeschwindigkeit der vorbei streichenden Luft ein geringerer statischer Druck. Deshalb greift an zwei gegenüberliegenden Seiten ein Kräftepaar an, das normal zum Luftstrom gerichtet ist. Da die Luft relativ zum Blatt vertikal vorbei strömt, wirken diese Kräfte in horizontaler Richtung und versuchen ständig das Blatt waagrecht auszurichten. Da das Papier aber wegen seines Gewichts zu Boden fallen muss, und sich die Kräfte an den Rändern mit der Lage des Blattes in der Luft ständig ändern, kommt es zu horizontalen Pendelbewegungen.

Ohne Störungen und Umwälzungen in der umgebenden Luft und bei einem perfekt ebenen vertikal ausgerichteten Blatt wäre es möglich, einen geradlinigen senkrechten Fall zu erreichen.



**Abbildung 71: Ein fallendes Blatt richtet sich horizontal aus**

## 5.2.6 Der fallende Zylinder

### Material

- Kartonzylinder
- Lange Schnur
- Klebstoff



**Abbildung 72: Demonstration des Magnus-Effekts mit Hilfe eines fallenden Zylinders**

### Aufbau und Durchführung

Man befestigt beide Enden einer ca. vier Meter langen Schnur mit Hilfe von Klebstoff an den Enden des Kartonzylinders. Nun rollt man die ganze Schnur gleichmäßig auf den Zylinder auf, bis nur mehr eine kleine Schlaufe zum festhalten über ist. Man sollte die Schnur doppelt am Zylinder befestigen, weil damit ein Kippen des Zylinders vermieden wird. Nun lässt man den Zylinder von so hoch wie möglich fallen, währenddessen man die Schlaufe festhält. Der somit abrollende Zylinder wird sich während dem Fall vom senkrechten Lot des Startpunktes immer weiter entfernen.

### Physikalischer Hintergrund

Aufgrund der Rotation des Zylinders kommt es zu unterschiedlichen Reibungskräften an den beiden Seiten des Zylinders. An jener Seite, wo sich die Schnur vom Zylinder entfernt, dreht sich dieser entgegen der Schwerkraft, auf der gegenüberliegenden Seite dreht er sich hingegen in Fallrichtung. Dadurch kommt es auch zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  der an den beiden Seiten des Zylinders vorbeiströmenden Luft.

$$v_1 = v + \omega \cdot r \quad 57$$

$$v_2 = v - \omega \cdot r \quad 58$$

Hier beschreibt  $v$  die Fallgeschwindigkeit,  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit und  $r$  den Radius des Zylinders. Diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten verursachen in weiterer Folge unterschiedliche dynamische bzw. statische Drücke. Diese Druckdifferenz erzwingt eine resultierende Kraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung angreift und den rotierenden Zylinder aus der gedachten vertikalen Bahn zieht. Dieses Phänomen bezeichnet man als Magnus-Effekt, der bereits in Versuch 5.2.3. vorgestellt worden ist.

Anwendung: Flettner Rotor in der Schifffahrt, „geschnittene“ Tennisbälle

## 5.2.7 Das Tragflächenmodell

### Material

- Schnur (ca. 20 cm)
- Ein Blatt Papier
- Klebstoff

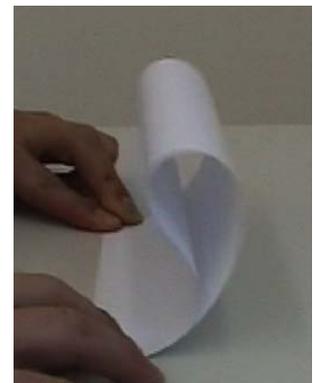


**Abbildung 73: Modell einer Tragfläche**

### Aufbau und Durchführung

Man schneidet sich aus einem Blatt Papier ein Rechteck meiner Länge von ca.15 und einer Breite von fünf Zentimetern zurecht. Dann faltet man dieses Stück einmal einen Zentimeter neben der Mitte und rollt einen Teil z.B. auf einen Bleistift auf, um es zu krümmen. Nun klebt man die beiden Enden aneinander und befestigt einen Zentimeter oberhalb des Bugs ein Ende der Schnur. Während man die Schnur hält, bläst man gegen die Front des Tragflächenmodells. Es hebt bereits bei einer leichten Luftströmung vom Tisch ab.

