

Physikalische Experimente mit Flaschen

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Bernhard STEINWENDER

Begutachter:

Ao. Univ. – Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher

Technische Universität Graz

Institut für Experimentalphysik

Graz, Mai 2012

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit mit dem Titel „Physikalische Experimente mit Flaschen“ gibt einen Einblick darüber, wie handelsübliche Flaschen aus Plastik oder Glas in physikalischen Versuchen zur Anwendung kommen können.

Die Arbeit ist in einen fachdidaktischen und einen experimentellen Teil gegliedert. Im fachdidaktischen Abschnitt werden das Experiment im Physikunterricht und das Freihandexperiment besprochen. Der zweite, ausführlichere Teil der Arbeit ist eine Sammlung von 66 physikalischen Versuchen. In diesem experimentellen Teil werden die Vorbereitungen, die Durchführungen und die physikalischen Erklärungen aller Experimente beschrieben und erklärt. Um es den Leserinnen oder Lesern auch zu ermöglichen schnell für ihre Zwecke passende Experimente zu finden, sind die Versuche Teilgebieten der Physik zugeordnet. Des Weiteren beinhaltet die Diplomarbeit eine DVD mit Videoaufnahmen aller Versuche.

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin im Bildungsbereich tätige Menschen zu erreichen, diese zum Durchführen von Experimenten mit einfachen Mitteln anzuregen und so für Physik zu begeistern.

Abstract

The present diploma thesis carrying the title „physical experiments with bottles“ is aimed at giving an insight into how bottles that are customary in trade and made of plastic or glass can be used in physical experiments.

The thesis is structured into a subject-related didactical part as well as an experimental section. In the didactical part the experiment during physics lessons and the so called “free-hand-experiment” are discussed. The second part which has been elaborated in more detail consists of a collection of 66 physical experiments. Within the experimental section all experiments are described and explained including the preparation, the act of carrying out the experiment and the physical explanation. In order to enable readers to find quickly experiments that fit their purposes, all experiments have been categorized into branches of physics. Moreover this diploma thesis contains a DVD with video recordings of all experiments.

The purpose of this diploma thesis is to reach people working in the field of education and to motivate them to carry out experiments by using simple means in order to get people enthusiastic about physics.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Personen bedanken, die mich während meiner Studienzeit unterstützt haben. Immer wieder waren Familienmitglieder und Freunde zur Stelle um mir zuzuhören, Tipps zu geben oder mir tatkräftig zu helfen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner wunderbaren Frau Elisabeth, die ohne Einschränkungen zu mir steht, mich in allen Lebenslagen unterstützt und mich liebevoll anspornt, wenn ich es nötig habe.

Ein großes Dankeschön gilt auch meinen Eltern, die ein offenes Ohr für alle Probleme ihrer Kinder haben und mir stets den Rückhalt und die Unterstützung geben, die ich brauche.

Ich möchte mich auch bei Herrn Ao. Univ. – Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher für seine Geduld und hervorragende Betreuung bedanken. Jederzeit konnte ich mich mit Fragen an ihn wenden und seine Anregungen sowie die konstruktive Kritik waren eine große Hilfe.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Eidesstattliche Erklärung.....	II
Danksagung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Fachdidaktischer Teil.....	3
2.1 Das Experiment im Physikunterricht.....	3
2.1.1 Forderungen des Lehrplans für Physik.....	3
2.1.2 Didaktische Funktionen.....	5
2.1.3 Über den Einsatz von Experimenten im Physikunterricht	5
2.2 Der Freihandversuch	7
2.2.1 Begriffsbildung	7
2.2.2 Arten von Freihandversuchen.....	8
2.2.3 Möglichkeiten und Probleme von Freihandversuchen	9
3 Experimenteller Teil	11
Mechanik.....	11
3.1 Indirekte Unterstützung des Schwerpunkts einer Flasche	11
3.2 Veränderung des Schwerpunkts führt zur Veränderung der Gleichgewichtslage	13
3.3 Stabiles Gleichgewicht auf einer Nadelspitze	15
3.4 Trägheit einer Münze	17
3.5 Trägheit einer Flasche verhindert ihr Umfallen	18
3.6 Trägheit einer Flasche beeinflusst die Abrissstelle eines Fadens	20
3.7 Abschlagen eines Flaschenbodens unter Ausnutzung der Trägheit von Wasser.....	22
3.8 Entkorken einer Weinflasche unter Ausnutzung des Impulses	24
3.9 Impulsübertragung beim Ausströmen von Wasser und dadurch entstehende Rotation – das „Sengersche Wasserrad“	26

3.10	Impulserhaltung beim Entweichen von Druckluft – die Drucklufttrakte	28
3.11	CO ₂ -Überdruck schießt einen Korken aus einer Flasche	33
3.12	Unterschiedliche Haft- und Gleitreibungskoeffizienten beim Herausziehen eines Korkens aus einer Flasche	35
3.13	Wirkung des Luftdrucks auf fallende Objekte	37
3.14	Schwerelosigkeit im freien Fall	39
3.15	Heben eines Balls mithilfe der Zentripetalkraft	40
3.16	Wirkung der Zentrifugalkraft auf Flüssigkeiten – Modell einer Zentrifuge	41
3.17	Wirkung der Zentrifugalkraft auf Flüssigkeiten – Entstehung eines Rotationsparaboloids	43
3.18	Bestimmung des Berstdrucks einer PET-Flasche	45
	Hydro- und Aeromechanik, Akustik	48
3.19	Abhängigkeit der Ausfließgeschwindigkeit von der Wasserhöhe	48
3.20	Entstehung eines Luftkanals in einer Flüssigkeit auf Grund der Zentrifugalkraft – der Flaschentornado	50
3.21	Erhöhung der Ausströmgeschwindigkeit durch einen kontinuierlichen Luft-Wasser-Austausch	52
3.22	Wasser-Luft-Austausch beim Entleeren einer Flasche und allseitige Gleichheit des Drucks in Flüssigkeiten	53
3.23	Verringerung der Oberflächenspannung	55
3.24	Luft nimmt ein Volumen ein	56
3.25	Luft nimmt ein Volumen ein – ein Modell einer Taucherglocke	58
3.26	Schwimmen, schweben, sinken – ein Modell eines U-Boots	60
3.27	Schwimmen, schweben, sinken – der kartesianische Taucher	63
3.28	Schwimmen, schweben, sinken in Flüssigkeiten verschiedener Dichte	65
3.29	Schwimmen eines Körpers an einer Grenzschicht	67
3.30	Auftrieb einer Flüssigkeit geringerer Dichte in einer Flüssigkeit höherer Dichte	69
3.31	Erhöhung des Auftriebs von Rosinen durch Anheften von Kohlendioxidbläschen	70

3.32	Aufsteigen von Wassertropfen in Öl.....	71
3.33	Heronscher Brunnen	73
3.34	Messung des Luftdrucks – das Goethebarometer	76
3.35	Modell eines Manometers und allseitige Gleichheit des Drucks in Flüssigkeiten	79
3.36	Vergleich des hydrostatischen Drucks in verschiedenen Flüssigkeitstiefen und bei verschiedenen Flüssigkeitsdichten.....	82
3.37	Hydrostatischer Druck bei kommunizierenden Gefäßen.....	84
3.38	Mechanische Kippschwingung - Siphon.....	87
3.39	Ausgleich des hydrostatischen Drucks von Wasser durch den atmosphärischen Luftdruck	90
3.40	Atmosphärischer Luftdruck hilft beim Heben einer Wassersäule	92
3.41	Atmosphärischer Luftdruck hält einen Luftballon aufgeblasen	94
3.42	In Wasser gelöstes Kohlendioxid bläst einen Luftballon auf.....	96
3.43	Freisetzen des Kohlendioxids von Cola Light	97
3.44	Vortexringe.....	100
3.45	Stehende Wellen in Luft- bzw. Flüssigkeitssäulen	102
	Elektrizitätslehre und Magnetismus	104
3.46	Nachweis der Lenz'schen Regel	104
3.47	Nachweis von Eisen in Frühstücksflocken.....	107
	Optik.....	109
3.48	Brechung von Licht.....	109
3.49	Partielle Reflexion von Licht.....	111
3.50	Totalreflexion von Licht.....	112
3.51	Totalreflexion in Wasser - ein Wasserstrahl als Lichtleiter	114
3.52	Flasche als Lupe.....	116
	Wärmelehre	117
3.53	Luftthermometer	117
3.54	Volumsvergrößerung bei Erwärmung von Luft – Aufblasen eines Luftballons.....	119
3.55	Volumsvergrößerung bei Erwärmung von Luft – der Flaschengeist	120

3.56	Schlagartiges Verbrennen eines Spiritus-Luft-Gemisches	121
3.57	Rauch wird durch sich erwärmende Luft verdrängt	123
3.58	Wärmeausdehnung von Metall.....	125
3.59	Volumsverringern bei Abkühlung von Luft	127
3.60	Abkühlung von Gasen führt zu einer Verringerung des Drucks	128
3.61	Atmosphärischer Luftdruck drückt eine Flasche zusammen	130
3.62	Konvektion in Flüssigkeiten verschiedener Temperatur.....	132
3.63	Schmelzpunktniedrigung von Eis durch Druck.....	134
3.64	Schmelzendes Eis führt zu keiner Veränderung des Wasserstands des umgebenden Wassers	136
3.65	Adiabatische Expansion führt zur Bildung von Nebel	138
3.66	Unterkühltes Wasser.....	141
4	Abbildungsverzeichnis.....	144
5	Literaturverzeichnis.....	148

1 Einleitung

In Gesprächen mit Schülerinnen und Schülern ist mir immer wieder aufgefallen, dass viele Jugendliche mit wenig Begeisterung über ihren Physikunterricht sprechen. Oft werden Physikstunden als langweilig, schwer verständlich und abstrakt empfunden und den Schülerinnen und Schülern scheint der Zusammenhang zwischen Gelerntem und der Welt außerhalb des Unterrichts nicht begreiflich zu sein.

Ich bin davon überzeugt, dass das Durchführen von Experimenten im Unterricht eine Möglichkeit darstellt, Physikstunden abwechslungsreicher und interessanter zu gestalten. Dabei sollte man sich nicht nur auf Präsentationsexperimente beschränken, bei denen den Lernenden eine passive Rolle zukommt, sondern es wäre meiner Meinung nach wünschenswert die Jugendlichen auch zum selbstständigen Handeln anzuregen. Neben käuflich zu erwerbenden Schülerexperimenten kommen dafür auch Versuche infrage, die mit einfachsten Mitteln auskommen. Solche Experimente werden oft als Freihandexperimente bezeichnet. Diese bringen den großen Vorteil mit sich, dass sie von den Schülerinnen und Schülern auch zu Hause durchgeführt werden können, womit die Hoffnung verbunden ist, dass ein eigenständiges Weiterexperimentieren, Weitergeben des Erlernten und selbstständiges Weiterdenken angeregt wird.

Wie ich im Zuge meiner Ausbildung zum Physiklehrer, besonders in den Lehrveranstaltungen „Schulversuche I“ und „Schulversuche II“ erfahren durfte, gibt es eine große Zahl an Freihandexperimenten und zu fast allen Themengebieten des Physikunterrichts lassen sich passende Versuche finden.

Als sich die Möglichkeit bot bei Herrn Ao. Univ. – Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher, dem versierten Freihandexperimentator und Vortragenden der Lehrveranstaltung „Schulversuche II“, eine Diplomarbeit zu schreiben, wollte ich diese Möglichkeit unbedingt nutzen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen fachdidaktischen und einen experimentellen Teil. Im fachdidaktischen Abschnitt werden einige grundsätzliche Betrachtungen über das Experiment und den Freihandversuch im Physikunterricht angestellt. Der Großteil dieser Diplomarbeit ist dem experimentellen Teil gewidmet, welcher aus einer Sammlung von insgesamt 66 Versuchen mit PET- und Glasflaschen besteht. In den Experimenten werden die verschiedensten physikalischen Phänomene gezeigt. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu erreichen, wurden die Versuche nach großen Teilgebieten der Physik geordnet. Die in der Diplomarbeit angeführten Experimente werden detailliert beschrieben, mit Bildern und Videos dokumentiert und erklärt, sodass sie auch von Nicht-Physikern durchgeführt werden können.

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist im Bildungsbereich tätige Menschen zu erreichen. Schülerinnen und Schüler, Eltern, Lehrerinnen und Lehrer sollen zum Durchführen von Experimenten mit einfachen Mitteln angeregt und dadurch für die Physik begeistert werden.

2 Fachdidaktischer Teil

2.1 Das Experiment im Physikunterricht

2.1.1 Forderungen des Lehrplans für Physik

In der Wissenschaft sind Experimente oft Ausgangspunkt für neue Forschungen, oder dienen dazu, theoretisch gewonnene, physikalische Erkenntnisse zu bestätigen oder zu widerlegen. Sie sind ein wichtiger Bestandteil eines wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses. Es erscheint daher sinnvoll, dass Schülerinnen und Schüler schon früh mit einer Vielzahl von Versuchen in Kontakt kommen.

Im Lehrplan für Physik in der AHS-Unterstufe ist in diesem Zusammenhang Folgendes zu lesen:

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.

[1]

Um diesen Forderungen des Lehrplans gerecht zu werden, ist es unabdingbar im Unterricht Experimente vorzuführen und auch von den Schülern durchführen zu lassen.

Bei der Erarbeitung von neuen physikalischen Gesetzen mit Schülerinnen und Schülern spielt das Experiment eine zentrale Rolle. Ein didaktischer Grundsatz, der im Lehrplan formuliert wird, lautet:

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. [1]

Schon allein aus den beiden letzten Zitaten wird die Wichtigkeit von Experimenten im Physikunterricht deutlich.

Schule versteht sich nicht nur als ein Ort, an dem Wissen gelehrt wird, sondern auch als einer an dem die Schülerinnen und Schüler zum selbstständigen Denken, Verstehen, Interpretieren und Handeln hingeführt werden sollen. Laut dem Lehrplan für die AHS – Oberstufe ist daher ein wesentliches Ziel des Physikunterrichts „die Vermittlung des nötigen Rüstzeuges zum verstehenden Erleben von Vorgängen in Natur und Technik und keinesfalls nur das Informieren über sämtliche Teilgebiete der Physik.“ [2]

Als ein weiteres Ziel wird „der Erwerb folgender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Werthaltungen“ [2] gefordert:

- 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

[2]

Meiner Einschätzung nach können viele dieser Punkte gut durch das Durchführen, Interpretieren und nachfolgende Präsentieren von Experimenten, in Gruppen oder alleine, gelernt werden, was den Wert des Experiments im Physikunterricht nochmals unterstreicht.

2.1.2 Didaktische Funktionen

Da Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht das Experimentieren lernen sollen, aber gleichzeitig Versuche dazu herangezogen werden in physikalische Themen einzuführen oder Sachverhalte anschaulich darzustellen, ist das Experiment sowohl Gegenstand als auch Methode des Unterrichts. Somit erfüllen Experimente eine Vielzahl von didaktischen Funktionen:

- Genaues Beobachten wird geschult.
- Bei in Gruppen auszuführenden Experimenten wird der zwischenmenschliche und partnerschaftliche Umgang mit Mitschülerinnen und Mitschülern verbessert und die Kommunikationsfähigkeit gefördert.
- Das Durchführen von Experimenten hilft die haptischen und sensomotorischen Fähigkeiten zu verbessern.
- Experimente tragen oft zu einem umfassenderen und besseren Verständnis der erlernten Inhalte und damit zu besserem Behalten bei.
- Geeignete Versuche machen physikalische Sachverhalte unmittelbar erfahrbar.
- Durch Versuche kann die Motivation von Schülerinnen und Schülern gesteigert werden.
- Mit Experimenten gelingt es, den Unterricht näher an die wissenschaftliche Praxis heranzuführen und so einen besseren Einblick in die Arbeitsweise der Physik zu schaffen.

vgl. [3, p. 62],

2.1.3 Über den Einsatz von Experimenten im Physikunterricht

Ob ein Experiment seine didaktischen Funktionen erfüllt, hängt immer davon ab, ob es gut ausgewählt wurde. Bei der Auswahl von Versuchen sind verschiedene Gesichtspunkte zu beachten und diverse Fragen zu klären.

Wer führt das Experiment aus? Wird ein Versuch von der Lehrerin oder dem Lehrer ausgeführt, so handelt es sich meist um ein Demonstrationsexperiment. In diesem Fall sollte das Experiment so gewählt werden, dass es von allen Schülerinnen und Schülern gut beobachtet werden kann und einen übersichtlichen Aufbau hat. Außerdem ist es wichtig, sich die Aufmerksamkeit der Zuseher zu sichern und sie miteinzubeziehen (z. B. Skizze anfertigen lassen, Messwerte aufschreiben, ...).

Schülerexperimente, also von den Lernenden selbst ausgeführte Versuche, bieten die Möglichkeit, dass Schülerinnen und Schüler selbstständig Physik betreiben können und ihr Wissen vertiefen. vgl. [3, p. 63]

Wann wird ein Experiment eingesetzt? Versuche können in allen Phasen des Physikunterrichts eingesetzt werden. Zu Beginn eines neuen Themas kann ein Einstiegsexperiment verwendet werden, welches einen überraschenden Effekt zeigt und so Interesse weckt. Erkenntnisexperimente kommen zum Einsatz um neue physikalische Zusammenhänge zu erarbeiten, während Bestätigungsexperimente dazu dienen den Schülerinnen und Schülern die Richtigkeit gelernter physikalischer Gesetze zu zeigen. Anschauungsversuche haben den Zweck, den Lernenden Sachverhalte besser verständlich zu machen und Wiederholungsexperimente dienen zur Festigung des Lernstoffs. vgl. [3, p. 63f]

Sollen Messwerte erhoben und mit diesen gearbeitet werden, oder geht es nur um qualitative Beobachtungen? Wird Physik wissenschaftlich betrieben, ist das Erheben von Messwerten und das Auswerten dieser die übliche Praxis. In der Schule können solche quantitativen Experimente den Schülerinnen und Schülern einen besseren Eindruck über die fachwissenschaftlichen Arbeitsweisen der Physik liefern. Qualitative Experimente hingegen verfolgen zumeist das Ziel physikalische Zusammenhänge zu zeigen und erkennbar zu machen. vgl. [3, p. 64]

2.2 Der Freihandversuch

2.2.1 Begriffsbildung

Freihandversuche haben eine lange Geschichte und haben vielen Erfindern und Wissenschaftlern der Vergangenheit Ansatzpunkte für neue Überlegungen geboten. Der Begriff „Freihandversuch“ wurde aber erst 1890 vom Berliner Gymnasial-Professor Bernhard Schwalbe aufgebracht. Er hatte eine größere Menge an Versuchen gesammelt und im Unterricht erprobt. Professor Schwalbe bezeichnete Freihandexperimente als Versuche, „die sich fast ohne Kosten jederzeit von jedermann anstellen lassen und dabei geeignet sind, bestimmte Gesetze darzulegen oder gewisse Eigenschaften der Körper nachzuweisen.“ (Zitat von Bernhard Schwalbe) vgl. [4, p. 1]

Hermann Hahn kategorisierte die Experimente von Schwalbe und veröffentlichte diese in seinem dreibändigen Werk „Physikalische Freihandversuche“. In diesem unternimmt er einen Versuch der Präzisierung des Begriffs und schreibt:

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

[5, p. IV]

In später erschienenen Arbeiten zum Thema Freihandexperimente wurden unterschiedliche Definitionen für den Begriff des Freihandversuchs gefunden. Zwei Weitere lauten:

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

[6, p. 42f]

„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.“

[7, p. 27]

Es gestaltet sich schwierig exakt festzulegen, wie ein Freihandversuch definiert ist.