Man kann den Versuch sogar noch vereinfachen, indem man ein Blatt Papier einmal zusammenfaltet ohne es zu knicken und die beiden Breitseiten dann mit beiden Händen gespannt auf den Tisch hält. Bläst man nun über das Papier so hebt sich der Rest des Blattes vom Tisch ab.



**Abbildung 74: Eine einfache Tragfläche**

### Physikalischer Hintergrund

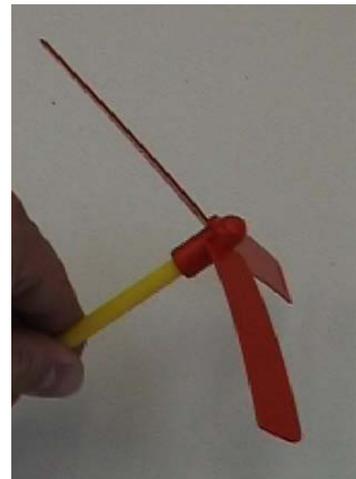
Durch den erzeugten Luftstrom ergeben sich an der Oberseite und der Unterseite des Tragflächenmodells unterschiedliche statische Drücke. Da der obere Teil um einen Zentimeter länger ist, muss die Luft hier auch schneller darüber hinweg strömen. Dies hat einen geringeren statischen Druck als auf der Unterseite zur Folge, wodurch das Papier in die Höhe gedrückt wird. Für das vereinfachte Modell gilt dasselbe, da der atmosphärische Luftdruck an der Unterseite auch größer ist als der statische Druck in der Luftströmung oberhalb des Blatts.

Anwendungen: Tragflächen von Flugzeugen

## 5.2.8 Der Hubschrauber

### Material

- Modell-Rotor



**Abbildung 75: Modell eines Hubschrauber-Rotors**

### Aufbau und Durchführung

Man treibt den Rotor mit beiden Händen kräftig an, indem man den nach unten ragenden Stift zwischen die Handflächen legt und diese schnell aneinander vorbei reibt. Der Modell-Rotor muss sich von oben betrachtet gegen den Uhrzeigersinn drehen. Er wird sofort abheben und für ein paar Sekunden durch den Raum fliegen.

### Physikalischer Hintergrund

Im Gegensatz zu einer Tragfläche werden bei einem Hubschrauber-Rotor Luftmassen bewegt. Durch die drehenden Rotorblätter, die ca.  $30^\circ$  gegen die horizontale Ebene geneigt sind,

erfahren die Luftteilchen einen Impuls schräg nach unten und auf Grund der Impulserhaltung die Rotorblätter einen Impuls schräg nach oben. Genauer gesagt wirkt die resultierende Kraft senkrecht auf die Fläche der Rotorblätter. Da bei einem Hubschrauber aber stets mehrere Rotorblätter im Spiel sind, heben sich die seitlichen Komponenten auf und der Rotor erfährt nur einen Impuls parallel zur Drehachse. Eine Vorwärtsbewegung ist ausschließlich durch ein Kippen des ganzen Rotors aus der horizontalen Ebene möglich. Ist die Winkelgeschwindigkeit des Rotors groß genug, so kann die immer größer werdende Schubkraft sogar die Gewichtskraft von einigen Tonnen schweren Hubschraubern überschreiten.

Der zweite Rotor am Heck eines Hubschraubers dient dazu, den Gesamtdrehimpuls auszugleichen, ansonsten würde sich der ganze Hubschrauber gegen den Drehsinn des Rotors zu drehen beginnen.

Anwendungen: Spielzeugdrachen, Hubschrauber, Turbomolekularpumpen

### 5.3 *Reale Flüssigkeiten und Gase*

In einer Flüssigkeit oder einem Gas wirken zwischen den modellhaft vorzustellenden einzelnen Schichten stets Kohäsionskräfte, die bei einer Bewegung der Flüssigkeit, z.B. Umrühren, Reibungskräfte verursachen. Ein Maß für diese Reibungskräfte gibt die so genannte Zähigkeit oder Viskosität  $\eta$  von Flüssigkeiten und Gasen an.

#### 5.3.1 Die Zähigkeit

##### Material

- Honig
- Kleine Spatel oder Löffel



**Abbildung 76: Demonstration der Zähigkeit eines Öls**

Aufbau und Durchführung

Einen kleinen Spatel oder einen Löffel taucht man in einem Honigglas ein und zieht in daraufhin wieder langsam aus der Flüssigkeit heraus. Es wird sich stets eine verbindende Honigschicht zwischen Löffel und dem Honig im Glas bilden, die erst nach einiger Entfernung von der Honigoberfläche abreißt. In weiterer Folge tropft der auf dem Löffel verbliebene Honig auch nur sehr langsam vom Löffel herunter.

Physikalischer Hintergrund

Hauptverantwortlich für das langsame Tropfen des Honigs ist die eingangs erwähnte Zähigkeit. Die Zähigkeit einer Flüssigkeit kann mit Hilfe von modellhaft kleinsten Flüssigkeitsschichten, die sich gegeneinander bewegen, beschrieben werden. Versucht man zum Beispiel eine kleine Glasplatte an der Honigoberfläche entlang zu bewegen, so müssen sich die einzelnen Flüssigkeitsschichten, deren Dicken um ein Vielfaches kleiner als jene der Glasplatte sind, unterhalb mitbewegen. Je weiter die Schichten von der Platte mit Grundfläche  $A$  entfernt sind, desto geringer wird die Strecke, um die sie mitwandern müssen. Für die Kraft  $F$  die nötig ist, um die Platte mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  zu bewegen, ergibt sich

$$F \approx A \cdot \frac{v}{d} \quad 59$$

$$\tau_s = \frac{F}{A} \approx \frac{v}{d} \quad \text{Schubspannung} \quad 60$$

Dabei beschreibt  $d$  die Tiefe der Flüssigkeit von der Oberfläche bis zur untersten sich mitbewegenden Schicht. Für zwei nebeneinander liegende Schichten gilt dann bei infinitesimaler Betrachtung

$$\tau_s = \eta \cdot \frac{\delta v}{\delta d} \quad 61$$

Dabei wird der Proportionalitätsfaktor  $\eta$  durch die zu Beginn des Kapitels erwähnte Viskosität bzw. Zähigkeit beschrieben. Für Wasser bei Raumtemperatur beträgt diese Stoffkonstante 0,01 Poise [P] oder Pascal pro Sekunde [Pa/s]. Die Zähigkeit von Flüssigkeiten nimmt bei zunehmender Temperatur auf Grund der immer kleiner werdenden Dichte ab. Für Gase hingegen nimmt sie mit zunehmender Temperatur zu, da die einzelnen Teilchen einen höheren Energiezustand erreichen und mehr Impulsübertragungen stattfinden.

[vgl. 3, S 181]

### 5.3.2 Der Brunnen mit zwei Gläsern

#### Material

- Zwei Gurkengläser
- Einige Bierdeckel
- Strohhalm
- Bohrer
- Wasser



**Abbildung 77: Der Brunnen mit zwei Gläsern**

#### Aufbau und Durchführung

Man klebt zwei oder drei Bierdeckel zusammen und bohrt durch diese ein Loch, durch welches man den Trinkhalm steckt. Den Rest des Loches dichtet man mit Hilfe von Klebstoff wieder ab. Der Strohhalm muss so angebracht sein, dass er beim stehenden Glas bis zum Boden und beim umgedrehten Glas über den Wasserspiegel hinaus reicht. Man füllt beide Gläser ca. zur Hälfte mit Wasser und legt die Bierdeckel auf eines der Gläser, sodass der Strohhalm nach dem Umdrehen über den Wasserspiegel des umgedrehten Glases hinaus ragt. Jetzt stülpt man das Glas mitsamt den Bierdeckeln auf das zweite Glas. Das Wasser diffundiert nach und nach in die Bierdeckel, und die Flüssigkeit des unteren Glases beginnt ganz langsam über den Strohhalm in das obere zu fließen. Dabei muss man darauf achten, dass der oberste Bierdeckel den Glasrand überall abdichtet, da sonst Luftblasen von außen in das obere Gefäß gelangen, und das erzeugte System somit nicht in sich geschlossen ist.