So schreibt auch Joachim Schlichting in einem Artikel:

„Die Verwendung des Begriffs Freihandversuch ist nicht eindeutig. In einer sehr globalen Bedeutung werden darunter Versuche verstanden, die entweder ausschließlich mit Alltagsgegenständen durchgeführt werden oder solche, die nur zu qualitativen Ergebnissen führen.“

[8, p. 1]

Trotz der Fülle an unterschiedlichen Definitionen für den Begriff des Freihandversuchs können einige Punkte festgehalten werden, welche für Freihandexperimente charakteristisch sind:

- Sie werden fast immer mit Materialien durchgeführt, die entweder im Haushalt vorhanden, oder für jedermann leicht zugänglich sind.
- Die Versuche sind einfach aufgebaut.
- Ein Labor ist für die Durchführung nicht nötig.
- Diese Experimente erfordern zumeist nur eine sehr geringe Vorbereitungszeit.
- Freihandexperimente sind sehr häufig qualitativer Natur.

2.2.2 Arten von Freihandversuchen

Nach den oben genannten Definitionen liegt die Annahme nahe, dass Freihandversuche immer sehr günstig sind, stets wenig Zeit brauchen und sehr einfach umzusetzen sind. Das trifft aber nicht auf alle Freihandversuche zu und so kann ihre Durchführung durchaus mit einer längeren Vorbereitungszeit, höheren Kosten oder technischem Aufwand in Verbindung stehen. Freihandversuche können aber wie folgt kategorisiert werden:

- Klassische Freihandversuche: Bei diesen Experimenten werden nur Dinge des täglichen Lebens gebraucht und auf die Verwendung teurer Geräte wird verzichtet.
- Low-Cost-Versuche: Der Kostenpunkt steht bei diesen Experimenten im Vordergrund und sie beschränken sich auf Dinge, die ohnedies vorhanden sind und nicht besorgt werden müssen.
- Sekunden-Experimente: Diese Versuche können in sehr kurzer Zeit und ohne aufwendige Vorbereitungen ausgeführt werden. Dabei kann es aber durchaus sein, dass die verwendeten Materialien und Geräte viel Geld kosten.

2.2.3 Möglichkeiten und Probleme von Freihandversuchen

Freihandversuche werden wegen ihrer zum Teil großen Einfachheit immer wieder „als Notbehelf, Lückenbüßer oder Spielereien im negativen Verständnis angesehen“ [8, p. 1] und ihr größter Vorteil wird in den geringen Kosten gesehen.

Neben dem finanziellen Aspekt weisen Freihandexperimente aber auch viele andere positive Seiten auf, die klassischen Schulexperimenten zum Teil fehlen. So knüpfen Freihandversuche durch die für sie verwendeten Materialien direkt an die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler an. Dadurch können die Ergebnisse der Experimente leichter mit Alltagserfahrungen in Zusammenhang gebracht und so die Wichtigkeit des Erlernten für das eigene Leben verstanden werden.

Freihandversuche können zumeist sehr rasch ausgeführt werden und sind daher im unterrichtlichen Geschehen dann einsetzbar, wenn es erforderlich ist. Daher bieten sie „die Möglichkeit, einen physikalischen Zusammenhang zu illustrieren und eine im Unterricht erarbeitete Idee experimentell zu untermauern, bevor die Motivation verpufft und der Anlass des Experiments verblasst ist.“ [8, p. 3]

Durch die, im Vergleich zu anderen Experimenten, große Einfachheit der Freihandversuche können sich die Schülerinnen und Schüler auf das physikalische Phänomen konzentrieren. Bei Versuchen, bei denen „der technische Aufwand im Vordergrund“ steht, kann es hingegen passieren dass der gezeigte physikalische Sachverhalt von den Lernenden „relativ gleichgültig zur Kenntnis“ [8, p. 4] genommen wird.

Freihandversuche haben auch einen sehr motivierenden Charakter, da sie oft die Schülerinnen und Schüler überraschen und eine spielerische Komponente beinhalten. Aus diesem Grund „wird ihnen häufig die mangelnde Ernsthaftigkeit vorgeworfen. Das Spielerische und Zwanglose scheinen in manchen Köpfen gegen die Würde und Seriosität der Wissenschaften zu verstoßen. Dahinter mag die Ansicht stehen, dass wissenschaftliche Aktivitäten diszipliniert, methodisch und regelgeleitet zu erfolgen haben.“ [8, p. 8] Die Freude, die mit diesen Experimenten aber vermittelt wird, kann dazu beitragen, die Lernenden zu motivieren sich mit der Materie auseinanderzusetzen und die Versuche selbst auszuführen.

Quantitative Experimente haben im fachwissenschaftlichen Alltag eine große Bedeutung. Freihandversuche sind aber hauptsächlich qualitativer Natur und können

nur schwer oder gar nicht dazu verwendet werden, mit den gewonnenen Ergebnissen Rechnungen anzustellen.

Trotz der meist einfachen Versuchsanordnungen von Freihandversuchen sind die gezeigten Phänomene oft nicht leicht zu erklären. Zumeist lässt sich die Erläuterung eines Versuchs nicht nur auf einen physikalischen Vorgang festlegen, denn eine Vielzahl von weiteren Faktoren beeinflusst den Ablauf des Experiments. Diese zusätzlich einfließenden Phänomene werden oft ausgeklammert, um den Themenbereich, der gerade besprochen wird, nicht zu verlassen und Zeit zu sparen. Die dadurch entstehende Unvollständigkeit der Erklärung kann zur Verwirrung bei den Schülerinnen und Schülern führen. Daher ist es wichtig, die Abläufe von Versuchen den Lernenden genau zu erläutern und nicht nur eine oberflächliche Erklärung zu liefern. Durch das Besprechen von gleichzeitig ablaufenden physikalischen Prozessen machen die Schülerinnen und Schüler aber die wichtige Erfahrung, dass physikalische Erscheinungen in der Realität im Allgemeinen nicht nach physikalischen Gesichtspunkten geordnet angetroffen werden.

vgl. [8, p. 5f]

3 Experimenteller Teil

Mechanik

3.1 Indirekte Unterstützung des Schwerpunkts einer Flasche

Material

- 1,5 l oder 2 l PET-Flasche
- 25 cm x 9 cm x 2 cm großes Holzbrett
- Bohrer und eine Stichsäge oder eine 35 mm Lochfräse
- Säge

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Um dieses Experiment durchführen zu können, muss eine entsprechende Holzstütze gefertigt werden.

Dazu wird das Holzbrett laut Abbildung 1 zugeschnitten.

Um den runden Ausschnitt anfertigen zu können, ist es sinnvoll, zuerst einen Kreis mit Radius 1,75 cm auf das Brett zu zeichnen, wobei sich der Mittelpunkt mittig in einem Abstand von 3,5 cm von der Stirnseite befindet. Daraufhin durchbohrt man den Kreismittelpunkt, setzt die Stichsäge dort ein und

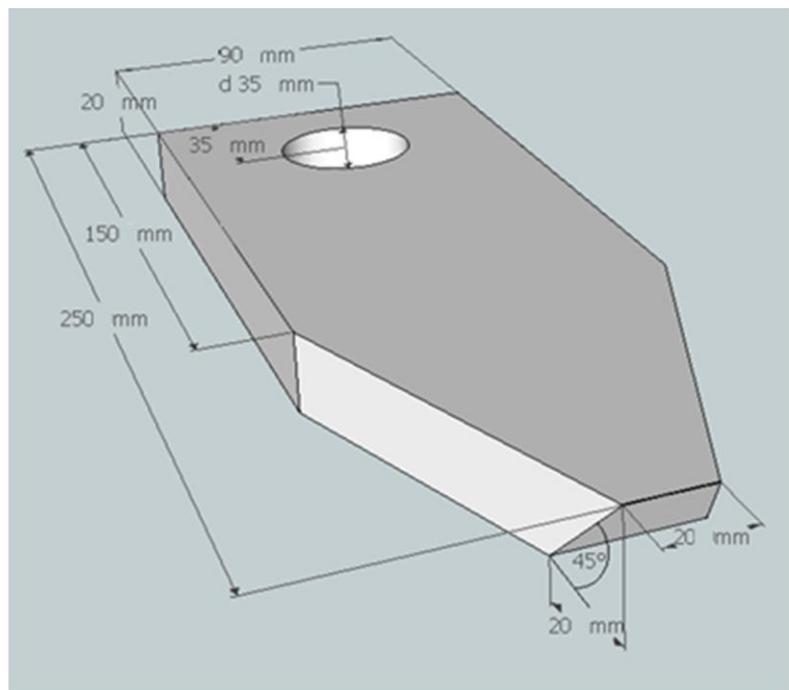


Abbildung 1: Holzstütze zur Schwerpunktsunterstützung

schneidet den Kreis aus. Alternativ dazu kann man natürlich auch eine Lochfräse verwenden.

Die Abschrägung an der sich verjüngenden Seite des Bretts sollte 45° betragen.

Nun wird eine befüllte PET-Flasche mit der Kappe in das 3,5 cm große Holzloch gesteckt, sodass ein 90°-Winkel zwischen Brett und Flasche entsteht. Daraufhin stellte man das Holz auf der abgeschrägten und sich verjüngenden Seite auf.

Man kann nun beobachten, dass die Konstruktion aus Flasche und Holz nicht umfällt und es sogar möglich ist, die Konstruktion durch leichtes Anstoßen mit den Fingern in eine Drehung zu versetzen.

Physikalische Erklärung

Bei unserer Anordnung aus Holzstück und Flasche handelt es sich, nachdem der Flaschenhals einen festen Sitz in der Holzbohrung gefunden hat, um einen starren Körper. Die Bewegung eines starren Körpers kann man durch die Translationsbewegung (geradlinige Bewegung) des Schwerpunkts und durch die Rotation (Drehung) des Körpers um den Schwerpunkt beschreiben.

Bei unserem Aufbau befindet sich der Schwerpunkt des Gesamtsystems im Raum zwischen diesen beiden Objekten und die einzige wirkende Kraft ist die Schwerkraft (F_g), die am Massenmittelpunkt ansetzt und senkrecht nach unten gerichtet ist. Durch die Geometrie der Flasche und des Holzbretts befindet sich aber die Auflagefläche der Stütze genau unterhalb des Schwerpunkts (Abbildung 2), wodurch sich dieser nicht nach unten bewegen kann und auch kein Drehmoment entsteht. Das System bleibt in Ruhe!

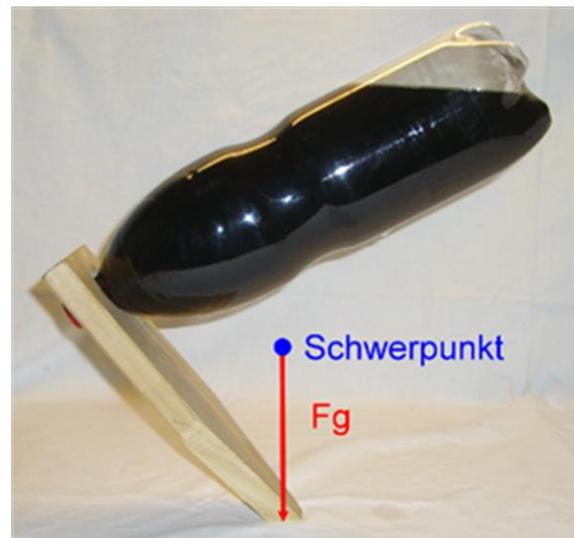


Abbildung 2: Unterstützung des Schwerpunkts

vgl. [9]

3.2 Veränderung des Schwerpunkts führt zur Veränderung der Gleichgewichtslage

Material

- zwei gleich hohe Glasflaschen
- zwei Strohhalme ohne Knickstellen
- Teppichmesser
- zwei Korken
- eine Stricknadel
- Klebeband
- zwei Geburtstagskerzen
- Feuerzeuge oder Streichhölzer
- Zeitungspapier

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Einer der Strohhalme wird mittig auf einer Länge von ca. 2 cm angeritzt, sodass man den zweiten Trinkhalm durch den entstandenen Riss schieben kann. Mit dem Klebeband werden die beiden Strohhalme so verbunden, dass sie im rechten Winkel aufeinander stehen. Daraufhin kürzt man den nicht angeritzten Strohalm, sodass rechts und links der Verbindungsstelle ca. 3 cm überstehen. Die zwei Korken werden auf die Flaschen gesteckt. Durch den kürzeren Strohalm schiebt man die Stricknadel, die man dann jeweils mit einem Ende in einen der Korken sticht, sodass sich die Nadel horizontal zwischen den Flaschen befindet. Die Geburtstagskerzen werden in je eines der zwei freien Trinkhalmenden gesteckt. Durch Hineinschieben bzw. Herausziehen der Kerzen erreicht man, dass sich der Strohalm mit den beiden Kerzen im Gleichgewicht befindet und sich horizontal stellt. Das Zeitungspapier wird unter den so geschaffenen Aufbau gelegt und die Kerzen entzündet.

Nach kurzem Warten tropft etwas Wachs von einer der Kerzen und der Balken senkt sich auf einer Seite ab. Etwas später tropft das Wachs von der anderen Kerze zu Boden und die Kombination aus Strohalm und Kerzen neigt sich in die entgegengesetzte Richtung.

Dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals.

vgl. [10, p. 50f]

Physikalische Erklärung

Zu Beginn dieses Versuchs befindet sich der Schwerpunkt des Balkens, welcher aus langem Strohalm und Kerzen besteht, auf der Drehachse (der Stricknadel). Bedingt durch das nicht vermeidbare zeitlich leicht versetzte Anzünden der Kerzen, tropft von einer der Kerzen ein Wachstropfen etwas früher auf das Zeitungspapier. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt in Richtung der Kerze, welche noch keinen Tropfen verloren hat. Aufgrund der im Schwerpunkt angreifenden Gravitationskraft entsteht ein Drehmoment und der Balken neigt sich in Richtung der schwereren Kerze.

Da Kerzenflammen senkrecht nach oben brennen, schmilzt bei einer tiefer gelegenen Kerze mehr Wachs als bei einer

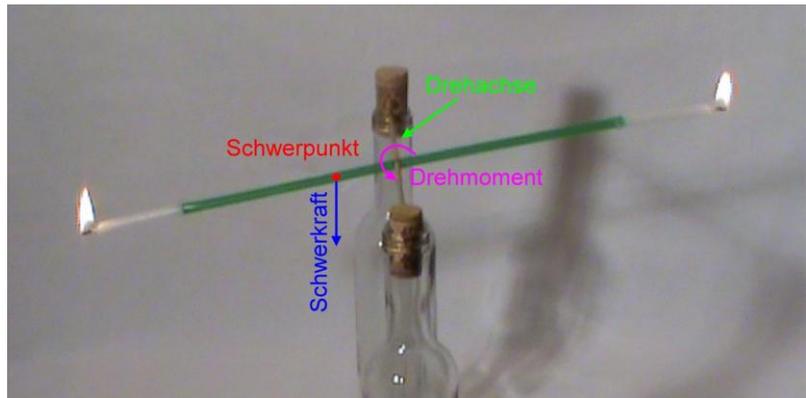


Abbildung 3: Schwerpunkt links von der Drehachse und daraus resultierendes Drehmoment

Höheren. Dadurch entsteht an der unteren Kerze schneller ein Wachstropfen, der zu Boden fällt, wodurch sich der Schwerpunkt hin zur anderen Kerze verlagert und der Balken in die gegenüberliegende Seite kippt.

Dieser Vorgang wiederholt sich, bis die Kerzen abgebrannt sind.

3.3 Stabiles Gleichgewicht auf einer Nadelspitze

Material

- eine Glasflasche
- drei Flaschenkorken
- eine Nadel
- vier Gabeln
- ein Teller

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Einer der drei Korken wird mit der Nadel der Länge nach durchgestochen, sodass die Nadelspitze ca. 1,5 cm über das Korkenende vorsteht. Dann wird die Korken-Nadel-Kombination auf die Flasche gesteckt.

Die übrigen zwei Korken werden der Länge nach halbiert und in jede Korkenhälfte wird auf der flachen Seite im rechten Winkel eine Gabel gesteckt. Die Korken werden kreuzweise auf den Teller gehängt, sodass die Gabeln nach unten baumeln.

Der Teller wird mittig auf der Nadelspitze platziert und durch leichtes Verschieben so eingerichtet, dass er im Gleichgewicht ist.

Nachdem die Gleichgewichtslage gefunden wurde, kann man den Teller durch leichtes Anstoßen in eine Drehbewegung versetzen. Trotz leichtem Auf- und Abschwingen des Tellers rutscht er nicht von der Nadelspitze und kehrt wieder in die horizontale Ausgangslage zurück, sobald er zur Ruhe gekommen ist.

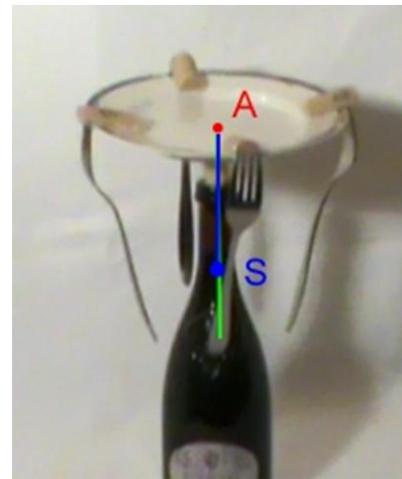


Abbildung 4: Gleichgewichtslage

Physikalische Erklärung

Man spricht von einem stabilen Gleichgewicht, wenn ein Körper bei einer geringeren Auslenkung aus der Gleichgewichtslage wieder in die Ausgangslage zurückkehrt.

In diesem Experiment befindet sich der Schwerpunkt (S) des Aufbaus aus Teller und Gabeln unterhalb des Auflagepunkts (A). (Abbildung 4)

Wird nun der Teller in Bewegung versetzt und ein Tellerrand neigt sich etwas mehr in Richtung Boden, so entsteht ein rücktreibendes Moment (RM), welches den Teller wieder in die Gleichgewichtslage zu bewegen versucht.
vgl. [11, p. 159], [12, p. 108ff]

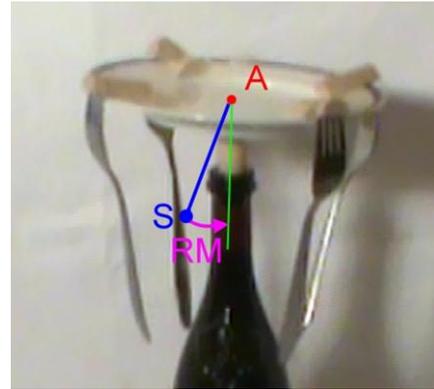


Abbildung 5: Rücktreibendes Moment bei Auslenkung aus der Gleichgewichtslage

3.4 Trägheit einer Münze

Material

- eine PET- oder Glasflasche
- eine 1-Cent- oder 2-Cent-Münze
- ein Streifen Moosgummi (ca. 25 cm x 2 cm)
- Klebstoff

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Moosgummistreifen wird mit dem Klebstoff zu einem Ring verklebt. Dieser Ring wird auf die Öffnung der Flasche gelegt. Senkrecht über der Flaschenöffnung platziert man die Münze (Abbildung 6).