#### Physikalischer Hintergrund

Da sich die Bierdeckel immer mehr mit Wasser tränken, sinkt der Wasserstand im oberen Gefäß. Weil aber keine Luft in das Glas gelangen kann, entsteht ein Unterdruck, der groß genug wird, um über den Strohhalm Wasser aus dem unteren Gurkenglas anzusaugen. Dieser Unterdruck muss also größer sein als die Gewichtskraft des Wassers, das sich im Strohhalm befindet, gemessen vom Wasserstand der unteren Flüssigkeit bis zum oberen Ende des Halms. Gelingt es nicht den oberen Glasrand überall abzudichten, so steigen kleine Luftblasen

zwischen Bierdeckel und Glasrand ins obere Gefäß und der Unterdruck wird vermindert, wie auf der DVD zu Beginn des Experiments zu sehen ist. Im unteren Glas kommt es zu keinem Unterdruck, da zwischen dem Bierdeckel und dem Glasrand ständig Luft nachströmen kann.

### 5.3.3 Der Brunnen mit drei Gläsern

#### Material

- Drei Gurkengläser
- Verschluss
- Zwei Strohhalme
- Bohrer
- Klebstoff
- Wasser



**Abbildung 78: Der Brunnen mit drei Gläsern**

#### Aufbau und Durchführung

In den Deckel des Gurkenglases bohrt man so weit wie möglich auseinander zwei gleich große Löcher, durch die man die beiden Strohhalme steckt. Dabei muss Strohalm Nummer eins, nachdem man den Deckel auf ein Gurkenglas schraubt, nur einige Zentimeter und Nummer zwei bis über die Hälfte in das Gefäß reichen. Den Rest der beiden Löcher dichtet man am besten auf beiden Seiten des Deckels mit Klebstoff oder Knetmasse luftdicht ab. Nun füllt man dieses Glas ca. zur Hälfte mit Wasser und verschraubt den Deckel ordentlich. Ein zweites Gefäß macht man voll und stellt es ungefähr eine Strohhalmlänge erhöht auf eine Schachtel und das dritte als Auffangbehälter daneben auf den Tisch. Jetzt dreht man das verschlossene Glas so um, dass der zweite Strohalm so weit wie möglich in das vollständig gefüllte Gefäß eintaucht. Dabei muss man darauf achten, dass das Wasser nach dem Umdrehen aus dem ersten Strohalm in den Auffangbehälter fließt. Es strömt solange Wasser wie bei einem Springbrunnen vom Glas auf der Schachtel in das umgedrehte hinauf, bis das untere Ende des zweiten Trinkhalms nicht mehr in den Flüssigkeitsstand des Gefäßes ragt.

### Physikalischer Hintergrund

Während des Umdrehens fließt bereits Wasser aus dem ersten Strohhalm, da durch den zweiten Luft nach fließen kann. Sobald der zweite aber in den Wasserstand des weiteren Gefäßes ragt, kann keine Luft mehr in das verschlossene Gefäß gelangen, und es würde ein Unterdruck entstehen. Deshalb wird Wasser aus dem erhöhten Gefäß angesaugt, bis Strohhalm Nummer zwei nicht mehr in den Wasserstand hineinreicht und erneut Luft nachströmen kann. Aus Strohhalm eins fließt so lange Flüssigkeit aus, bis der Wasserspiegel im verschlossenen Glas unter das obere Ende des Halms sinkt.

### 5.3.4 Das Flaschenausleeren

#### Material

- Zwei gleiche Plastikflaschen
- Wasser
- Waschbecken oder Wanne
- Weitere Person



**Abbildung 79: Entleeren von zwei Wasserflaschen**

#### Aufbau und Durchführung

Man füllt zwei stabile exakt gleiche Plastikflaschen zur Gänze mit Wasser, am besten verwendet man zwei 1,5 Liter Pfandflaschen. Eine Person versetzt die Flasche kräftig in Rotation um die senkrechte Achse, sodass sich das Wasser stark zu drehen beginnt. Jetzt stellen beide Personen zu gleich die Flaschen auf den Kopf. Während beim einen das Wasser nur ganz unregelmäßig ausfließt, strömt es aus der Flasche, in der die Flüssigkeit rotiert, in einem Zug beinahe doppelt so schnell aus.