Mit einem Finger fährt man in den Moosgummiring und zieht diesen ruckartig zur Seite.

Die Münze fällt durch den Flaschenhals auf den Boden der Flasche.



Abbildung 6:
Trägheit einer Münze - Vorbereitung

Physikalische Erklärung

Moosgummi ist ein leicht deformierbares Material. Zieht man ruckartig am Ring, so verformt sich dieser horizontal zu einer Ellipse. Diese Abflachung des Rings passiert so schnell, dass der durch die Fallbewegung der Münze zurückgelegte Weg geringer ist, als die Abflachung des Moosgummiring. Dadurch verringert sich die Gewichtskraft (F_N), mit der die Münze auf den Ring drückt, wodurch die Reibungskraft (F_R) zwischen Moosgummi und Münze sehr gering wird.

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (3.4:1)$$

(μ ... Haftreibungskoeffizient)

Die Trägheit der Münze ist so groß, dass die geringe Reibungskraft nicht ausreicht, um die Münze während ihres freien Falls so stark horizontal abzulenken, dass sie die Flasche verfehlen würde.

vgl. [11, p. 14f]

3.5 Trägheit einer Flasche verhindert ihr Umfallen

Material

- zwei Glasflaschen
- ein Geldschein

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Flaschen werden mit den Öffnungen aufeinander gestellt und der Geldschein zwischen den Flaschen eingeklemmt.

Zieht man langsam am Geldschein, so beginnt die obere Flasche zu kippen und muss aufgefangen werden, damit sie nicht am Tisch aufprallt.

Zieht man hingegen den Geldschein ruckartig weg, so bleiben die Flaschen aufeinander stehen.

vgl. [10, p. 16]

Physikalische Erklärung

Nach dem ersten Newtonschen Axiom verharrt jeder Körper „in Ruhe oder in geradliniger gleichförmiger Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.“ [13, p. 25]

Im Weiteren wird zur Erklärung der physikalischen Vorgänge ausschließlich die obere der beiden Flaschen betrachtet, da die untere nur als Auflagefläche dient.

Zwischen dem Geldschein und der Flaschenöffnung wirken Reibungskräfte. Die Größe der Reibungskraft und die Dauer, mit der sie wirkt, bestimmen, ob die obere Flasche umkippt und herunterfällt oder nicht.

Bei der ersten Ausführung des Experiments (langsames Herausziehen des Geldscheins) reicht die Beschleunigung des Geldscheins nicht aus, die Haftreibung zwischen Flaschenöffnung und Geldschein zu überwinden. Aus diesem Grund wird die Flasche mit dem Geldschein mitbewegt, weshalb die obere Flasche vom Flaschenrand der unteren Flasche rutscht und umkippt.

Beim raschen Herausziehen des Geldscheins kommt es nur zu einer sehr kurzen Kraftwirkung, die ausreicht um die Haftreibung zu überwinden, sodass die Flasche

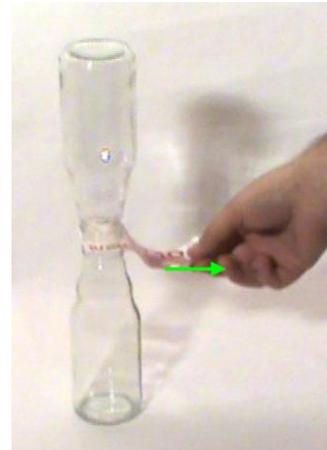


Abbildung 7:
Trägheit einer Flasche

auf dem Geldschein zu gleiten beginnt (Gleitreibung liegt vor). Da die Gleitreibung um ein Vielfaches geringer ist als die Haftreibung, ist die auf die Flasche wirkende Kraft (F) viel geringer als bei der ersten Versuchsausführung. Nach dem Grundgesetz der Dynamik (zweites Newtonsches Axiom) gilt:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3.5:1)$$

(F ... Kraft, m ... träge Masse, a ... Beschleunigung, Δv ... Geschwindigkeitsänderung, Δt ... Zeitdauer)

Da sowohl die auf die Flasche wirkende Reibungskraft (F) als auch die Wirkdauer (Δt) viel geringer sind als bei der ersten Versuchsausführung, ist die die Geschwindigkeit (v) mit der die obere Flasche mit dem Geldschein mitbewegt wird sehr gering. Die Flasche wird nur minimal verschoben und gerät nicht aus dem Gleichgewicht.

Aufgrund der Trägheit ist die Flasche bestrebt, ihren ursprünglichen Bewegungszustand der Ruhe beizubehalten. Die Trägheit verhindert also, dass die obere Flasche entscheidend aus dem Gleichgewicht gebracht wird.

3.6 Trägheit einer Flasche beeinflusst die Abrissstelle eines Fadens

Material

- eine befüllte 2 l-PET-Flasche
- ein Besenstiel
- drei ca. 0,5 m lange Wollfadenstücke
- ca. 0,5 m eines reißfesten Fadens (z. B. dicker Nylonfaden)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Ein Ende des reißfesten Fadens wird um den Hals der PET-Flasche gelegt und festgebunden. Das zweite Ende bindet man mittig um den Besenstiel, sodass die Flasche an diesem Faden vom Besenstiel baumeln kann.

Einen Wollfaden legt man mittig um den Flaschenkörper und bindet ihn fest. Mit dem zweiten Wollfaden bindet man, genau gleich wie zuvor mit dem reißfesten Faden, die Flasche am Besenstiel fest. Dabei ist darauf

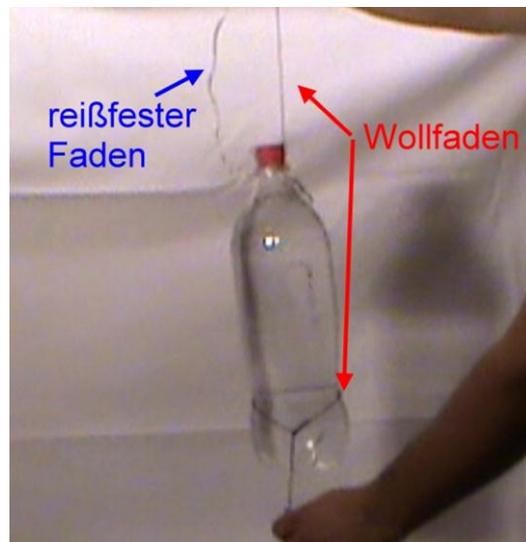


Abbildung 8: Am Wollfaden hängende Flasche

zu achten, dass beim Aufheben des Besenstiels die Flasche nur am Wollfaden, nicht aber am reißfesten Faden hängt und dieser Umstand sollte klar ersichtlich sein.

Der Besenstiel wird auf zwei Tischen aufgelegt oder von einer zweiten Person gehalten, sodass die Flasche am Wollfaden nach unten baumelt.

Zieht man ruckartig an dem Faden, der am Flaschenkörper festgebundenen ist, nach unten, so reißt dieser ab. Zieht man hingegen langsam an diesem Faden, so reißt jener Wollfaden, mit dem die Flasche am Besenstiel befestigt ist und die Flasche fällt, bis der reißfeste Faden sie aufhält.

vgl. [14]

Physikalische Erklärung

Die Wollfäden oberhalb und unterhalb der Flasche sind gleich stark und ohne die Flasche könnte man nicht voraussagen, an welcher Stelle der Wollfaden reißen würde. Die zusätzliche Masse, welche durch die mit Wasser gefüllte Flasche eingebracht wird, verändert aber die Situation.

Wird langsam am Faden nach unten gezogen, so wirken auf den oberen Faden die Zugkraft und die Gewichtskraft der an ihm hängenden Flasche, während auf den unteren Faden nur die Zugkraft wirkt. Da der obere Faden einer größeren Kraft als der Untere standhalten muss, reißt er früher und die Flasche fällt nach unten.

Zieht man hingegen ruckartig am Faden, so kommt die Trägheit der mit Wasser gefüllten Flasche ins Spiel. Diese gibt die durch den Faden auf sie ausgeübte Kraft nicht unmittelbar an den oberen Faden weiter und verharrt in Ruhe. Dadurch wirkt die Zugkraft fast ausschließlich auf den unteren Faden, welcher in diesem Fall reißt.

3.7 Abschlagen eines Flaschenbodens unter Ausnutzung der Trägheit von Wasser

Material

- eine Glasflasche
- ein Gummihammer
- Sicherheitshandschuhe
- Schutzbrille

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Glasflasche wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt. Hält man die Glasflasche in einer Hand und schlägt mit dem Gummihammer auf die Flaschenöffnung, so passiert nichts.

Leert man etwas Flüssigkeit aus der Flasche, sodass diese noch ungefähr zu zwei Dritteln befüllt ist und schlägt dann mit dem Gummihammer auf die Flaschenöffnung, so bricht der Boden der Glasflasche ab.

 Während der Durchführung dieses Experiments sollten eine Schutzbrille und Arbeits- oder Sicherheitshandschuhe getragen werden, um Verletzungen zu vermeiden.

Physikalische Erklärung

Schlägt man mit dem Gummihammer auf den Flaschenhals der nicht ganz vollgefüllten Flasche, so bewegt sich der Flaschenkörper ruckartig nach unten.

Die Wassersäule aber verharrt aufgrund der Trägheit in

ihrer ursprünglichen Lage. Dadurch entsteht zwischen Flaschenboden und Wassersäule ein Vakuum. Im Bestreben dieses Vakuum zu füllen bewegt sich das Wasser mit sehr hoher Geschwindigkeit in Richtung des Flaschenbodens und trifft auf diesen auf. Der Impuls des Wassers reicht aus, um den Flaschenboden abzuschlagen.

Im Falle der vollständig mit Wasser gefüllten Flasche wirkt der Schlag des Hammers auf die Flasche und gleichzeitig auf die Flüssigkeitssäule, welche dadurch nicht mehr



Abbildung 9: Abbrechen des Flaschenbodens

hinter der Flasche zurückbleibt. Es entsteht zwischen dem Flaschenboden und dem Wasser kein Vakuum mehr und das Experiment funktioniert nicht. vgl. [15], [16]



Abbildung 10: Vakuumbäschen [16]

Bemerkungen

Versucht man dieses Experiment mit kohlensäurehaltiger Flüssigkeit auszuführen, so ist das Abschlagen des Flaschenbodens fast unmöglich. Das liegt daran, dass sich die in der Nähe des Flaschenbodens entstehenden Vakuumbäschen sofort mit Kohlendioxid füllen und so kein Vakuum mehr vorhanden ist. vgl. [16]

3.8 Entkorken einer Weinflasche unter Ausnutzung des Impulses

Material

- eine leere Weinflasche
- ein passender Korken
- ein Handtuch
- Arbeits- oder Sicherheitshandschuhe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die leere Weinflasche wird mit Wasser befüllt und der Korken wird in den Flaschenhals gedrückt. Dabei ist es hilfreich den Korken an der Öffnung der Flasche anzusetzen und dann mit einem Hammer einzuschlagen, bis er mit dem Flaschenrand abschließt.

Das Handtuch wird mit einer Hand gegen eine stabile Wand gepresst. Daraufhin wird der Flaschenboden mit festen Schlägen senkrecht gegen das Handtuch geschlagen. Nach anfänglichen



Abbildung 11: Entkorken einer Weinflasche ohne Korkenzieher

Geräuschen, die dem Brechen einer Glasflasche sehr ähnlich sind, beginnt sich der Korken Schlag für Schlag immer weiter aus dem Flaschenhals zu bewegen, bis er letztendlich keinen Halt mehr in der Flasche findet und zu Boden fällt. Die Weinflasche ist geöffnet und das Wasser rinnt aus.



Während der Durchführung dieses Experiments sollten Arbeits- oder Sicherheitshandschuhe getragen werden, um im seltenen Fall des Zerschneidens der Weinflasche Schnittverletzungen zu vermeiden.

Physikalische Erklärung

Bei diesem Experiment spielen elastische Stöße eine wichtige Rolle. Die Weinflasche und das Wasser in der Flasche besitzen im Vergleich zur Wand eine sehr geringe Masse. Schlägt man nun mit der Flasche gegen die Wand, wird das in der Weinflasche befindliche Wasser mit der Geschwindigkeit v_1 auf die Wand zubewegt. Somit ergibt sich für das Wasser, abhängig von seiner Masse m_W , ein Impuls p_1 von:

$$p_1 = m_W v_1 \quad (3.8:1)$$

Beim Auftreffen auf die Wand kommt es zur Reflexion des Impulses und die Richtung desselben wird umgekehrt. Die Flüssigkeit bewegt sich daher mit einer neuen Geschwindigkeit v_2 in Richtung Korken und trifft mit dem Impuls $p_2 = m_W v_2$ (3.8:2) auf diesen auf, wodurch eine Kraft auf den Verschluss wirkt, die diesen aus der Flasche treibt.

Das Handtuch, das gegen die Mauer gehalten wird, dient dazu Kraftspitzen beim Schlag gegen die Wand zu verringern und so das Zerbrechen der Flasche zu verhindern. Das Handtuch bewirkt aber auch einen geringen Energieverlust, sodass die Geschwindigkeit des Wassers vor dem Stoß (v_1) größer ist als jene nach dem Stoß (v_2).

Das anfängliche Knacken der Flasche, entsteht nicht etwa dadurch, dass die Flasche brechen würde, sondern dadurch, dass der Korken sich zu lösen beginnt.

vgl. [11, p. 24f]

Bemerkungen

Das oben beschriebene Experiment kann auch mit einer original verschlossenen Weinflasche durchgeführt werden. Dazu entfernt man die Schutzfolie und führt das Experiment wie zuvor beschrieben durch. Dabei sollte man aber besonders darauf achten, dass man den Versuch früh genug abbricht, also bevor sich der Korken ganz aus der Flasche gelöst hat, da sonst durch den ausfließenden Wein unschöne Flecken auf Kleidung, Boden oder Wand entstehen können.

3.9 Impulsübertragung beim Ausströmen von Wasser und dadurch entstehende Rotation – das „Sengersche Wasserrad“

Material

- eine PET-Flasche
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall) oder Plastilin
- Vier Strohhalme mit Knickstelle
- 1 m dünne aber haltbare Schnur
- 5 mm Bohrer und Bohrmaschine
- Schere

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Vorbereitend werden ca. 2 cm vom Flaschenboden entfernt vier Löcher in die Flasche gebohrt, wobei diese immer um 90° versetzt sein sollten, sodass jeweils zwei Bohrstellen gegenüberliegen. Die Strohhalme werden so gekürzt, dass die längere Seite ca. 7 cm lang ist. Diese Strohalmabschnitte werden jeweils bis auf 2 cm in je eine Bohrung geschoben. Im nächsten Schritt werden die Löcher mit 2-Komponenten-Knetmasse oder Plastilin abgedichtet. Dann werden die Strohhalme an der Knickstelle in einem 90°-Winkel umgebogen (alle in die gleiche Richtung). Die Flasche füllt man nun mit Wasser und verschließt sie mit dem Deckel. Dabei ist es hilfreich, während des Befüllungsvorgangs die Enden der Strohhalme mit Klebeband zuzukleben.

Nachdem der Deckel verschlossen wurde, kann kein Wasser mehr auslaufen (siehe Abschnitt 3.22).

Die Schnur wird um den Flaschenhals gelegt und festgebunden und die Flasche wird am Faden hochgehoben.

Öffnet man nun den Flaschendeckel, so strömt Wasser aus den Strohhalmen und die Flasche beginnt sich zu drehen.



Abbildung 12: Wasserrad

Physikalische Erklärung

Flüssigkeit, die aus einem Loch in einem Behälter austritt, hat, abhängig von der Höhe des Wasserstands, eine gewisse Geschwindigkeit (siehe Abschnitt 3.19) und einen dazugehörigen Impuls (\vec{p}). An der Knickstelle des Strohhalmes übt der Strohhalm auf das Wasser eine Kraft (\vec{F}_1) aus und das Wasser wird umgelenkt.

$$\vec{F}_1 = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (3.9:1)$$

Nach dem dritten Newtonschen Axiom „*actio = reaction*“ übt aber auch die Flüssigkeit auf den Strohhalm eine betragsmäßig zu F_1 gleichgroße Kraft (F_2) aus, die im rechten Winkel auf den Halm steht (Abbildung 13). Somit verursacht das aus einem der Strohhälme austretende Wasser ein Drehmoment (M_{St}).

$$M_{St} = r \cdot F_2 \quad (3.9:2)$$

(r ... Abstand Mitte des Flaschenquerschnitts bis zum Knick im Halm)

Das Gesamtdrehmoment, welches auf die Flasche wirkt, ist, da alle Drehmomente gleichgerichtet sind, die Summe der vier Einzeldrehmomente der Strohhälme.

Zu bemerken ist noch, dass bei der Ablenkung des Wassers auch noch andere Kräfte auftreten, die radial zur Flaschenwand gerichtet sind. Durch die Anordnung der Strohhälme (jeweils gegenüberliegend) heben sich diese aber auf und spielen daher für die Erklärung dieses Experiments keine Rolle.

vgl. [11, p. 42f]

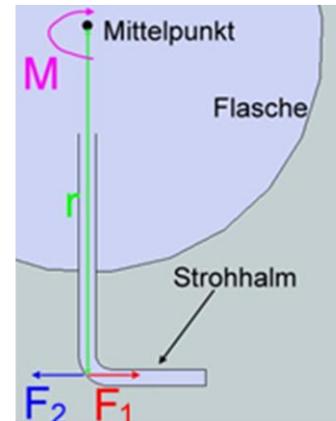


Abbildung 13:
Wasserrad – Erklärung

3.10 Impulserhaltung beim Entweichen von Druckluft – die Drucklufttrakte

Material

- eine große PET-Flasche
- ein ¾“ - Hahnstück eines Gardena-Schlauchstecksystems
- ein ½“ – Schlauchstück eines Gardena-Schlauchstecksystems
- ca. 2 m eines glasklaren Schlauchs (6 mm Innendurchmesser)
- 2-Komponentenklebstoff
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall)
- 1,5 m Kantholz (4 cm x 7 cm)
- Säge
- Holzschrauben
- Nägel
- Hammer
- ein kleines Scharnier
- eine ca. 50 cm lange dünne Holzleiste
- 35 mm Forstnerbohrer oder Lochfräse
- 10 mm Bohrer
- Bohrmaschine
- Fahrradpumpe mit Druckanzeige
- Karton
- Schere
- Paketklebeband
- Schnur

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der durchsichtige Schlauch wird mit 2-Komponenten-Knetmasse in das Gardena-Schlauchstück geklebt (Abbildung 14). Der Verschluss der Flasche wird mit einem 10-mm-Bohrer mittig durchbohrt und mit dem 2-Komponentenklebstoff in das Gardena- Hahnstück geklebt. (Abbildung 15)

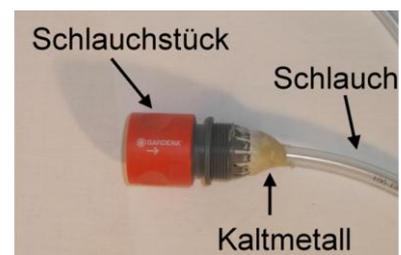


Abbildung 14: Schlauchstück

Das Kantholz schneidet man mit der Säge in drei 50 cm lange Stücke. Zwei der Holzstücke werden parallel in einem Abstand von ca. 50 cm nebeneinander gelegt und das Dritte wird auf ihnen mittig angeschraubt (Abbildung 16). In der Mitte des auf den anderen Holzstücken befindlichen



Abbildung 15: Hahnstück

Kantholzes bohrt man mit dem Forstnerbohrer ein 2 cm tiefes Loch. Mittig in diesem Loch, bohrt man dann mit dem 10-mm-Bohrer durch das Holz. Das Scharnier wird auf der Unterseite des Kantholzes auf Höhe des mit dem Forstnerbohrer gebohrten Lochs angeschraubt. An der zweiten, noch nicht verschraubten Scharnierhälfte befestigt man die dünne Holzleiste.