### Physikalischer Hintergrund

Beim einfachen Ausleeren der Flasche behindern sich das ausfließende Wasser und die einströmende Luft gegenseitig, sodass stets nur einzelne Luftblasen in die Flasche aufsteigen und unregelmäßig Wassermengen ausfließen können. Durch das Andrehen der Flasche vor oder auch nach dem Umdrehen beginnt die Flüssigkeit wegen ihrer Adhäsion zu rotieren und hat auf Grund der Zentrifugalkraft das Bestreben soweit wie möglich an den Rand der Flasche zu gelangen. Deshalb bildet sich kurz nach dem Umdrehen von der Öffnung weg nach oben hin ein Luftkanal, durch den diese ständig nach strömen kann. Währenddessen kann natürlich stets Wasser zwischen Luftkanal und Flaschenöffnung spiralförmig ausfließen. Somit hemmen sich die beiden Vorgänge gegenseitig weniger als beim konventionellen Ausleeren und können parallel schneller ablaufen.

### 5.3.5 Der Flaschentornado

#### Material

- Zwei gleiche Plastikflaschen
- Doppelverschluss
- Wasser

#### Aufbau und Durchführung

Man verwendet wie bei Experiment 5.3.5. zwei stabile gleich große Plastikflaschen und füllt eine der beiden zu drei Viertel mit Wasser.

Jetzt schraubt man den Doppelverschluss, ein Hohlzylinder mit einem durchgehenden Gewinde, auf die Flasche und verschließt

dieses Duo mit der umgedrehten zweiten Flasche, sodass wir ein in sich geschlossenes System bekommen. Nun stellt man die somit erhaltene Kombi-Flasche auf den Kopf und versetzt das obere Ende mit einer Hand in leichte Drehbewegungen um die vertikale Achse. Nachdem zu Beginn einige einzelne Luftblasen aus der unteren Flasche in die obere steigen, bildet sich aus



**Abbildung 80: Der Flaschentornado**

der Wassermenge des höheren Gefäßes bald ein so genannter Flaschentornado. Es entsteht ein Luftkanal im Zentrum, der nach oben hin immer größer wird, bis er die Außenfläche der Flasche erreicht.

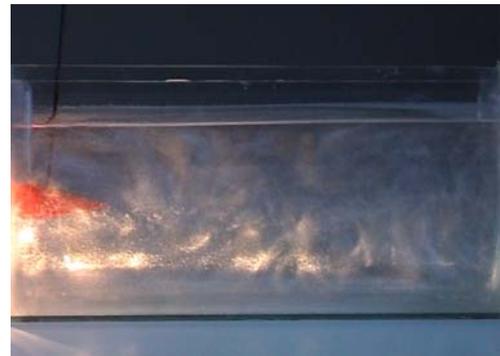
### Physikalischer Hintergrund

Die Erklärung ist dem vorherigen Versuch sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass die beiden Flaschen mit dem Doppelverschluss ein abgeschlossenes System bilden. Wegen der Rotationsbewegung drängt das Wasser zum Außenrand der Flasche hin. Da es aber auch in die untere Flasche strömt, müssen Luftblasen immer schneller hintereinander hochsteigen, bis sie einen Luftkanal bilden und ein Flaschentornado entsteht.

## 5.3.6 Die Karman'sche Wirbelstraße

### Material

- Glasbehälter
- Kleiner Quader
- Kleiner Modellfisch
- Draht
- Klebstoff
- Wasser
- Aluminiumpulver



**Abbildung 81: Ein stromlinienförmiger Körper bewegt sich im Wasser**

### Aufbau und Durchführung

Man füllt einen Glasbehälter mit Wasser und gibt Aluminiumpulver dazu, um Vorgänge innerhalb des Gefäßes besser betrachten zu können. Jetzt klebt man auf den Quader und den Modellfisch (es kann auch ein anderer stromlinienförmiger Körper sein) ein



**Abbildung 82: Ein Würfel bewegt sich im Wasser**

ca. zehn Zentimeter langes Stück Draht auf. Taucht man nun den Quader ins Wasser ein und bewegt ihn hin und her, so wird man feststellen, dass sich hinter ihm kräftige Wirbel bilden, die sich im Wasser bis ganz nach unten und oben ausbreiten. Bei einem Modellfisch hingegen, den man mit der gleichen Geschwindigkeit im Wasser bewegt, sind die Wirbel minimal und breiten sich nicht einmal über den doppelten Korpusdurchmesser hinaus aus.