Mit der 2-Komponenten-Knetmasse klebt man den Verschluss des Gardena-Schlauchstücks so in das mit dem Forstnerbohrer gebohrte Loch, dass beim Einsetzen des Schlauchstücks dieses senkrecht nach oben zeigt.

Nach dem Aushärten der 2-Komponenten-Knetmasse wird der durchsichtige Schlauch von oben durch das Loch im Kantholz gezogen und das Gardena-Schlauchstück im zuvor in den in das Kantholz geklebte Verschluss festgeschraubt. Eine Schnur wird mit einem Ende ca. 5 cm vom Scharnier entfernt fest um die dünne Holzleiste gebunden. Das zweite Ende befestigt man so am beweglichen Teil (orange Kappe) des Gardena-Schlauchstücks, dass die dünne Holzleiste ca. 45° nach oben steht und die Schur gespannt ist. Beim Anbringen der Schnur ist es von Vorteil, wenn man Nägel in die dünne Holzleiste schlägt, sodass die Schnur nicht näher zum

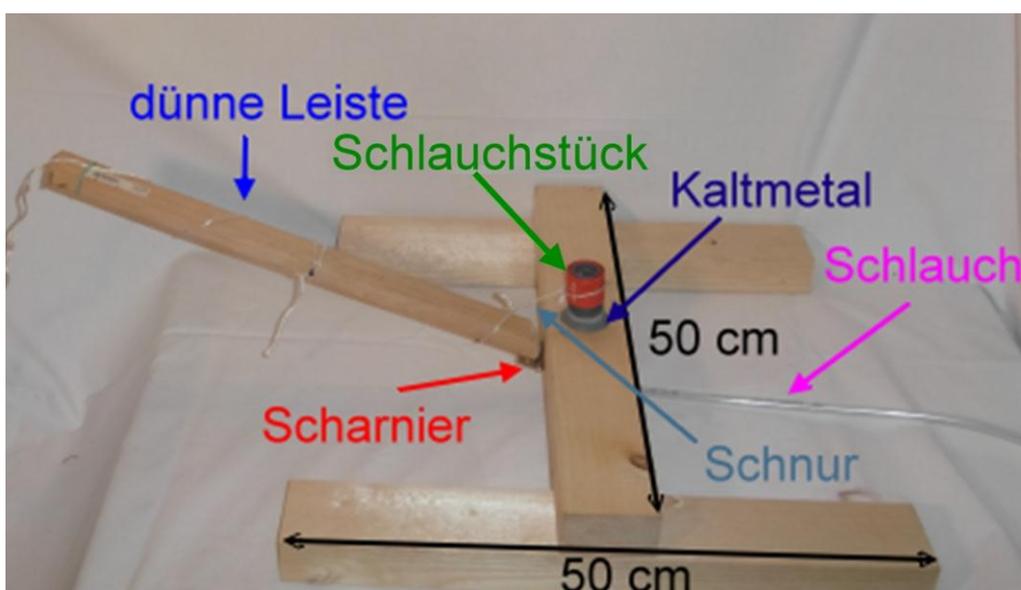


Abbildung 16: Startvorrichtung

Scharnier rutschen kann.

Aus dem Karton werden drei Raketenflügel gefertigt, welche die Flasche während ihres Flugs stabilisieren sollen. Dazu schneidet man Kartonstücke wie in Abbildung 17 dargestellt aus. Entlang des 13 cm langen Falzes wird der Karton gefaltet und zusammengeklebt. Auf die Befestigungsflächen, welche im rechten Winkel abgebogen werden, gibt man jeweils einen Streifen

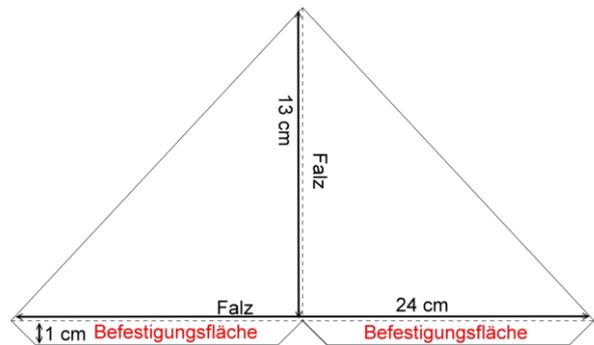


Abbildung 17: Raketenflügel

Paketklebeband und befestigt die Raketenflügel an die Flasche. Dabei sollten die Flügel 120° versetzt angebracht werden (Abbildung 18).

Das zuvor präparierte Hahnstück wird auf die PET-Flasche geschraubt und in das Gardena-Schlauchstück gesteckt. Das Ende des glasklaren Schlauchs verbindet man mit der Fahrradpumpe.

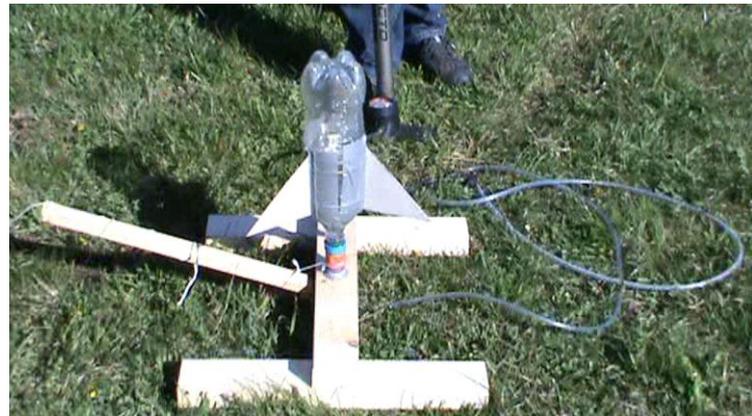


Abbildung 18: Startklare Rakete

Durch Pumpen von Luft in die Flasche erhöht sich der Druck in dieser. Wurde ein Druck von ca. 6 bar erreicht, drückt man die dünne Leiste der Startvorrichtung leicht nach unten, sodass der Haltemechanismus des Gardena-Schlauchstücks das Hahnstück freigibt. Unter lautem Zischen entweicht die Luft aus der Flasche und die Rakete bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit nach oben.



Da die Flasche eine sehr hohe Geschwindigkeit erreicht und bei einem etwaigen Zusammenstoß mit einem Menschen Verletzungen verursachen kann, ist es unbedingt notwendig, dass man darauf achtet, nicht von der Rakete getroffen zu werden.

Zuschauer sollten daher einen Sicherheitsabstand von zumindest 10 m einhalten.

Physikalische Erklärung

Die in diesem Versuch beschriebene Rakete funktioniert aufgrund des Rückstoßprinzips.

Durch das Pumpen wird der Druck innerhalb der Flasche erhöht, sodass gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck ein Überdruck von mehreren bar entsteht.

Beim Auslösen der Rakete entweichen durch das Hahnstück Luftmoleküle, welche eine hohe Geschwindigkeit haben.

Geht man zur Vereinfachung davon aus, dass alle Luftmoleküle gleichzeitig aus der Flasche entweichen und alle die selbe Geschwindigkeit haben, so berechnet sich der Gesamtimpuls der Luftmoleküle mittels:

$$p_L = m_L \cdot v_L \quad (3.10:1)$$

(p_L ... Impuls der austretenden Luft, m_L ... Masse der austretenden Luft,
 v_L ... Geschwindigkeit der austretenden Luft)

Da nach dem Impulserhaltungssatz der Gesamtimpuls eines Systems erhalten bleiben muss, gilt:

$$p_L = p_{Fl} \rightarrow m_L \cdot v_L = m_{Fl} \cdot v_{Fl} \quad (3.10:2)$$

(p_{Fl} ... Impuls der Flasche, m_{Fl} ... Masse der Flasche, v_{Fl} ... Geschwindigkeit der Flasche)

Somit ergibt sich für die Geschwindigkeit, mit der sich die Flasche nach dem Ausströmen der Luft bewegt:

$$v_{Fl} = \frac{m_L}{m_{Fl}} \cdot v_L \quad (3.10:3)$$

Obwohl die Masse der in der Flasche befindlichen Luft (m_L) viel geringer ist als die Masse der Flasche, erreicht die Rakete eine sehr hohe Geschwindigkeit, was durch die noch viel höhere Geschwindigkeit der austretenden Luftmoleküle zu begründen ist. Je höher der Druck in der Flasche ist, umso schneller werden die Luftmoleküle aus der Flasche getrieben, umso höher wird die Endgeschwindigkeit und damit auch die Steighöhe der Rakete.

vgl. [11, p. 479ff]

Bemerkungen

Mit dem hier beschriebenen Versuchsaufbau können ohne weiteres Flughöhen von mehr als 10 m erreicht werden. Befüllt man die Rakete aber vor dem Start ungefähr bis zur Hälfte mit Wasser, so erhöht sich die Flughöhe erheblich. In diesem Fall gilt:

$$v_{Fl} = \frac{m_L + m_W}{m_{Fl}} \cdot v_T \quad (3.10:4)$$

(m_W ... Masse des Wassers, v_T ... Geschwindigkeit des „Treibstoffs“ (Wasser und Luft))

Durch die größere Masse des „Treibstoffs“ erhöht sich also der Impuls der Flasche und damit auch ihre Geschwindigkeit.

Beim Start einer mit Wasser befüllten Flasche wird die oder der Versuchsausführende nass, wenn sich die Person in unmittelbarer Nähe der Rakete aufhält. Das lässt sich dadurch vermeiden, dass man eine lange Schnur an der dünnen Leiste befestigt und durch einen kräftigen Zug am Band den Start auslöst.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Internet eine Vielzahl von Anleitungen (zum Teil viel einfachere als die hier vorgestellte) zum Bau von Luftraketen zu finden sind. Die meisten bieten aber nicht die Möglichkeit, die Rakete bei einem vom Benutzer gewählten Druck starten zu lassen.

3.11 CO₂-Überdruck schießt einen Korken aus einer Flasche

Material

- eine Glasflasche
- ein Bierflaschenverschluss (Verschluss aus Plastik zum Wiederverschließen einer Flasche) oder ein Flaschenkorken
- Backpulver
- Essig

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Ungefähr 15 g Backpulver (ein Briefchen) werden in die Flasche gegeben. Daraufhin wird Essig hinein geschüttet, sodass dieser ca. 3 cm hoch steht. Man verschließt die Flasche rasch mit dem Bierflaschenverschluss oder einem Korken, hält diesen mit einer Hand gegen die Flaschenöffnung gedrückt und schüttelt die Flasche für eine halbe Minute. Man kann beobachten, wie in der Flasche das Essig-Backpulver-Gemisch aufschäumt und CO₂-Gas entsteht, welches einen Überdruck aufbaut.

Daraufhin wird die Flasche so gedreht, dass die Flaschenöffnung vom Körper weg gerichtet ist. Nun lockert man den Bierflaschenverschluss leicht bzw. zieht den Korken etwas aus dem Flaschenhals. Mit einem Knall löst sich plötzlich der Verschluss und fliegt mehrere Meter weit weg.



Abbildung 19: Entweichen der Luft



Hat man Backpulver und Essig in die Flasche gegeben und diese verschlossen, so darf der Verschluss während der übrigen Ausführung des Experiments auf niemanden gerichtet werden, da sich der Bierflaschenverschluss oder Korken ungewollt lösen und einen Menschen treffen könnte.

Physikalische Erklärung

In handelsüblichem Backpulver wird Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) als Backtriebmittel verwendet. Schüttet man nun Essig in die Flasche und es kommt Natriumhydrogencarbonat mit Essigsäure (CH_3COOH) in Kontakt, so bilden sich Natrium (Na), Essigsäurereste (CH_3COO^-) und Kohlensäure (H_2CO_3).



Da Kohlensäure in dieser Form nicht beständig ist, zerfällt sie in einem weiteren Schritt in Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2).



Das Kohlendioxid wird aus der Flüssigkeit in die in der Flasche befindlichen Luft abgegeben, wodurch sich die Anzahl der Gasmoleküle in der Flasche erhöht. Daher steigt auch der in der Flasche herrschende Gasdruck an. Innerhalb der Flasche ist dann der Druck größer als der außerhalb der Flasche wirkende atmosphärische Luftdruck. Die Reibung zwischen dem Flaschenverschluss und der Flasche reicht aber aus um den Druckunterschied auszugleichen. Lockert man jedoch den Verschluss, so gilt das nicht mehr und die Luft entweicht schlagartig aus der Flasche. Beim Entweichen nimmt die expandierende Luft den Verschluss mit sich mit, welcher in hohem Bogen davonfliegt.

3.12 Unterschiedliche Haft- und Gleitreibungskoeffizienten beim Herausziehen eines Korkens aus einer Flasche

Material

- leere Weinflasche mit dazu passendem Korken
- Schraubenzieher
- Hammer
- ein kleiner Plastiksack (aus der Obst- und Gemüseabteilung)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Korken wird in die Öffnung der Weinflasche gedrückt und mit dem Schraubenzieher und dem Hammer soweit eingeschlagen, bis er in das Innere der Flasche fällt.

Den Plastiksack rollt man der Länge nach zusammen und schiebt ihn durch die Flaschenöffnung in die Flasche.

Durch leichtes Beuteln der Flasche

wird erreicht, dass der Flaschenkorken unterhalb des Plastiksacks zu liegen kommt (Abbildung 20).

Als Nächstes wird der Plastiksack aufgeblasen, sodass der Korken zwischen Flaschenwand und Sack eingeklemmt wird. Während des Aufblasens muss man darauf achten, dass zwischen Plastiksack und Flaschenöffnung etwas Platz bleibt, sodass Luft aus der Flasche entweichen kann. Tut man das nicht, lässt sich der Sack nicht aufblasen. (siehe Abschnitt 3.41)

Daraufhin ergreift man das aus der Flasche ragende Ende des Plastiksacks und zieht kräftig an diesem, bis der Plastiksack in der Flasche platzt und so die Luft aus ihm in die Flasche entweicht. Dann wird weiter gezogen und beobachtet, wie der Korken langsam mit dem Plastiksack durch den Flaschenhals nach außen gezogen wird.

vgl. [17]

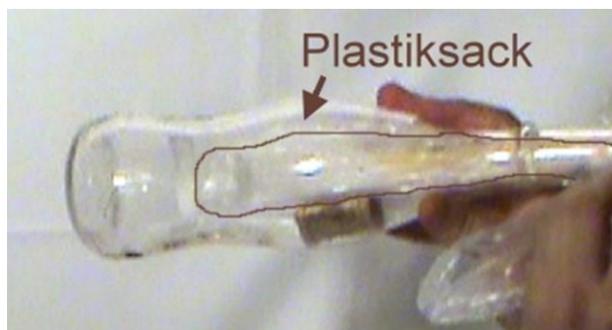


Abbildung 20: Einrichten des Korkens

Physikalische Erklärung

Für dieses Experiment sind unterschiedliche Haft- und Gleitreibungskoeffizienten zwischen Korken und Glaswand der Flasche sowie Korken und Plastiksack entscheidend.

Für die Reibung zwischen zwei Festkörpern gilt allgemein:

$$F_R = F_N \cdot \mu \quad (3.12:1)$$

(F_R ... Reibungskraft, F_N ... Normalkraft, μ ... Reibungskoeffizient)

In diesem Fall ist die Normalkraft (F_N) jene Kraft, mit der der Korken gegen die Flaschenwand bzw. den Plastiksack gepresst wird. Diese Kraft ist, sowohl an jenen Stellen an denen der Korken die Glaswand als auch an jenen an denen der Korken das Plastik berührt, die gleiche.

Der Koeffizient der Haftreibung zwischen Korken und Plastik ist aber größer als der zwischen Korken und Glas.



Abbildung 21: Am Plastiksack haftender Korken

Daher reicht der Zug am Plastiksack aus, um die Haftreibung an den Stellen, an denen der Korken die Glaswand der Flasche berührt, zu überwinden und er beginnt entlang der Glasfläche zu gleiten. Auf der gegenüberliegenden Seite reicht die durch das Ziehen verursachte Kraft nicht aus um die Haftreibung zwischen Korken und Plastiksack zu überwinden. Der Korken bleibt am Plastiksack haften. Da der Koeffizient der Haftreibung um ein Vielfaches größer ist als jener der Gleitreibung, gleitet der Korken entlang der Glaswand mit dem Plastiksack durch den Flaschenhals.

3.13 Wirkung des Luftdrucks auf fallende Objekte

Material

- eine PET-Flasche
- ein Strohhalm
- ein 4-mm-Bohrer
- Knetmasse

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In den Verschluss der PET-Flasche wird mittig ein Loch gebohrt. Durch dieses wird der Strohhalm geschoben, sodass noch ungefähr 1,5 cm aus der Flasche ragen. Mit der Knetmasse wird die Verbindung zwischen Trinkhalm und Flaschendeckel abgedichtet.

In die Flasche wird soviel Wasser gefüllt, das der Strohhalm ca. 2 cm in die Flüssigkeit eintaucht. Der präparierte Deckel wird auf die Flasche geschraubt und man bläst in den Strohhalm, sodass im Wasser Luftblasen aufsteigen. Hört man auf zu blasen, so tritt ein Wasserstrahl an der Oberseite des Strohhalms aus, der langsam immer geringer wird, bis er schließlich versiegt und der Strohhalm vollständig mit Wasser gefüllt ist.

Hebt man nun die Flasche etwas an und lässt sie fallen, so kann man beobachten, dass während des Fallens an der Oberseite des Strohhalms ein Wasserstrahl austritt.



Abbildung 22:
Wasserstrahl
während des freien
Falls

Physikalische Erklärung

Zu Beginn des Experiments ist der Luftdruck außerhalb der Flasche (p_A) gleichgroß wie der Druck innerhalb der Flasche (p_{Fl}). Durch das Blasen in den Strohhalm kommt mehr Luft in die Flasche und damit wird der Druck in der Flasche erhöht. Der Überdruck führt dazu, dass Wasser aus der Flasche verdrängt wird und aus dem Trinkhalm austritt.