### Physikalischer Hintergrund

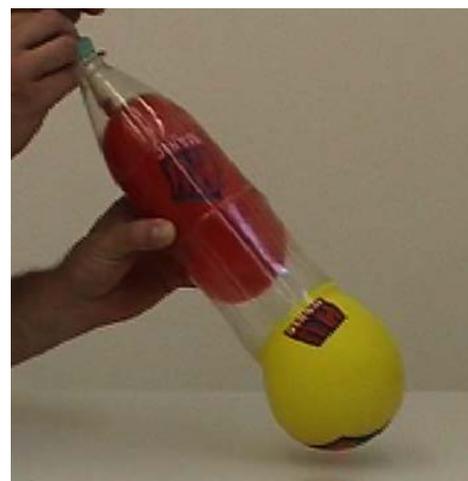
Hinter jedem bewegten Körper bilden sich Wirbel in einer Flüssigkeit. Bei stromlinienförmigen Körpern, die sich relativ zu einem Medium bewegen, sind diese aber sehr klein und treten paarweise mit gegenläufigem Drehsinn auf, sodass die zurückbleibende Strömung annähernd laminar bleibt. Bei Körpern mit sehr scharfen Kanten hingegen, wie zum Beispiel einem Quader oder Würfel, werden die einzelnen Flüssigkeitslamellen auseinander gerissen und stellen sich auf. Dadurch kommt es zu sehr starken Turbulenzen hinter dem Körper, die sich durch die Flüssigkeit weiter ausbreiten.

Bewegt man denselben Körper mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in einer Flüssigkeit, so entstehen auch unterschiedliche Strömungsbilder bzw. Turbulenzen. [vgl. 3, S 186f]

## 5.3.7 Die Funktion der Lunge

### Material

- Plastikflasche mit Verschluss
- Zwei Luftballons
- Strohhalm
- Bohrer
- Messer oder Säge
- Klebeband



**Abbildung 83: Demonstration der Funktion einer Lunge**

### Aufbau und Durchführung

Man schneidet oder sägt den Boden einer stabilen Flasche ab und spannt stattdessen eine Luftballonhaut darüber, die man mit Klebeband außen am Flaschenrand befestigt. Durch den Verschluss bohrt man ein Loch, steckt einen Strohhalm durch und dichtet es gut ab. Am unteren Ende des Halms befestigt man mit Hilfe des Klebebands einen weiteren Luftballon, sodass man diesen über den Strohhalm aufblasen kann. Jetzt schraubt man den Verschluss mit samt Strohhalm auf die Flasche, so dass der Luftballon im Inneren ist. Bläst man nun über den Halm Luft hinein, so dehnt sich der Luftballon in der Flasche als auch die Gummimembran am Boden der Flasche zugleich aus. Ebenso ziehen sich wieder beide gleichzeitig zusammen, nachdem man den Trinkhalm wieder frei lässt. Drückt man nun mit einigen Finger die Membran in die Flasche hinein, so wird auch der Ballon weiter komprimiert. Zieht man sie hingegen aus dem Gefäß heraus, so dehnt sich auch der Luftballon im Inneren der Flasche ein wenig aus.

### Physikalischer Hintergrund

Durch das Hineinblasen in den Luftballon, die modellhafte Lunge, erzeugt man in der Flasche einen höheren Druck als außerhalb. Deshalb wölbt sich auch die Gummimembran nach außen, die hier das Zwerchfell symbolisieren soll. Drückt man hingegen die Gummimembran hinein, so erhöht sich wiederum der Luftdruck in der Flasche, im Luftballon wirkt jetzt jedoch nur der atmosphärische Druck, weshalb es diesen zusammen drückt. Dehnt man die Haut nach außen, so entsteht im Plastikbehälter ein Unterdruck, der den Luftballon auseinander zieht. Im Wesentlichen soll dieses Experiment ein Modell für die menschliche Atmung sein, wobei das Dehnen der Membran nach Innen oder Außen mit dem Ausdehnen und Einziehen des Zwerchfells bzw. des Brustkorbs oder Bauchs verglichen werden kann, das ja auch ein leichtes Ein- bzw. Ausatmen zur Folge haben kann.