Sobald kein Wasser mehr aus der Öffnung des Strohhalms rinnt, entspricht der Gasdruck in der Flasche der Summe aus äußerem Luftdruck und dem hydrostatischen

Druck der Flüssigkeitssäule im Strohhalm, welche von der Wasseroberfläche bis zum oberen Ende des Trinkhalms reicht.

$$p_{Fl} = p_A + \rho_W g h \quad (3.13:1)$$

(ρ_W ... Dichte von Wasser, h ... Länge des Strohhalms oberhalb der Wasseroberfläche, g ... Erdbeschleunigung)

Nun ist es so, dass während des freien Falls keine Gewichtskräfte wirken, siehe auch Abschnitt 3.14. Da aber der hydrostatische Druck der Gewichtsdruck einer Flüssigkeitssäule ist, kann während der Fallphase kein hydrostatischer Druck herrschen. Deshalb ist während der Zeit des freien Falls der Druck in der Flasche größer als jener außerhalb der Flasche.

$$p_{Fl} > p_A \quad (3.13:2)$$

Dieser Druckunterschied führt dazu, dass Wasser durch den Strohhalm nach außen gepresst wird.

vgl. [18]

3.14 Schwerelosigkeit im freien Fall

Material

- eine PET-Flasche
- ein dünner Bohrer oder ein Nagel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Etwa 2 cm vom Flaschenboden entfernt werden drei Löcher im Abstand von 1,5 cm gebohrt. Mit den Fingern einer Hand werden die drei Löcher zugehalten und die Flasche wird mit Wasser vollgefüllt. Der Verschluss der Flasche wird aufgeschraubt und nach dem Entfernen des Fingers merkt man, dass kein Wasser aus den Löchern rinnt. (siehe Abschnitt 3.22)

Nun wird die Flasche angehoben und der Deckel abgeschraubt. Wasser tritt aus den Löchern aus. Lässt man die Flasche los, so kann man beobachten, dass die Wasserstrahlen aus den Bohrungen versiegen, während die Flasche im freien Fall ist.

Physikalische Erklärung

Der Grund, dass aus einer Flasche mit Löchern Flüssigkeit austritt, ist der hydrostatische Druck (siehe auch Abschnitt 3.19). Der hydrostatische Druck (p_{hyd}) wiederum ist der Schweredruck der Wassersäule über einem Punkt innerhalb der Flüssigkeit.

$$p_{hyd} = \rho_{Fl}gh \quad (3.14:1)$$

(ρ_{Fl} ... Dichte der Flüssigkeit, h ... Flüssigkeitshöhe über dem betrachteten Punkt, g ... Erdbeschleunigung)

Während des freien Falls aber werden sowohl die Flasche als auch die in ihr befindliche Flüssigkeit mit der Erdbeschleunigung (g) beschleunigt. Daher könnte man sagen, dass das Wasser gegenüber der Flasche schwerelos ist. Deshalb werden während des freien Falls keine Gewichtskräfte wirksam, innerhalb der Flüssigkeit herrscht kein hydrostatischer Druck und es fließt keine Flüssigkeit mehr aus der Flasche, bis diese am Boden auftrifft.

vgl. [11, p. 416], [12, p. 42]

3.15 Heben eines Balls mithilfe der Zentripetalkraft

Material

- eine PET-Flasche
- ein Teppichmesser
- ein Tischtennisball

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Mit dem Teppichmesser entfernt man den oberen Teil der PET-Flasche, sodass noch etwas Plastik von jenem Bereich übrig bleibt, der sich zum Flaschenhals verjüngt. Der Tischtennisball wird auf eine flache Unterlage gelegt und die abgeschnittene Flasche wird darüber gestülpt.

Die Flasche bewegt man in kleinen Kreisen, sodass der Tischtennisball innerhalb der Flasche zu rotieren beginnt. Hat der Tischtennisball eine gewisse Geschwindigkeit erreicht, steigt er entlang der Flaschenwand etwas in die Höhe. Während man weiter kleine Kreise beschreibt, ist es möglich die Flasche aufzuheben ohne dass der Tischtennisball aus der Flasche fällt.

Physikalische Erklärung

Bewegt man den Flaschenabschnitt um den Ball, so kommt es zu Reibung zwischen Ball und Flasche. Diese Reibung bewirkt, dass sich der Ball zu bewegen beginnt. Nach Kurzem rotiert der Ball auf einer Kreisbahn entlang der Innenseite der Flasche. Die dafür nötige Zentripetalkraft wird von der



Abbildung 23:
Vertikale Kraftkomponente

Flaschenwand aufgebracht und ist Anteil einer Zwangskraft, die im rechten Winkel auf die Flaschenwand steht (Abbildung 23). Diese Zwangskraft hat auch eine vertikal nach oben gerichtete Kraftkomponente, die bei genügend großer Geschwindigkeit des rotierenden Balls größer als die Gewichtskraft des Tischtennisballs ist, weshalb der Ball nach oben wandert. Der Ball kann maximal bis zu jener Höhe in der Flasche gelangen, ab der die Flaschenwand horizontal nach oben zu verlaufen beginnt. In diesem zylindrischen Bereich hat die Zwangskraft, da sie im rechten Winkel auf die Flaschenwand steht, keine vertikale Kraftkomponente mehr.

3.16 Wirkung der Zentrifugalkraft auf Flüssigkeiten – Modell einer Zentrifuge

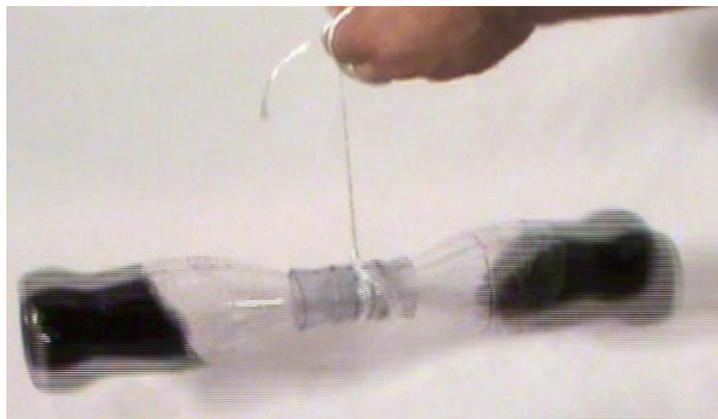
Material

- zwei gleiche, kleine PET- oder Glasflaschen
- Lebensmittel- oder Ostereierfarbe
- ca. 8 cm eines durchsichtigen Schlauchs (Durchmesser 1 Zoll)
- ca. 0,5 m Schnur

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Über den Flaschenhals einer der Flaschen wird der Schlauch bis zur Hälfte geschoben. Daraufhin füllt man mit Lebensmittelfarbe eingefärbtes Wasser in diese Flasche, bis sie bis zum Rand gefüllt ist. Anschließend wird die zweite Flasche mit dem Hals in den Schlauch gesteckt, sodass sich die Öffnungen der Flaschen berühren. Mittig um den Schlauch wird die Schnur gelegt und festgebunden.

Mit einer Hand ergreift man die Schnur und hebt die beiden Flaschen auf. Die zweite Hand verwendet man dazu um die Flaschen horizontal zu halten, sodass sich das Wasser gleichmäßig auf beide Gefäße verteilen kann. Nun werden die Flaschen horizontal in Rotation versetzt.



Man kann beobachten, wie sich die Flüssigkeit an den beiden Flaschenböden sammelt und in der Mitte der Versuchsanordnung ein flüssigkeitsfreier Bereich entsteht.

Physikalische Erklärung

Die hier vorgestellte Versuchsanordnung stellt ein Modell einer Zentrifuge dar. Zentrifugen sind technische Vorrichtungen, welche die unterschiedliche Massenträgheit verschiedener Stoffe nutzen um diese zu trennen.

In unserem Fall befinden sich innerhalb der Flaschen (Zentrifugalraum) zwei Stoffe (Wasser und Luft). Versetzt man die Versuchsanordnung in eine Drehbewegung, so

wirkt auf die in der Flasche befindlichen Stoffe die Zentrifugalkraft. Da Wasser eine viel höhere Dichte als Luft hat, wirkt auf dieses eine stärkere Zentrifugalkraft, weshalb die Flüssigkeit zu den Flaschenböden hin bewegt wird. Dabei verdrängt sie die Luft, die sich deshalb in der Mitte der Versuchsanordnung sammelt.

Bemerkungen

Alternativ zum oben beschriebenen Versuchsaufbau wäre es auch möglich anstelle des Schlauchstücks das in Abschnitt 3.20 beschriebene Flaschenverbindungsstück zu benutzen.

Bemerkenswert ist, dass die Oberfläche der Flüssigkeit nicht horizontal nach unten verläuft, sondern leicht schräg und gekrümmt ist. Dieser Umstand lässt sich dadurch erklären, dass sich die Oberfläche einer Flüssigkeit immer normal zu der auf sie wirkenden Gesamtkraft stellt. Bei einer in Rotation befindlichen Flüssigkeit nimmt aus diesem Grund die Oberfläche die Form eines Rotationsparaboloids an. (siehe auch Abschnitt 3.17)

3.17 Wirkung der Zentrifugalkraft auf Flüssigkeiten – Entstehung eines Rotationsparaboloids

Material

- eine PET-Flasche mit möglichst breitem Flaschenkörper
- eine lange Schraube mit passender Schraubenmutter und zwei passenden Beilagscheiben
- Bohrer und Bohrmaschine

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Verschluss der PET-Flasche wird mittig durchbohrt, sodass von der Unterseite des Deckels aus die Schraube durch das Loch geschoben werden kann. Von den Beilagscheiben wird je eine innerhalb und eine außerhalb des Deckels auf die Schraube gesteckt und die Schraubenmutter wird auf die Schraube gedreht, sodass der Flaschendeckel zwischen den beiden Beilagscheiben fest eingeklemmt wird. (Abbildung 25)

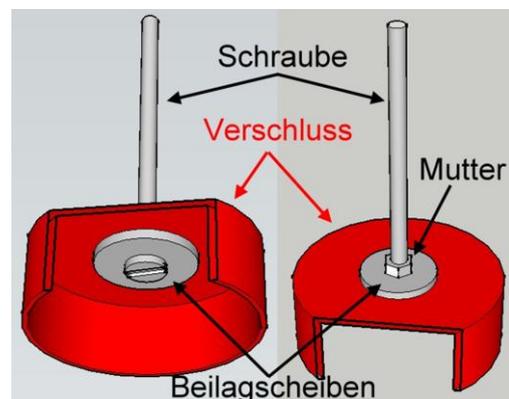


Abbildung 25: Verschluss (Ober- und Unteransicht)

Den so präparierten Deckel schraubt man auf eine halbvolle Wasserflasche. Die Schraube wird in das Bohrfutter der Bohrmaschine eingespannt und die Kombination aus Flasche und Bohrmaschine so gehalten, dass sich der Deckel der Flasche unten befindet und die Flasche senkrecht nach oben steht.

Betätigt man die Bohrmaschine, so setzt sich mit der Flasche die Flüssigkeit in Bewegung. Stoppt man die Bohrmaschine, so bewegt sich die Flüssigkeiten noch etwas weiter und man sieht, dass die Oberfläche der Flüssigkeit die Form eines Rotationsparaboloids einnimmt.

Physikalische Erklärung

Oberflächen von Flüssigkeiten stellen sich senkrecht auf die auf sie wirkende Gesamtkraft (F_{res}).

Auf die Moleküle einer rotierenden Flüssigkeit wirkt einerseits die zum Erdmittelpunkt (senkrecht nach unten) gerichtete Gewichtskraft (F_g) und andererseits die nach außen gerichtete Zentrifugalkraft (F_Z).

Die auf einen Körper wirkende Zentrifugalkraft ist abhängig von der Winkelgeschwindigkeit (ω) mit der sich der Körper dreht, dem Abstand (r) des Körpers von der Drehachse und der Masse (m) des Körpers.

$$F_Z = m\omega^2 r \quad (3.17:1)$$

Schaltet man die Bohrmaschine ein, so wird die Flasche in Bewegung versetzt und durch Reibungskräfte auch die in ihr befindliche Flüssigkeit. Mit zunehmender Geschwindigkeit wird die auf die Wassermoleküle wirkende Zentrifugalkraft immer größer. Aus diesem Grund werden diese immer stärker nach außen beschleunigt und die Oberfläche der Flüssigkeit nimmt die Form eines Rotationsparaboloids an.

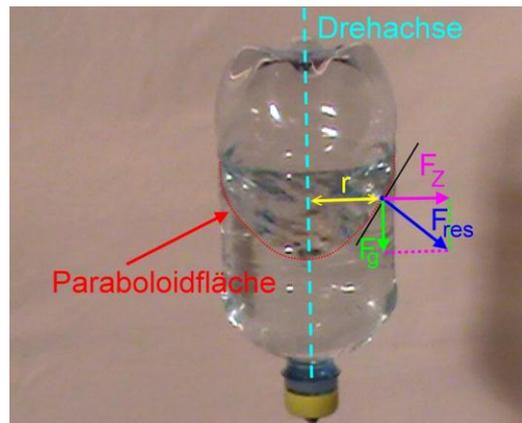


Abbildung 26: Rotationsparaboloid

Je höher die Winkelgeschwindigkeit, desto tiefer liegt der Scheitelpunkt des Rotationsparaboloids. Ist die Geschwindigkeit groß genug, so kann es passieren, dass sich der Scheitelpunkt außerhalb der Flasche befindet und in der Mitte der Flasche ein flüssigkeitsfreier Bereich entsteht.

vgl. [11, p. 349ff]

3.18 Bestimmung des Berstdrucks einer PET-Flasche

Material

- eine dünnwandige 1,5 l oder 2 l PET-Flasche
- ein Autoreifenventil (erhältlich bei Reifenhändlern)
- 10 mm Bohrer und Bohrmaschine
- ein Kompressor mit Druckanzeige
- eine große, stabile Blechdose oder Ähnliches, auf die ein Deckel geschraubt werden kann (zur Fertigung eines Schutzkäfigs)
- Gehörsschutz
- Schutzbrille
- Helm und Schutzjacke

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Verschluss der PET-Flasche wird mit dem Bohrer mittig durchbohrt. Durch das Loch wird das Autoreifenventil geschoben und in die Bohrung gedrückt, sodass es im Deckel feststeckt (siehe Abschnitt 3.65 Abbildung 103).

Den so präparierten Verschluss schraubt man auf die PET-Flasche.

Aus der Dose und ihrem Deckel wird ein Sicherheitskäfig gefertigt. Dazu bohrt man in den Deckel der Dose mittig ein Loch mit 10 mm Durchmesser. Durch dieses schiebt man das Autoventil und steckt es am Kompressor an. Daraufhin wird der Deckel auf die Dose gesetzt, sodass sich die Flasche im Inneren der Dose befindet und der Deckel wird festgeschraubt.



Abbildung 27:
Flasche im Sicherheitskäfig

Die Dose und die in ihr befindliche Flasche stellt

man nahe einer stabilen Wand auf. Der Schlauch des Kompressors wird um die Ecke der Wand gelegt, sodass die versuchsausführende Person keinen Blickkontakt zur Flasche hat.

Daraufhin wird mit dem Kompressor Luft in die Flasche gepumpt, während man beobachtet, wie die Druckanzeige nach oben steigt. Hat die Luft in der Flasche den Berstdruck der Flasche erreicht, explodiert diese mit einem lauten Knall.



Beim Pumpen von Luft in die Flasche entsteht ein extrem hoher Druck. Kommt es zur Explosion der Flasche, so fliegen Flaschenteile mit hoher Geschwindigkeit im Schutzkäfig umher und ein sehr lauter Knall ist zu hören. Da je nach Konstruktion des Schutzkäfigs dieser alle umherfliegenden Flaschenteile auffängt oder eben nicht, ist es unbedingt nötig, dass man sich bei diesem Experiment hinter einer schützenden Wand aufhält. Des weiteren muss man einen guten Gehörsschutz, eine Schutzbrille, einen Helm und ein Schutzgewand tragen.

Dieses Experiment ist nicht dazu gedacht, in der Öffentlichkeit vorgeführt zu werden! Es dient einzig der Bestimmung des Berstdrucks einer PET-Flasche. Sollten dennoch Zuschauer anwesend sein, gelten auch für diese die oben genannten Sicherheitsvorkehrungen und ein Sicherheitsabstand von mindestens 15 m ist unbedingt einzuhalten.

Physikalische Erklärung

Werden Gasmoleküle in einen abgeschlossenen Behälter gepresst, so steigt der Druck im Gefäß. Dadurch entsteht ein Druckunterschied zwischen atmosphärischen Luftdruck außerhalb des Behälters und dem Gasdruck innerhalb. Dieser Druckunterschied muss von der Wand des Gefäßes ausgeglichen werden. Wie viel Druck ein Behälter standhält, hängt neben dem Material auch von seiner Geometrie und der Wandstärke ab. Erreicht der Druck innerhalb des Gefäßes den Berstdruck, so kann die Wand des Behälters die Druckunterschiede nicht mehr ausgleichen und bricht auf.

„Der Berstdruck ist ein Fachbegriff aus der Technik. [...] Rohre, Schläuche und Behälter platzen mit Erreichen des Berstdrucks auf, Gasflaschen explodieren.“ [19]



Abbildung 28: Flasche bei ca. 9 bar



Abbildung 29: Flasche bei ca. 15 bar

Bei der Ermittlung des Berstdrucks einer PET-Flasche kann man beobachten, wie sich die PET-Flasche mit zunehmendem Druck zu verformen beginnt und schließlich explodiert. Dabei kommt es zur vollkommenen Zerstörung der Flasche.

Bemerkungen

Bei der Durchführung dieses Experiments im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurde ein Berstdruck von über 15 bar gemessen.

Das Explodieren der Flasche führte zur völligen Zerstörung des Schutzkäfigs, in dem sich die Flasche befand. Der Schutzkäfig war zuvor aus einem stabilen



Abbildung 30: Zerstörter Schutzkäfig und Flaschenteile

Drahtpapierkorb und einer 2 cm dicken Holzplatte gefertigt worden, welche mit mehreren Schrauben und Bügeln an dem Papierkorb befestigt worden war.

An der Technischen Universität Graz verwendet Herr Ao. Univ. – Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher flüssigen Stickstoff, welchen er in eine PET-Flasche füllt, dazu diese explodieren zu lassen. Flüssiger Stickstoff hat eine Temperatur von ungefähr -210 °C . Wird er in die Flasche gefüllt, so geht innerhalb von wenigen Minuten sehr viel Stickstoff von der flüssigen in die Gasphase über und die Anzahl der Gasmoleküle in der Flasche steigt drastisch an. Die damit verbundene Druckerhöhung bewirkt, dass der Berstdruck überschritten wird und die Flasche explodiert. Da dieser Versuch an der Technischen Universität Graz auch vor Publikum vorgeführt wird, wurde eine große Sauerstoff-Druckluftflasche abgesägt, in der die mit Stickstoff gefüllte Flasche explodieren kann. Die dickwandige Druckluftflasche hält der Explosion stand und Flaschenteile können nur nach oben austreten und so niemanden verletzen. Dennoch entsteht ein sehr lauter Knall und das Verschließen der Ohren mit den Händen ist unbedingt nötig. vgl. [14]

Hydro- und Aeromechanik, Akustik

3.19 Abhängigkeit der Ausfließgeschwindigkeit von der Wasserhöhe

Material

- eine PET-Flasche
- ein dünner Bohrer oder ein Nagel
- Klebeband

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In die PET-Flasche werden senkrecht übereinander drei Löcher gebohrt (das erste Loch ca. 2 cm vom Flaschenboden entfernt, das Zweite auf halber Höhe der Flasche und das Dritte mittig zwischen erstem und zweitem Loch).

Mit einem langen Streifen des Klebebands werden alle drei Löcher verschlossen. Die Flasche wird bis oben mit Wasser gefüllt. Zieht man das Klebeband in einem Zug ab, so tritt aus allen drei Löchern Wasser aus. Dabei ist zu beobachten, dass der Austrittswinkel der Wasserstrahlen bei jedem der Löcher unterschiedlich ist. Je tiefer sich ein Loch befindet, desto paralleler ist der Wasserstrahl zum Erdboden. (Abbildung 31)

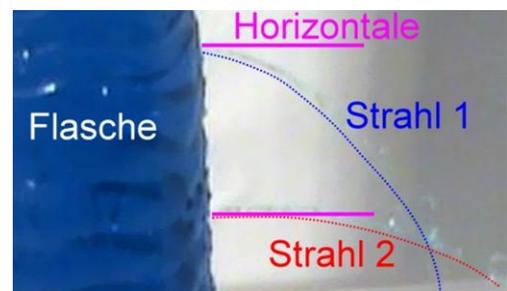


Abbildung 31:
Verschiedene Austrittswinkel der Strahlen

Physikalische Erklärung

In einer Tiefe (h) unterhalb der Oberfläche einer Flüssigkeit herrscht ein hydrostatischer Druck (p_{hyd}) von

$$p_{hyd} = \rho_{Fl}gh \quad (3.19:1)$$

(ρ_{Fl} ... Dichte der Flüssigkeit, h ... Flüssigkeitshöhe über dem betrachteten Punkt, g ... Erdbeschleunigung)

Dieser Druck bewirkt, dass bei einem lecken Gefäß Flüssigkeit aus dem Loch austritt. Nach einem von Evangelista Torricelli aufgestellten Gesetz ist die Geschwindigkeit (v_x) mit der das Wasser aus dem Leck in einem Gefäß austritt abhängig vom Druck in der Flüssigkeit und von der Dichte des Fluids.

$$v_x = \sqrt{\frac{2p}{\rho_{Fl}}} \quad (3.19:2)$$

(ρ_F ... Dichte der Flüssigkeit, v_x ... Geschwindigkeit in x-Richtung, p ... in Flüssigkeit herrschender Druck)

Ersetzt man den Druck durch den hydrostatischen Druck, so ergibt sich für die Geschwindigkeit:

$$v_x = \sqrt{2gh} \quad (3.19:3)$$

(h ... Flüssigkeitshöhe über dem betrachteten Punkt, g ... Erdbeschleunigung)

Somit ist klar, dass die aus einem tiefer gelegenen Loch in der Flasche austretenden Wassermoleküle eine höhere Geschwindigkeit in x-Richtung, also parallel zum Erdboden haben. (Abbildung 31)

vgl. [11, p. 287ff]

3.20 Entstehung eines Luftkanals in einer Flüssigkeit auf Grund der Zentrifugalkraft – der Flaschentornado

Material

- zwei PET-Flaschen
- Plastiksteckmuffe (Durchmesser 32 mm; erhältlich im Baumarkt in der Elektroinstallationsabteilung)
- 2-Komponentenklebstoff
- 10 mm Bohrer und Bohrmaschine
- Säge
- Teppichmesser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Als erstes muss ein Flaschenverbindungsstück gefertigt werden: Die Verschlüsse der beiden PET-Flaschen werden mittig mit dem 10-mm-Bohrer durchbohrt. Dann nimmt man die entstandenen Grate mit dem Teppichmesser ab. Von der Steckmuffe wird ein 3 cm langes Stück abgesägt. Mit dem 2-Komponentenkleber werden die beiden Verschlusskappen zuerst zusammen und dann in den Steckmuffenabschnitt geklebt.



Abbildung 32:
Flaschenverbindungsstück

Auf eine der beiden 1 l Flaschen wird das Flaschenverbindungsstück aufgeschraubt, während die andere Flasche zuerst mit Wasser gefüllt wird und erst danach mittels des Verbindungsstücks mit der anderen Flasche verbunden wird.

Stellt man nun die so entstandene „Doppelflasche“ mit der gefüllten Flasche oben auf eine horizontale Fläche, so bemerkt man, dass kein Wasser von oben nach unten fließt.

Nimmt man jedoch die obere Flasche und führt mit ihr ein paar Kreisbewegungen (in axialer Richtung) aus, so beginnt sich die Flüssigkeit zu drehen und in der Mitte bildet sich ein Luftkanal, sodass das Wasser in die untere Flasche fließen kann. Bis das gesamte Wasser von der oberen in die untere Flasche geronnen ist, bleiben der Luftkanal und der Wasserwirbel bestehen.

Physikalische Erklärung

Damit Wasser aus der oberen in die untere Flasche fließen kann, muss gleichzeitig Luft von der unteren in die obere Flasche gelangen. Stellt man nun die Anordnung auf eine horizontale Fläche, so genügt bei 10 mm Durchmesser des Verbindungskanals die Oberflächenspannung des Wassers um einen Austausch von Gas und Flüssigkeit zu verhindern. (siehe auch Abschnitt 3.24)

Versetzt man nun die Flasche in Rotation, so wird auch die in ihr befindliche Flüssigkeit durch Adhäsion und Reibung in Bewegung versetzt. Durch die Zentrifugalkraft werden die Wassermoleküle an die Flaschenwand

gedrückt und mittig entsteht ein flüssigkeitsfreier, in der Form einem Tornado sehr ähnlicher, Bereich, durch den Luft nach oben gelangen kann. Da nun der Luft-Wasser-Austausch ermöglicht ist, fließt das Wasser nach unten, wobei es, noch immer von der Zentrifugalkraft beeinflusst, an der Wand der unteren Flasche spiralförmig nach unten rinnt.

Bemerkungen

Sollte man nicht die Zeit haben ein Flaschenverbindungsstück selbst zu fertigen, kann man dieses auch im Internet unter dem Begriff „Vortex Bottle Connector“ finden und bestellen.

Das Experiment ist aber auch mit nur einer Flasche durchführbar (siehe Abschnitt 3.21)

vgl. [20, p. 89f], [21]



Abbildung 33: Flaschentornado

3.21 Erhöhung der Ausströmgeschwindigkeit durch einen kontinuierlichen Luft-Wasser-Austausch

Material

- ein oder zwei leere Flaschen

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Eine Flasche wird mit Wasser gefüllt und anschließend auf den Kopf gestellt. Da, anders als beim Flaschentornado (siehe Abschnitt 3.19), die Oberflächenspannung des Wassers bei den üblichen Flaschenhalsdurchmessern nicht ausreicht, um eine Wassermembran auszubilden, beginnt die Flüssigkeit stoßweise auszuströmen.

Versetzt man nun die Flasche in axialer Richtung in Rotation, bildet sich ein, in seiner Form einem Tornado ähnlicher, Luftkanal aus und das Wasser fließt in einem kontinuierlichen Strom ab. Diese Methode eine Flasche zu entleeren ist erheblich schneller, als sie einfach nur auf den Kopf zu stellen. Das kann man leicht

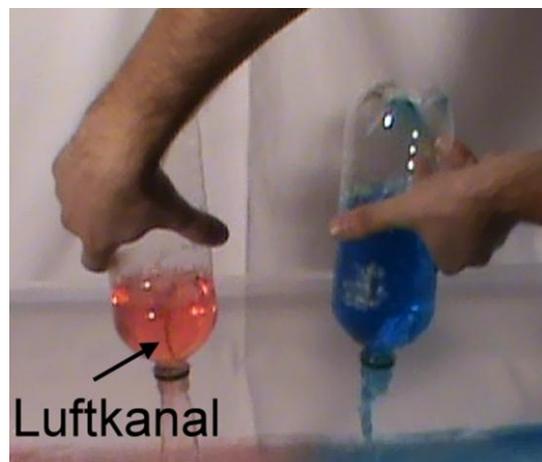


Abbildung 34:

Vergleich der Ausströmgeschwindigkeiten

befüllt und dann gleichzeitig umdreht. Daraufhin versetzt man die Flüssigkeit in einer der Flaschen in Rotation, sodass sich ein Wirbel ausbildet. Diese Flasche wird erheblich schneller leer sein als die andere (Abbildung 34).

Physikalische Erklärung

Die Erklärung für das Ausbilden des Luftkanals ist identisch mit jener im Abschnitt 3.19.

Der Umstand, dass eine in Rotation versetzte Flüssigkeit schneller ausläuft, lässt sich dadurch erklären, dass beim reinen Umdrehen die durch den Flaschenhals aufsteigenden Luftblasen das Ausströmen des Wassers kurzfristig verhindern und es dadurch nur zu einem schubweisen Ausrinnen kommt. Hingegen kann das Wasser durch den durch Rotation entstandenen Wirbel und den Luftkanal in der Mitte kontinuierlich abfließen. vgl. [11, p. 353f]

3.22 Wasser-Luft-Austausch beim Entleeren einer Flasche und allseitige Gleichheit des Drucks in Flüssigkeiten

Material

- eine PET-Flasche
- 5 mm Bohrer und Bohrmaschine oder ein Nagel
- Klebeband
- Teppichmesser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In eine PET-Flasche werden, mit dem Bohrer oder einem Nagel, ungefähr 2,5 cm vom Flaschenboden entfernt, 5-6 kleine Löcher gemacht. Mit dem Teppichmesser werden etwaige Grate abgenommen. Daraufhin verklebt man die Löcher mit einem Klebestreifen und befüllt die Flasche bis obenhin mit Wasser. Dann wird die Flasche verschlossen und der Klebestreifen wieder entfernt.

Überraschenderweise rinnt, wenn die Flasche eben steht und nicht zusammengedrückt wird, keine Flüssigkeit aus den Löchern (Abbildung 35). Öffnet man jedoch den Flaschendeckel, so tritt aus jedem der Löcher ein Flüssigkeitsstrahl aus (Abbildung 36).

Steht die Flasche auf einer ebenen Oberfläche und wird dann der Deckel abgeschraubt, so beobachtet man, dass die Flüssigkeitsstrahlen aus allen Löchern die gleiche Länge haben. Anders gesagt: Stellt man die Flasche auf eine waagrechte Oberfläche und entfernt den Verschluss, so liegen die durch die Flüssigkeit erzeugten nassen Stellen auf einem Kreis.

Physikalische Erklärung

Von einem löchrigen Gefäß würde man erwarten, dass darin befindliches Wasser austritt. Würde das aber geschehen, ohne dass gleichzeitig Luft in die Flasche gelangt, würde sich in der Flasche ein Vakuum bilden. Daher ist es für das Ausfließen einer Flüssigkeit nötig, dass gleichzeitig auch Luftmoleküle in das Gefäß gelangen. Da aber in diesem Experiment die Löcher in der Flasche ziemlich klein sind, bildet das Wasser



Abbildung 35:
Löchrige Flasche

durch die Oberflächenspannung Wassermembranen aus, die verhindern, dass Luft durch diese in die Flasche gelangen kann. Daher ist kein Wasser-Luft-Austausch möglich und das Wasser bleibt in der Flasche.

Schraubt man nun aber den Flaschendeckel ab, so gelangt Luft durch den Flaschenhals in das Gefäß und das Wasser kann durch die Löcher austreten, da das durch das ausfließende Wasser entstandene Vakuum in der Flasche mit Luftmolekülen gefüllt wird.

Die Länge der aus den Löchern austretenden Flüssigkeitsstrahlen hängt vom Druck in der Flüssigkeit ab. Je höher der Druck ist, umso länger sind die Strahlen (siehe Abschnitt 3.19) Dass jeder Flüssigkeitsstrahl die gleiche Länge hat, liegt an der isotropen Druckverteilung in Flüssigkeiten. In einer bestimmten Wassertiefe herrscht also in alle Richtungen der gleiche Druck.

vgl. [22, p. 270ff], [23, p. 181]



Abbildung 36:
Löchrige Flasche unverschlossen

3.23 Verringerung der Oberflächenspannung

Material

- zwei Glasfläschchen mit kleiner Öffnung (Öffnungsdurchmesser max. 10 mm)
- Spülmittel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Eines der beiden Fläschchen wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt. In das Zweite gibt man einen Tropfen Spülmittel und füllt es dann auch bis zum Rand voll mit Wasser.

Dreht man das mit reinem Wasser befüllte Fläschchen auf den Kopf, so rinnen ein paar Tropfen aus, aber der Großteil der Flüssigkeit bleibt im Fläschchen. Stellt man hingegen das Fläschchen auf den Kopf, welches mit Spülmittel versetztem Wasser befüllt ist, so rinnt die gesamte Flüssigkeit aus dem Gefäß. vgl. [24]

Physikalische Erklärung

Dreht man das mit Wasser gefüllte Fläschchen um, so dringt während der Drehbewegung etwas Luft in das Fläschchen ein und gelangt zum Flaschenboden. Beim weiteren Auslaufen von Flüssigkeit vergrößert sich das Volumen der in der Flasche befindlichen Luft, wodurch der Gasdruck in der Flasche geringer wird. Durch die Oberflächenspannung des Wassers bildet sich an der Flaschenöffnung eine Wassermembran aus, die verhindert, dass weitere Luft in das Fläschchen gelangt. An der Flaschenöffnung herrscht ein Druck, der sich aus dem hydrostatischen Druck der Wassersäule in der Flasche und dem Druck der im Fläschchen befindlichen Luft zusammensetzt. Je mehr Flüssigkeit ausläuft, umso geringer wird dieser Druck. Hat sich der Druck auf ein Maß reduziert, dass er gleich groß oder kleiner ist als der atmosphärische Luftdruck, so fließt kein Wasser mehr aus.

Spülmittel enthält Tenside, also „Substanzen, die die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit herabsetzen“ [25]. Im Fall der Versuchsausführung mit Wasser, welches mit Spülmittel versetzt wurde, reicht die Oberflächenspannung aufgrund der Tenside nicht aus um an der Öffnung des Fläschchens eine Wassermembran zu bilden. Dadurch kann während des gesamten Versuchablaufs Luft in das Fläschchen gelangen, wodurch der Gasdruck im Gefäß immer gleich dem äußeren Luftdruck ist und die Schwerkraft bewirkt, dass das Wasser aus der Flaschenöffnung fließt.

3.24 Luft nimmt ein Volumen ein

Material

- eine Glasflasche
- ein passender Flaschenkorken
- ein Trichter (nicht zu weite Trichtertülle)
- Bohrer (etwas kleiner als der Trichtertüllendurchmesser) und Bohrmaschine
- ein Trinkhalm (muss durch die Trichtertülle passen)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Flaschenkorken wird mittig durchbohrt und der Trichter wird fest in die Bohrung gepresst, sodass zwischen Korken und Trichter keine Luft mehr entweichen kann. Der Korken wird nun in den Flaschenhals gesteckt.

Füllt man Wasser in den Trichter, so rinnt nur zu Beginn etwas Flüssigkeit in die Flasche, später aber gelangt keine Flüssigkeit mehr durch den Trichter.

Nimmt man dann den Trinkhalm und führt ihn durch den Trichter in die Flasche, so gelangt wieder Wasser aus dem Trichter in die Flasche.



Abbildung 37: Wasser kann nicht in die Flasche rinnen

Physikalische Erklärung

Da Luft, wie jedes Gas, ein Volumen einnimmt, muss, damit ein scheinbar „leeres“ Gefäß mit einer Flüssigkeit gefüllt werden kann, gleichzeitig Luft aus dem Gefäß austreten.

In diesem Experiment kann die Luft nur durch die Trichtertülle aus der Flasche entweichen. In der Trichtertülle befindet sich aber das in den Trichter gegossene Wasser. Durch die Oberflächenspannung bildet sich an der Unterseite der Trichtertülle eine Wassermembran, die verhindert, dass die Luft aus der Flasche entweichen kann, wodurch auch kein Wasser in die Flasche fließen kann.

Führt man den Strohhalm durch den Trichter in die Flasche, so hat die Luft die Möglichkeit durch den Trinkhalm auszutreten, während gleichzeitig rund um den Strohhalm Wasser in die Flasche fließt. vgl. [11, p. 414f]

Bemerkungen

Damit dieses Experiment gelingt ist es wichtig, dass der Durchmesser der Trichtertülle nicht zu groß ist, da ansonsten die durch die Oberflächenspannung gebildete Wassermembran nicht ausreicht um den Austausch von Luft und Flüssigkeit zu verhindern.

3.25 Luft nimmt ein Volumen ein – ein Modell einer Taucherglocke

Material

- eine PET-Flasche
- ein Teppichmesser
- ein durchsichtiger Kübel oder eine durchsichtige Wanne

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Mit dem Teppichmesser wird das obere Drittel der PET-Flasche abgeschnitten, sodass ein zylinderförmiges Flaschenstück übrig bleibt. Den Kübel füllt man zu zwei Dritteln mit Wasser.

Der Verschluss der Flasche wird mit dem Gewinde nach oben auf die Wasseroberfläche gelegt und der Zylinder über den Deckel gestülpt. Drückt man den Zylinder unter Wasser, so steigt nur wenig Flüssigkeit in das Gefäß und im Bereich der abgeschnittenen Flasche sinkt der Wasserspiegel unter das Niveau der restlichen



Abbildung 38:
Luft verdrängt das Wasser

Flüssigkeit. Das ist gut zusehen, da der Flaschenverschluss auf der nach unten gedrückt Wasseroberfläche schwimmt und so den Wasserstand in der Flasche anzeigt.

vgl. [26, p. 102]

Physikalische Erklärung

Zu Beginn des Experiments scheint es so, als wäre der aus der Flasche hergestellte Zylinder leer. Tatsächlich ist er aber mit Luft gefüllt. Stülpt man den Zylinder über den Flaschenverschluss und drückt ihn nach unten, so dringt etwas Wasser in den Zylinder ein und komprimiert die Luft, wodurch sich der Druck des Gases in der Flasche erhöht. Ist der Gasdruck im Zylinder gleich groß wie der hydrostatische Druck des Wassers an der Unterseite des Zylinders, dringt kein Wasser mehr in das Gefäß ein.

Mit dem Flüssigkeitsspiegel unterhalb des Zylinders sinkt auch der auf ihm schwimmende Flaschendeckel nach unten.

Bemerkungen

Nach dem in diesem Versuch vorgestellten Prinzip funktionieren auch offene Taucherglocken. Bei einer solchen befindet sich ein Mensch unter einem an der Unterseite geöffneten Gefäß und atmet die im Gefäß befindliche Luft, während er sich am Grund eines Gewässers aufhält.

Eine solche Tauchvorrichtung wurde schon in der Antike von Aristoteles beschrieben, aber auch heute finden Taucherglocken noch Anwendung. Natürlich wurden im Lauf der Zeit Verbesserungen gefunden und so gibt es beispielsweise Modelle, welche mit Frischluft versorgt werden und dadurch längere Tauchgänge ermöglichen.

vgl. [27]



Abbildung 39: Taucherglocke [27]

3.26 Schwimmen, schweben, sinken – ein Modell eines U-Boots

Material

- 1,5 l PET-Flasche (möglichst zylindrische Form)
- ein Strohhalm (mit Knickstelle)
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall) oder 2-Komponentenklebstoff und Plastilin
- ein ca. 1 m langes Schlauchstück (Innendurchmesser 6 mm)
- 6 mm Bohrer, 4 mm Bohrer und Bohrmaschine
- Schere
- ca. 1,3 kg Kieselsteine

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In die Wand der PET-Flasche werden auf halber Höhe und auf der gegenüberliegenden Seite der Flasche zwei Löcher gebohrt. Eines der Löcher hat einen Durchmesser von 6 mm, das andere einen von 4 mm.