## 6 Anhang

### 6.1 *Literaturverzeichnis*

- [1] KORN B.: Der Freihandversuch in der Sekundarstufe 1, Hausarbeit am Institut für Didaktik der Physik der Universität Siegen, 1981
- [2] <http://www.oepu-noe.at/recht/lp/index.htm>
- [3] JÄGER H.: Skriptum zur Vorlesung Experimentalphysik 1, Institut für Experimentalphysik, Graz 2005
- [4] HILSCHER H.: Physikalische Freihandexperimente, Band 1, Mechanik, Aulis Verlag Deubner, Köln 2004
- [5] MESCHEDE D.: Gerthsen Physik, 21. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2001
- [6] Cagran C.: private Unterlagen zur Vorlesung „Physik für Bauingenieure“

## 6.2 *Abbildungsverzeichnis*

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Elastizität einer Feder.....   | 6  |
| Abbildung 2: Elastizität eines Schlauches .....   | 6  |
| Abbildung 3: Schubmodul anhand eines Radiergummis .....                                 | 8  |
| Abbildung 4: Torsionsmodul anhand eines Radiergummis .....                              | 9  |
| Abbildung 5: Demonstration der Poisson'schen Zahl anhand eines Schlauches.....          | 10 |
| Abbildung 6: Druckverteilung bei einem Bleistift.....                                   | 12 |
| Abbildung 7: Die Fakir-Tomate.....  | 13 |
| Abbildung 8: Der Fakir-Apfel.....   | 13 |
| Abbildung 9: Die allseitige Gleichheit des Drucks.....                                  | 14 |
| Abbildung 10: Hydraulische Presse mit zwei unterschiedlichen Spritzen.....              | 15 |
| Abbildung 11: Rotationsparaboloid einer Flüssigkeitsoberfläche .....                    | 17 |
| Abbildung 12: Rotationsparaboloid bei erhöhter Drehzahl .....                           | 17 |
| Abbildung 13: Die Schlauchwaage.....  | 18 |
| Abbildung 14: Der Schlauchheber .....   | 19 |
| Abbildung 15: Ein offenes Manometer in Form eines Schlauches.....                       | 20 |
| Abbildung 16: Ein einfaches Manometer mit Hilfe von Pressluft.....                      | 21 |
| Abbildung 17: Das Torricelli-Experiment .....   | 22 |
| Abbildung 18: Demonstration des Luft-drucks mit ineinander passenden Gefäßen .....      | 24 |
| Abbildung 19: Demonstration der Trägheit von Luft .....                                 | 25 |
| Abbildung 20: Magdeburger Halbkugeln .....  | 26 |
| Abbildung 21: Der hydrostatische Druck in einer gefüllten Flasche .....                 | 27 |
| Abbildung 22: Ein Messgerät für den hydrostatischen Druck .....                         | 28 |
| Abbildung 23: Schichtung von verschiedenen Flüssigkeiten .....                          | 30 |
| Abbildung 24: Anzünden des Teebeutels.....  | 31 |
| Abbildung 25: Das Aschegerüst des Teebeutels beim Abheben.....                          | 31 |
| Abbildung 26: Graphik und Tabelle zur Demonstration des Druckverlaufs im Kamin [6]..... | 33 |
| Abbildung 27: Mit Helium bzw. Luft gefüllte Seifenblasen.....                           | 34 |
| Abbildung 28: Der Luftballon schwebt auf Kohlendioxid.....                              | 35 |
| Abbildung 29: Die Libelle einer Wasserwaage.....  | 36 |
| Abbildung 30: Umschütten von Luft unter Wasser .....                                    | 37 |
| Abbildung 31: Ein nicht schwimmendes Stück Holz.....                                    | 39 |
| Abbildung 32: Tischtennisball im Sog eines Trichters .....                              | 40 |
| Abbildung 33: Rosinen in einem Glas Mineralwasser.....                                  | 41 |
| Abbildung 34: Auftrieb eines Gewichts bei einer Balkenwaage .....                       | 42 |
| Abbildung 35: Volumenverdrängung unterschiedlich geformter Gegenstände.....             | 43 |
| Abbildung 36: Ein Modell des Cartesianischen Tauchers .....                             | 44 |
| Abbildung 37: Das Original des Cartesianischen Tauchers.....                            | 45 |
| Abbildung 38: Das Aräometer im Wasser .....   | 46 |
| Abbildung 39: Das Aräometer in einer Salzwasserlösung.....                              | 46 |