Der kürzere Teil des Strohhalms wird ca. 0,5 cm von der Knickstelle entfernt mit der Schere abgeschnitten. Der Knick wird im 90°-Winkel gebogen und das kurze Ende

wird durch das kleinere Loch (4 mm) in die Flasche gesteckt. Um den Trinkhalm festzukleben und die Verbindungsstelle abzudichten, wird 2-Komponenten-Knetmasse verwendet. Hat man kein Kaltmetall zur Verfügung, kann man zuerst den Strohhalm und die Flasche mit 2-Komponentenklebstoff oder Sekundenkleber verbinden und dann Plastilin



Abbildung 40: Aufbau des U-Boot-Modells

verwenden, um die Verbindung abzudichten.

Durch das zweite Loch schiebt man ca. 1 – 1,5 cm des Schlauchs und zur Befestigung und Abdichtung wird wieder 2-Komponenten-Knetmasse benutzt.

Nachdem das Kaltmetall ausgehärtet ist, füllt man die Kieselsteine in die Flasche und verschließt diese.

Die Flasche wird waagrecht so gehalten, dass der Strohhalm sich an der Unterseite befindet. Sie wird leicht geschüttelt, sodass die Kieselsteine eine ebene, zum Boden parallele, Fläche bilden. Die so vorbereitete Flasche wird in ein mit Wasser befülltes Becken gelegt.

Saugt man am Schlauch, so sinkt die Flasche. Ist die Flasche gesunken und man bläst in den Schlauch, so beginnt die Flasche wieder zu schwimmen (Abbildung 41).



Abbildung 41: U-Boot während des Aufsteigens

vgl. [28, p. 14]

Physikalische Erklärung

Ob ein Körper in einer Flüssigkeit schwimmt oder nicht, hängt davon ab, ob die Auftriebskraft (F_A), die auf den Körper wirkt, größer ist als das Gewicht (F_g) des Körpers oder nicht. Man kann drei Fälle unterscheiden:

- $F_A > F_g$: Ein untergetauchter Körper steigt auf und **schwimmt** dann an der Oberfläche der Flüssigkeit
- $F_A = F_g$: Der Körper taucht vollständig in die Flüssigkeit ein und **schwebt** (steigt weder auf, noch sinkt er ab)
- $F_A < F_g$: Der Körper **sinkt** bis zum Boden

Die Auftriebskraft ist betragsmäßig gleich groß, wie die Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit (archimedisches Prinzip). Man kann den Auftrieb, den ein Objekt erfährt, mittels folgender Formel berechnen:

$$F_A = V_{Fl} \rho_{Fl} g = m_{Fl} g \quad (3.26:1)$$

(V_{Fl} ... verdrängtes Volumen, ρ_{Fl} ... Dichte der Flüssigkeit, m_{Fl} ... Masse der verdrängten Flüssigkeit, g ... Erdbeschleunigung)

Das Gewicht eines Körpers berechnet sich mittels:

$$F_g = V_K \rho_K g = m_K g \quad (3.26:2)$$

(V_K ... Volumen des Körpers, ρ_K ... Dichte des Körpers, m_K ... Masse des Körpers)

Vergleicht man nun die Formeln (3.26:1) und (3.26:2), so erkennt man, dass bei vollständig eingetauchtem Körper ($V_{Fl} = V_K$) das einzige Unterscheidungsmerkmal die unterschiedlichen Dichten sind. Somit gilt also für schwimmende Körper $\rho_W > \rho_K$, für schwebende $\rho_W = \rho_K$ und für sinkende $\rho_W < \rho_K$.

Beim oben beschriebenen Ablauf des Experiments passiert nun Folgendes:

Saugt man am Schlauch, so entsteht ein Unterdruck in der Flasche. Deswegen gelangt durch den Strohhalm Wasser in die Flasche, wodurch sich die Masse und damit auch die Dichte des Körpers (Flasche samt Kieselsteinen und Wasser) erhöht. Ist das Gewicht der Flasche größer als ihr Auftrieb, sinkt sie.

Befindet sich die Flasche am Boden des Flüssigkeitsbehälters, ist die Gewichtskraft der Flasche größer als der auf sie wirkende Auftrieb. Bläst man nun Luft in die Flasche, so wird Wasser aus der Flasche verdrängt. Die Dichte des Körpers und damit auch die Gewichtskraft wird geringer. Da die Flasche aber ihre Form und somit auch ihr Volumen nicht verändert, bleibt der Auftrieb der gleiche. Hat man genug Flüssigkeit aus der Flasche verdrängt, ist der Auftrieb größer als die Gewichtskraft und die Flasche steigt auf.

vgl. [29, p. 154],

Bemerkungen

Der oben beschriebene Versuch stellt ein Modell dar, wie ein U-Boot abtaucht, sich in einer konstanten Tiefe hält und wieder auftaucht.

In realen U-Booten gibt es sogenannte Tauchzellen. In diese wird, um abzutauchen, Wasser durch Flutventile (im Experiment ist das der Strohhalm) eingelassen. Um aufzutauchen, wird mit Druckluft das Wasser wieder aus den Tauchzellen verdrängt. Befindet sich ein U-Boot in Tauchfahrt (Fortbewegung in gleichbleibender Wassertiefe), so befindet sich genau soviel Wasser in den Tauchzellen, dass das U-Boot schwebt.

vgl. [30], [31]

Im oben beschriebenen Versuch wurde, um das U-Boot sinken bzw. aufsteigen zu lassen, die Masse des zu beobachtenden Körpers verändert. Im Falle des kartesischen Tauchers (siehe Abschnitt 3.27) geschieht das, indem das vom Körper verdrängte Volumen variiert wird.

3.27 Schwimmen, schweben, sinken – der kartesianische Taucher

Material

- eine PET-Flasche
- eine leere Parfum-Probeampulle
- ein Strohhalm (mit Knickstelle)
- Schere
- eine Büroklammer
- Knetmasse

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten einen kartesianischen Taucher zu realisieren. Im Folgenden werden zwei Varianten dargestellt.

- a) Eine PET-Flasche wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt. Die leere Parfum-Probeampulle wird, ohne Verschluss, mit der Öffnung nach unten in die Flasche gegeben. Dann wird die Flasche verschlossen. Drückt man von außen mit ein oder zwei Händen gegen den Flaschenkörper so sinkt die Ampulle zu Boden. Durch Variieren des Drucks kann man erreichen, dass die Ampulle in einer konstanten Höhe schwebt.
- b) Der Strohhalm wird abgeknickt, sodass die Strohhalmenden nebeneinanderzuliegen kommen. Das längere Ende des Strohhalms wird mit der Schere so gekürzt, dass beidseitig der Knickstelle ein gleichlanges Stück übrig bleibt. Die beiden Drahtenden der Büroklammer werden jeweils in eines der Strohhalmenden gesteckt und mit Knetmasse wird eines der Trinkhalmenden verschlossen. (Abbildung 42)

Dieser Taucher wird wieder in eine bis zum Rand mit Wasser gefüllte PET-Flasche gesteckt, der Deckel verschlossen und durch Drücken kann ein Absinken bzw. Schweben des Tauchers erreicht werden.

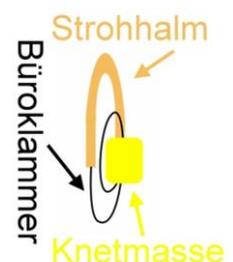


Abbildung 42:
Taucher Variante b)

Physikalische Erklärung

Ob ein Körper schwimmt, schwebt oder sinkt hängt davon ab, ob die Auftriebskraft, die auf den Körper wirkt größer, gleich oder kleiner ist als das Gewicht des Körpers. Nach dem archimedischen Prinzip ist die Auftriebskraft betragsmäßig gleich groß, wie die Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit. (siehe auch Abschnitt 3.26)

In den Fällen der beiden betrachteten kartesianischen Taucher befindet sich im Inneren der Körper Luft. Übt man nun von außen Druck auf die Flaschen aus, so wird Wasser in die Taucher gedrückt und die Luft in den Tauchern komprimiert. Deshalb verdrängen sie weniger Flüssigkeit und die Auftriebskraft wird geringer, während das Gewicht das gleiche bleibt. Dadurch verändert sich das Verhältnis von Auftrieb und Gewichtskraft und der Taucher sinkt ab oder schwebt im Wasser.

vgl. [11, p. 260f], [32]

Bemerkungen

Wenn Fische schwimmen oder tauchen, so variieren sie auch ihr Volumen, indem sie ihre Schwimmblase vergrößern oder verkleinern und so den auf sie wirkenden Auftrieb verändern.

Im Falle des Abtauchens oder Aufsteigens eines Unterseeboots wird nicht der Auftrieb verändert, sondern das Gewicht des Unterseeboots variiert. (siehe Abschnitt 3.26)



Abbildung 43: Kartesianische Taucher

3.28 Schwimmen, schweben, sinken in Flüssigkeiten verschiedener Dichte

Material

- drei große PET-Flaschen
- drei Eier (am besten gefärbt)
- Salz
- Löffel
- Teppichmesser
- Papier
- Schere

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Von den drei PET-Flaschen wird mit dem Teppichmesser das obere Ende so abgeschnitten, dass drei gleich hohe Zylinder entstehen. Einer der Zylinder wird mit Wasser gefüllt und ein Ei ins Wasser gegeben. Man beobachtet, dass dieses Ei zum Boden absinkt (Abbildung 44 blaues Ei).



Abbildung 44: Flüssigkeiten verschiedener Dichte

Den zweiten Zylinder füllt man ebenfalls mit Wasser, gibt aber, bevor man das Ei ins Wasser legt, mehrere gehäufte Esslöffel Salz hinzu und rührt um, bis sich das Salz vollständig aufgelöst hat. Wurde dem Wasser genügend Salz beigefügt, schwimmt das Ei an der Oberfläche (Abbildung 44 grünes Ei) wenn man es in die Flüssigkeit gibt. Sollte das nicht der Fall sein, muss man das Ei mit dem Löffel aus dem Zylinder holen und den Salzgehalt des Wassers erhöhen.

Der dritte Zylinder wird nur bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt und es wird wieder Salz eingerührt, sodass das Ei an der Oberfläche schwimmt. Dann schneidet man aus Papier eine Kreisfläche aus, die denselben Durchmesser wie die Flasche hat. Diese Kreisscheibe legt man vorsichtig auf die Wasseroberfläche und schüttet langsam Wasser auf das Papier. Während sich der Zylinder zusehends mit Wasser füllt, steigt

das Papier an die Wasseroberfläche und kann nach dem vollständigen Befüllen des Zylinders entnommen werden. Auf diese Weise gelingt es, dass sich zwei Wasserschichten innerhalb des Zylinders bilden (unten Salzwasser und oben Trinkwasser). Gibt man dann das Ei in die Flüssigkeit, so sinkt es bis zur Grenzschicht ab und bleibt dann auf dieser Höhe (Abbildung 44 rotes Ei).

vgl. [26, p. 42]

Physikalische Erklärung

Ob ein Körper in einer Flüssigkeit schwimmt, schwebt oder sinkt, hängt davon ab, ob die Dichte des Körpers geringer, gleich oder größer als die Dichte der Flüssigkeit ist, wie bereits in den Abschnitten 3.26 und 3.27 erläutert wurde.

Die Dichte eines Eies ist größer als jene von gewöhnlichem Trinkwasser, weshalb das Ei im mit reinem Wasser gefüllten Zylinder zu Boden sinkt (Abbildung 44 blaues Ei).

Salzwasser hat je nach Salzgehalt verschiedene Dichten, immer aber eine größere als Süßwasser. Wurde genügend Salz in Wasser aufgelöst, so ist die Dichte der Flüssigkeit größer als die des Eies und das Ei schwimmt an der Oberfläche (Abbildung 44 grünes Ei).

Im letzten Fall liegt eine Schichtung von Wasser verschiedener Dichten vor. Das unten befindliche Salzwasser hat eine größere Dichte, als das darüber liegende Trinkwasser. Wird das Ei in den Zylinder gegeben, sinkt es aufgrund seiner größeren Dichte durch das Trinkwasser nach unten. An der Grenzschicht trifft das Ei auf das Salzwasser, welches eine größere Dichte als das Ei hat, weshalb dieses im Salzwasser schwimmt.

Für den Beobachter scheint es als würde das Ei im Wasser schweben, was natürlich nicht stimmt.

3.29 Schwimmen eines Körpers an einer Grenzschicht

Material

- eine Flasche mit breitem Flaschenhals
- ein Flaschendeckel einer gewöhnlichen Flasche (aus Plastik)
- farbloses Paraffinöl (erhältlich in Baumärkten)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Flasche wird zu gleichen Teilen mit Wasser und Paraffin befüllt.

Lässt man den Flaschendeckel mit dem Gewinde nach oben in die Flasche fallen, so sinkt er durch das Paraffin bis zur Wasser-Öl-Grenzschicht und schwimmt auf Höhe dieser.

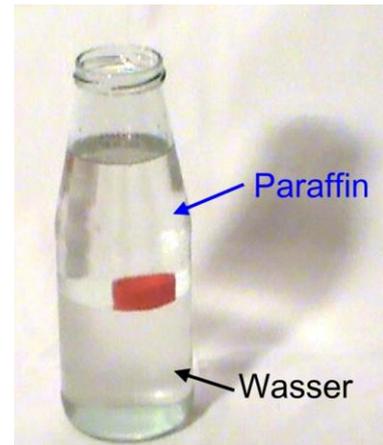


Abbildung 45: Verschluss auf Höhe der Grenzschicht

Physikalische Erklärung

Wasser und Paraffin sind zwei farblose Flüssigkeiten, welche sich nicht mischen lassen. Da Paraffin eine geringere Dichte als Wasser hat, bilden sich in der Flasche eine Paraffin- (oben) und eine Wasserschicht (unten). (siehe Abschnitt 3.30) Zwischen diesen beiden Flüssigkeiten bildet sich eine Grenzschicht aus, was man auch an den dort auftretenden Lichtreflexionen erkennen kann.

Flaschenverschlusskappen aus Plastik schwimmen, wenn sie mit dem Gewinde nach oben auf eine Wasserfläche gelegt werden. Aufgrund der geringen Dichte von Paraffin sinken sie aber in dieser Flüssigkeit.

Wirft man den Flaschendeckel in die Flasche, so sinkt er also durch das Paraffinöl nach unten ab, bis er das Wasser erreicht. Im Wasser erfährt der Verschluss einen so großen Auftrieb, dass er nicht mehr weiter untergeht.

Da Wasser und Paraffin aus größerer Entfernung nur schwer zu unterscheiden sind, könnte man vermuten, dass der Deckel in der Flüssigkeit schwebt. Wie zuvor erläutert, ist das aber nicht der Fall.

Bemerkungen

Werden Flaschendeckel unter Wasser getaucht, so gehen sie unter. Daher ist es auch möglich, mit einem Stift oder Ähnlichem den an der Grenzschicht schwimmenden Flaschendeckel nach unten zu drücken, sodass er sich mit Wasser füllt. In diesem Fall sinkt er zu Boden. Wirft man dann einen zweiten Flaschendeckel in die Flüssigkeit, hat das einen überraschenden Effekt.

Anstelle des Paraffinöls ist es auch möglich Pflanzenöl zu verwenden. Dadurch wird die Grenzschicht besser sichtbar, aber der Überraschungseffekt beim Hineinwerfen des Flaschendeckels ist geringer.

3.30 Auftrieb einer Flüssigkeit geringerer Dichte in einer Flüssigkeit höherer Dichte

Material

- zwei gleiche Glasflaschen mit breiter Öffnung (eventuell Milchflaschen)
- Pflanzenöl
- Lebensmittel- oder Ostereierfarbe
- ein Stück Karton

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die eine der Glasflaschen wird bis zum Rand mit Öl befüllt, die Zweite mit kaltem mit Lebensmittelfarbe eingefärbtem Wasser. Auf die mit Wasser gefüllte Flasche wird das Kartonstück gelegt und mit einer Hand festgehalten. Mit der zweiten Hand umfasst man die Flasche, dreht sie auf den Kopf und stellt sie mit dem Karton auf die mit Öl befüllte Flasche.

Zieht man den Karton zwischen den Flaschen weg, so steigen Öltropfen von der unteren in die obere Flasche, während von der oberen Flasche Wassertropfen in die untere gelangen.

Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis sich alles Wasser in der unteren und alles Öl in der oberen Flasche befindet.

Physikalische Erklärung

Öl und Wasser lassen sich nicht vermischen und bilden daher verschiedene Phasen. Da Öl eine geringere Dichte als Wasser hat, erfährt es nach dem Archimedischen Prinzip in Wasser einen Auftrieb. Dieser Auftrieb verursacht, dass das Öl von der unteren Flasche in die obere gelangt. Dabei verdrängt das aufsteigende Öl Wasser aus der oberen Flasche, welches in die untere absinkt.

Der Flüssigkeitsaustausch vollzieht sich nur innerhalb der Flaschen und keine Flüssigkeit tritt aus dem Spalt zwischen den beiden Gefäßen. Das liegt daran, dass der Spalt zwischen den beiden Flaschenöffnungen sehr klein ist und die Oberflächenspannung verhindert, dass Flüssigkeit durch den Spalt nach außen dringt.

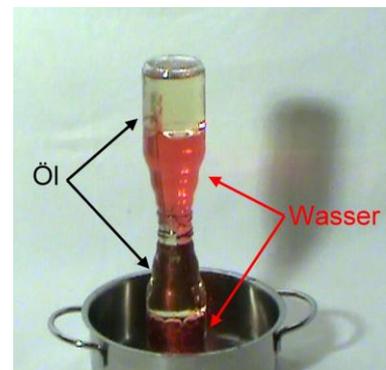


Abbildung 46: Aufsteigen des Öls

3.31 Erhöhung des Auftriebs von Rosinen durch Anheften von Kohlendioxidbläschen

Material

- eine Flasche kohlendioxidhaltiges Mineralwasser
- Rosinen

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Mineralwasserflasche wird geöffnet und die Rosinen in das Wasser geworfen. Die Rosinen sinken zu Boden und bleiben dort kurze Zeit liegen. Dann kann man beobachten, wie die Rosinen aufzusteigen beginnen. Haben sie die Wasseroberfläche erreicht, so sinken sie wieder zum Grund der Flasche.

Dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals.

Physikalische Erklärung

Im Mineralwasser befindet sich gelöstes Kohlendioxid. Werden die Rosinen in das Wasser geworfen, so sinken diese, da sie eine größere Dichte haben als Wasser, zum Boden der Flasche. Dort angelangt bleiben sie so lang liegen, bis sich genug Kohlendioxidbläschen, welche sich aus dem kohlendioxidhaltigen Wasser lösen, an ihnen angeheftet haben.

Die Kombination aus Rosinen und Kohlendioxidbläschen hat dann eine geringere Dichte als das Wasser, weshalb die Rosinen aufsteigen.

An der Oberfläche angelangt platzen die Kohlendioxidbläschen und geben das Kohlendioxid an die Luft ab. Das Gewicht der Rosinen ist wieder größer als der auf sie wirkende Auftrieb und sie sinken wieder nach unten. Am Flaschenboden angekommen können sich erneut Bläschen an die Rosinen anheften und sie steigen wieder auf.

vgl. [33, p. 55ff]



Abbildung 47: Rosine beim Aufsteigen

3.32 Aufsteigen von Wassertropfen in Öl

Material

- eine große PET-Flasche
- Pflanzenöl
- Lebensmittel- oder Ostereierfarbe
- Brausetabletten

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In die PET-Flasche wird ungefähr $\frac{1}{4}$ l mit Lebensmittelfarbe gefärbtes Wasser gegeben. Daraufhin füllt man die Flasche mit dem Pflanzenöl bis ca. 10 cm unter der Flaschenöffnung auf.