| Abbildung 40: Ein Ei schwimmt in einer Salzwasserlösung .....                           | 47 |
| Abbildung 41: Luftblasen bei unterschiedlichen Flüssigkeitsständen .....                | 48 |
| Abbildung 42: Luftblasen bei gleicher Füllhöhe aber unterschiedlicher Dichte .....      | 49 |
| Abbildung 43: Auftrieb von Cola bzw. Cola-Light .....                                   | 49 |
| Abbildung 44: Seifenhaut zwischen Metallbügel und Faden.....                            | 51 |
| Abbildung 45: Minimalflächen bei einem Würfel 1 .....                                   | 53 |
| Abbildung 46: Minimalflächen bei einem Würfel 2 .....                                   | 53 |
| Abbildung 47: Minimalflächen bei einem Prisma .....                                     | 54 |
| Abbildung 48: Büroklammern schwimmen auf Wasser .....                                   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 49: Ein Seifentropfen verringert die Oberflächenspannung von Wasser.....      | 56 |
| Abbildung 50: Ein aus zwei kleineren entstandener Quecksilbertropfen .....              | 57 |
| Abbildung 51: Die kleine Seifenblase bläst die größere auf.....                         | 58 |
| Abbildung 52: Eine Münze zwischen zwei Gläsern .....                                    | 59 |
| Abbildung 53: Drei Wasserstrahlen werden zu einem verbunden.....                        | 60 |
| Abbildung 54: Die anhängliche Wasseroberfläche.....                                     | 61 |
| Abbildung 55: Tintentropfen auf Papier - benetzende Flüssigkeit .....                   | 62 |
| Abbildung 56: Quecksilbertropfen auf Papier - nicht benetzende Flüssigkeit.....         | 63 |
| Abbildung 57: Zwei Kapillaren mit unterschiedlichem Durchmesser.....                    | 64 |
| Abbildung 58: Demonstration der Wasserundurchlässigkeit einer Strumpfhose .....         | 66 |
| Abbildung 59: Modell eines Zerstäubers mit Hilfe von zwei Strohhalmen.....              | 69 |
| Abbildung 60: Ein Papiertrichter im Trichter .....                                      | 70 |
| Abbildung 61: Der Tischtennisball im Trichter .....                                     | 71 |
| Abbildung 62: Luftstrom zwischen zwei Blättern Papier .....                             | 72 |
| Abbildung 63: Die Münze und das Papierstück.....  | 72 |
| Abbildung 64: Die klappernden Löffel .....  | 73 |
| Abbildung 65: Der Streichholzlift.....  | 74 |
| Abbildung 66: Die Kerzenflamme im Luftstrom hinter einem Hindernis.....                 | 76 |
| Abbildung 67: Die Kerzenflamme zieht es in den Trichter .....                           | 77 |
| Abbildung 68: Ein Porocellball im Luftstrom eines Föhns.....                            | 78 |
| Abbildung 69: Papierstück im Windschatten einer Münze.....                              | 79 |
| Abbildung 70: Ein fallendes Blatt Papier.....   | 80 |
| Abbildung 71: Ein fallendes Blatt richtet sich horizontal aus.....                      | 80 |
| Abbildung 72: Demonstration des Magnus-Effekts mit Hilfe eines fallenden Zylinders..... | 81 |
| Abbildung 73: Modell einer Tragfläche.....  | 82 |
| Abbildung 74: Eine einfache Tragfläche .....  | 82 |
| Abbildung 75: Modell eines Hubschrauber-Rotors .....                                    | 83 |
| Abbildung 76: Demonstration der Zähigkeit eines Öls.....                                | 84 |
| Abbildung 77: Der Brunnen mit zwei Gläsern.....   | 86 |
| Abbildung 78: Der Brunnen mit drei Gläsern.....   | 87 |
| Abbildung 79: Entleeren von zwei Wasserflaschen.....                                    | 88 |
| Abbildung 80: Der Flaschentornado .....   | 89 |
| Abbildung 81: Ein stromlinienförmiger Körper bewegt sich im Wasser.....                 | 90 |
| Abbildung 82: Ein Würfel bewegt sich im Wasser.....                                     | 90 |
| Abbildung 83: Demonstration der Funktion einer Lunge .....                              | 91 |