Zerbricht man eine Brausetablette und wirft die Teile in die Flasche, so gleiten die Stücke durch das Öl zu Boden und beginnen sich im Wasser aufzulösen. Nach kurzer Zeit steigen Wasserkugeln auf, die sich durch das Öl zur Oberfläche bewegen und dann wieder absinken.

Physikalische Erklärung

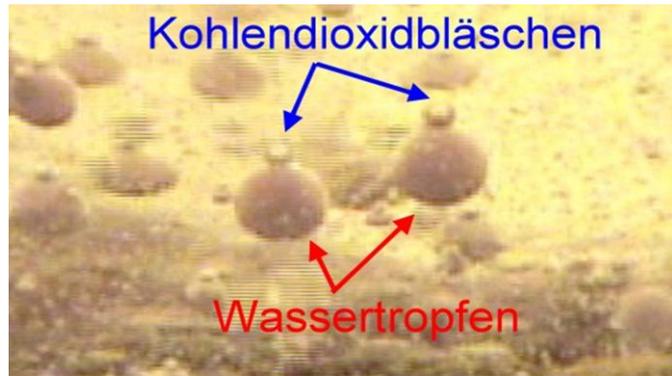
Öl und Wasser haben unterschiedliche Dichten, weshalb sich das Wasser am Flaschenboden sammelt. Wirft man eine Brausetablette in die Flasche, so gleitet sie durch das Öl langsam nach unten, reagiert aber nicht damit. Kommt die Brausetablette mit dem Wasser in Kontakt, so beginnt sie sich aufzulösen und während der chemischen Reaktion wird Kohlendioxid frei.

Kohlendioxidbläschen haben eine viel geringere Dichte als Wasser und Öl, weshalb sie in beiden Flüssigkeiten aufsteigen. Während des Aufsteigens in der Wasserschicht heften sich Kohlendioxidbläschen an Wassertropfen an und „reißen“ kleine „Wasserbälle“ aus der Wasseroberfläche (Abbildung 49). Die Kombination aus einem Wassertropfen und an diesem Tropfen anhaftenden Kohlendioxidbläschen hat eine geringere Dichte als Öl, weshalb der Wassertropfen zur Oberfläche des Öls aufsteigt. Dort angelangt platzen die Kohlendioxidbläschen und das Kohlendioxid vermischt



Abbildung 48: Auf- und absteigende Wassertropfen

sich mit der Luft. Da das auftriebsverursachende Kohlendioxidbläschen nicht mehr vorhanden ist, ist die Dichte des Wassertropfens größer als jene des Öls und er gleitet, durch die Viskosität des Öls gebremst, wieder in Richtung Flaschenboden.



Von Zeit zu Zeit kann es vorkommen, dass sich an ein im

Abbildung 49: Kohlendioxid haftet an Wassertropfen

Absteigen befindliches Wassertröpfchen ein aufsteigendes Kohlendioxidbläschen anheftet und den Wassertropfen wieder mit nach oben nimmt.

vgl. [33, p. 132ff]

3.33 Heronscher Brunnen

Material

- drei PET-Flaschen mit breitem Flaschenhals und flachem Boden
- 2-Komponentenklebstoff
- 5 mm Bohrer und Bohrmaschine
- Schere
- sehr lange Trinkhalme (90 cm lang)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Abbildung 50 zeigt das Modell eines Heronschen Brunnens. Um diese Anordnung zu erhalten, werden zwei Flaschenkappen an der flachen Seite aneinander geklebt (Verbindung 1). Daraufhin werden die so verbundenen Verschlüsse zweimal, nicht mittig, durchbohrt. Den dritten Deckel klebt man zentral auf den Boden einer der Flaschen (Flasche 2). Die Strohhalm werden so gekürzt, dass einer etwas länger als zwei aneinandergelagte Flaschen ist (Strohhalm 3), einer etwas länger als eine Flasche ist (Strohhalm 1) und einer etwas kürzer als eineinhalb Flaschenlängen ist (Strohhalm 2).

Da Strohhalm 3 senkrecht durch zwei Bohrungen verlaufen soll, ist es notwendig, dass man ein Reststück eines Strohhalms durch die Bohrung für Strohhalm 3 in die Verbindung 1 steckt und die Flasche 2 in Verbindung 1 einschraubt. Nun wird bei Verbindung 2 jene Stelle markiert, an der Strohhalm 3 diese durchstoßen wird. Daraufhin durchbohrt man Verbindung 2 einmal mittig und einmal an der markierten Stelle. Im Anschluss daran werden die zuvor zugeschnittenen Strohhalm laut Abbildung 50 in die Verbindungsstücke gesteckt und dort angeklebt. Dabei sollten in einem ersten

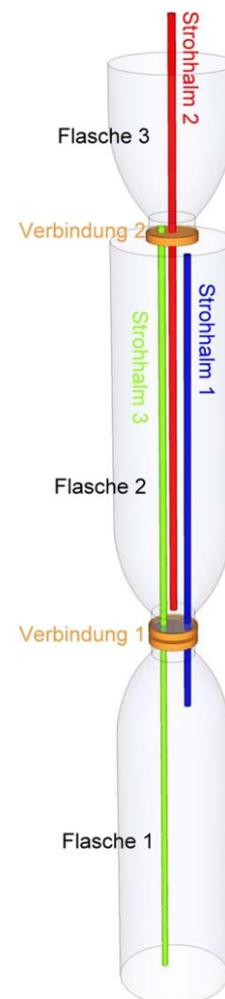


Abbildung 50:
Aufbau des Heronschen
Brunnens

Schritt die Strohhalm 1 und 2 festgeklebt werden. Dann schraubt man Flasche 3 in die Verbindung 1 ein und schiebt von unten Strohhalm 3 durch die für ihn vorgesehenen Löcher und verklebt ihn mit den Verbindungen.

Zu guter Letzt wird eine Flasche etwas unterhalb der Mitte mit der Schere abgeschnitten und das so entstandene Flaschenstück (Flache 3) und Flasche 1 werden auf die Versuchsanordnung aufgeschraubt.

Um den Versuch durchzuführen, muss man Flasche 2 mit Wasser füllen. Um das zu bewerkstelligen, befüllt man zuerst Flasche 1 und stellt dann die Versuchsanordnung auf den Kopf und wartet, bis das Wasser Flasche 2 gefüllt hat. Daraufhin dreht man die Versuchsanordnung wieder um und schüttet etwas Wasser in Flasche 3, woraufhin aus Strohhalm 1 eine Fontäne sprudelt.

vgl. [34]

Physikalische Erklärung

Der Heronsche Brunnen funktioniert aufgrund von Druckunterschieden in den Flaschen.

Zu Beginn des Versuchs herrscht der gleiche Druck in allen Flaschen. Füllt man nun aber Wasser in den Flaschenabschnitt ganz oben (Flasche 3), so fließt dieses über Strohhalm 3 in die unterste Flasche, wobei am unteren Ende dieses Strohhalmes der hydrostatische Druck der darüber befindlichen Flüssigkeitssäule herrscht:

$$p_{F11} = \rho_W g h_{Str3} \quad (3.33:1)$$

(ρ_W ... Dichte von Wasser, h_{Str3} ... Länge von Strohhalm 3, g ... Erdbeschleunigung)

Durch das Einströmen des Wassers in die unterste Flasche wird Luft verdrängt, die durch Strohhalm 1 in Flasche 2 gelangt. Dadurch erhöht sich der Druck in Flasche 2 um p_{F11} . Der an der Unterseite von Strohhalm 2 herrschende Druck setzt sich aus dem hydrostatischen Druck in Flasche 2, bestimmt durch die Höhe des Wasserstands in dieser Flasche (h_2) und p_{F11} zusammen:

$$p_{F12} = p_{F11} + \rho_W g h_2 \quad (3.33:2)$$

Der Druck p_{F12} entspricht dem hydrostatischen Druck einer Wassersäule, die gleich hoch wäre wie die Länge des Strohhalmes 3 und die Wasserhöhe in Flasche 2. Da aber schon alleine Strohhalm 3 länger ist als Strohhalm 2, kann der durch Wasser in



Abbildung 51:
Heronscher Brunnen

Strohalm 2 verursachte Druck nicht gleichgroß werden wie p_{F12} , wodurch Wasser an der Oberseite von Strohalm 2 heraussprudelt.

Der Springbrunnen läuft, bis sich kein Wasser mehr in Flasche 2 befindet.

3.34 Messung des Luftdrucks – das Goethebarometer

Material

- zwei gleiche PET-Flaschen
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall) oder 2-Komponentenklebstoff und Plastilin
- ein ca. 60 cm langes Schlauchstück (durchsichtig, Innendurchmesser 6 mm)
- 6 mm Bohrer und Bohrmaschine
- Schere
- Gummiringe
- Ostereierfarbe oder Lebensmittelfarbe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Deckel einer der Wasserflaschen wird mittig durchbohrt. Ein Ende des Schlauchs wird so durch das Loch gesteckt, dass es auf der Gewindeseite ca. 1 cm übersteht. Auf der Oberseite des Verschlusses wird die Verbindung mit 2-Komponenten-Knetmasse fixiert und abgedichtet (Abbildung 52). Alternativ kann man zuerst Schlauch und Deckel verkleben und dann mit Plastilin abdichten.



Abbildung 52:
Goethebarometer - Verschluss

Eine der Wasserflaschen wird mit der Schere auf halber Höhe in zwei Teile geschnitten. In den unteren Teil (Standfuß) wird ca. 5 - 10 cm vom Boden entfernt ein Loch gebohrt. Die zweite Flasche wird bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, welches man mit Eierfarbe oder Lebensmittelfarbe einfärbt.

Daraufhin wird der Verschluss auf diese Flasche geschraubt, der Schlauch von Innen durch die Bohrung im Standfuß geschoben und der Standfuß auf die Flasche gedrückt. Mit den Gummiringen wird der Schlauch an den Flaschen befestigt.

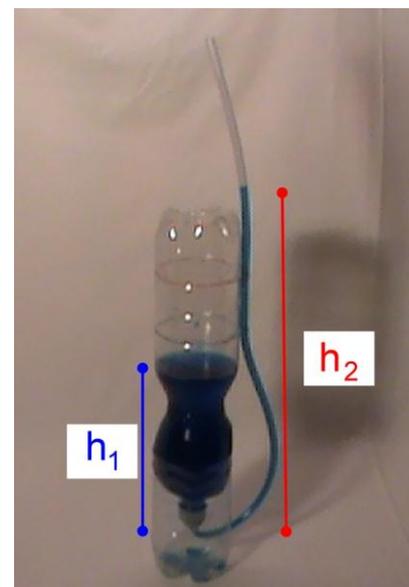


Abbildung 53: Goethebarometer

Dreht man nun diesen Aufbau um, sodass er am Standfuß zu stehen kommt, rinnt Wasser in den Schlauch. Der Wasserstand in der Flasche ist aber etwas höher als der im Schlauch. Durch Blasen in den Schlauch bzw. Abgießen von Wasser aus dem Schlauch kann man erreichen, dass das Wasser in Schlauch und Flasche gleichhoch steht. Ändert sich der Luftdruck, so ändert sich auch die Höhe des Wasserstands im Schlauch.

vgl. [35]

Physikalische Erklärung

Zu Beginn des Experiments ist der Druck des Gases in der Flasche ($p_{L_{Fl}}$) gleich dem Luftdruck außerhalb der Flasche (p_L). Dreht man die Flasche auf den Kopf, so füllt sich der Schlauch mit Wasser, wodurch sich durch das Abrinnen der Flüssigkeit das Volumen der Luft im Inneren der Flasche vergrößert und der Druck $p_{L_{Fl}}$ sinkt und daher geringer ist als p_L .

Am tiefsten Punkt des Schlauchs herrscht jener Druck (p_{TP}), der sich aus dem hydrostatischen Druck der Wassersäule und dem dazugehörigen Luftdruck zusammensetzt.

$$p_{TP} = p_{L_{Fl}} + \rho_W g h_1 = p_L + \rho_W g h_2 \quad (3.34:1)$$

(ρ_W ... Dichte von Wasser, h_1 und h_2 ... Wasserstandshöhen, g ... Erdbeschleunigung)

Da, wie oben erwähnt der Gasdruck in der Flasche geringer ist als der Außendruck, ist der Wasserspiegel im Schlauch weniger hoch, als jener in der Flasche. Bläst man aber am Schlauchende etwas Luft in die Flasche, so erhöht sich der Druck in der Flasche und es ist möglich einen Zustand herzustellen, indem sowohl die Wasserstandshöhen h_1 und h_2 gleich sind und die Luftdrücke in der Flasche und außerhalb übereinstimmen (zeigt Normaldruck an).

Durch Wetterveränderungen kommt es zu Änderungen des äußeren Luftdrucks p_L . Bei einer Hochdruckwetterlage ist der Luftdruck außerhalb der Flasche größer als der Gasdruck in der Flasche ($p_L > p_{L_{Fl}}$). Da aber die Summen von hydrostatischem Druck und Gasdruck in der Flasche bzw. hydrostatischem Druck und Luftdruck außerhalb gleichgroß sein müssen (siehe Formel (3.33:1)) muss sich, um einen Ausgleich herzustellen der hydrostatische Druck und daher h_2 ändern. Der Flüssigkeitsstand im Schlauch wird geringer ($h_1 > h_2$).

Bei einer Schlechtwetterlage (Tiefdruckgebiet) hingegen ist der äußere Luftdruck geringer und somit muss h_1 größer werden, um den Luftdruckunterschied auszugleichen.

Es ist nun möglich die relative Höhe ($h_{rel} = h_1 - h_2$) der Flüssigkeitsstände in Flasche und Schlauch abzumessen. Dabei zeigt der Zuwachs (Abfall) der Höhe im Schlauch von 1 cm einen Druckabfall (Druckanstieg) von 1 mbar an.

Bei der Messung des Luftdrucks mit dieser Methode treten aber zwei Probleme auf: Einerseits verdunstet Wasser. Das führt dazu, dass sich die Wassermenge in der Versuchsanordnung verändert und so das Volumen der Luft in der Flasche größer wird, was zu einem Abfall des Drucks p_{LFl} und damit einer Verringerung des Wasserstands im Schlauch führt. In diesem Fall zeigt die Anordnung einen zu hohen Luftdruck an. Andererseits ist das Volumen, welches Wasser einnimmt, temperaturabhängig und eine exakte Messung ist deshalb nur bei gleichbleibenden Temperaturen möglich.

Bemerkungen

Anordnungen, die nach dem soeben beschriebenen Prinzip Luftdrücke messen, werden als Goethebarometer bezeichnet. Der Name kommt daher, dass im Nachlass des Dichters und Naturforschers Johann Wolfgang von Goethe ein solcher Luftdruckmesser gefunden wurde.

Zur Verwendung kamen solche Barometer auch in der Schifffahrt und wurden so auch unter dem Namen Donnerglass bekannt. Steht nämlich stürmisches Wetter (oft mit Blitz und Donner) bevor, so sinkt der Luftdruck stark, was dazu führt, dass Flüssigkeit aus der Öffnung des Goethebarometers austritt. Dadurch war es den Seefahrern möglich, schon vor Losbrechen des Sturms Vorbereitungen zu treffen.

vgl. [11, p. 403f]

3.35 Modell eines Manometers und allseitige Gleichheit des Drucks in Flüssigkeiten

Material

- eine volle und eine leere große PET-Flasche
- ca. 1,5 m eines dünnen durchsichtigen Schlauchs (Innendurchmesser ca. 4 – 6 mm)
- Strohhalm mit Knickstelle
- durchsichtiges Klebeband
- Teppichmesser
- Lebensmittel- oder Eierfarbe
- eine Injektionsspritze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der obere Teil der leeren Flasche wird mit dem Teppichmesser abgeschnitten, sodass ein Zylinder entsteht. Diesen Zylinder füllt man mit Wasser.

Der Schlauch wird so mit dem durchsichtigen Klebeband an der gefüllten PET-Flasche befestigt, dass ein "U-Rohr" entsteht, von dessen einem Schenkel ein noch ca. $\frac{3}{4}$ m langes Schlauchstück

wegführt. In dieses längere Ende wird der Strohhalm hineingeschoben, mit dem

Klebeband befestigt und die Verbindung abgedichtet. Mit der Injektionsspritze wird mit Lebensmittelfarbe eingefärbtes Wasser aufgezogen und in den kürzeren Schenkel des U-Rohrs gespritzt. Es soll erreicht werden, dass in den beiden Schenkeln des U's das Wasser ca. 15 cm hoch steht und die Wassersäule nicht durch Luftblasen unterbrochen ist. Sollten Luftblasen eingeschlossen sein, hilft es, die

Flasche mehrmals zu heben und auf dem Boden hart abzusetzen, da durch die



Abbildung 54: U-Rohr-Manometer
Druck von unten



Abbildung 55: U-Rohr-Manometer
Druck von der Seite

Erschütterungen Lufteinschlüsse aus der Flüssigkeitssäule nach oben entweichen. Die so hergestellte Apparatur ist ein Modell für ein offenes U-Rohr-Manometer.

Mit dem nicht abgeknickten Strohhalm taucht man nun in das Wasser im Zylinder ein und beobachtet, wie sich mit zunehmender Tiefe die Flüssigkeitsstände in den beiden U-Rohr-Schenkeln immer stärker verschieben. An der Seite des U's, mit der in das Wasser eingetaucht wird, sinkt die Flüssigkeit, während sie auf der anderen Seite steigt (Abbildung 54).

Führt man das gleiche Experiment mit im rechten Winkel abgeknicktem Trinkhalm durch und taucht so tief ins Wasser ein, dass sich die Trinkhalmöffnung in gleicher Tiefe wie bei der ersten Versuchsausführung befindet, bemerkt man, dass die Höhendifferenz der Wasserstände in den beiden U-Rohr-Schenkeln die gleiche ist wie beim ersten Mal.

vgl. [26, p. 72]

Physikalische Erklärung

Während dieses Experiments versuchen sich die Flüssigkeitssäulen in den beiden Schenkeln des U-Rohrs so einzustellen, dass am tiefsten Punkt (TP) des U's auf beiden Seiten der gleiche Druck herrscht. Am tiefsten Punkt muss also gelten:

$$p_1 + \rho_{Fl}gh_1 = p_2 + \rho_{Fl}gh_2 \quad (3.35:1)$$

(p_i ... auf die Wasseroberflächen im U-Rohr wirkender Druck, ρ_{Fl} ... Dichte der Flüssigkeit im U-Rohr, h_i ... Flüssigkeitshöhen in den Schenkeln, g ... Erdbeschleunigung)

Zu Beginn des Experiments stehen die Wassersäulen in beiden Schenkeln gleich hoch. Zu diesem Zeitpunkt sind die auf die beiden Wasseroberflächen des U-Rohrs wirkenden Drücke (p_1 und p_2) gleich groß und entsprechen dem atmosphärischen Luftdruck. Auch die hydrostatischen Drücke stimmen überein. (Abbildung 56) Taucht man die Verlängerung des U-Rohrs (befestigt an Schenkel 2) in den mit Wasser gefüllten Zylinder, so wird an der Unterseite des Strohhalms Wasser in den Schlauch gedrückt, wodurch die im Schlauch befindliche Luft in das U geschoben wird. Dadurch erhöht sich der Druck p_2 . Um die Druckdifferenz auszugleichen stellen sich in den beiden Schenkeln unterschiedliche Flüssigkeitshöhen ein.

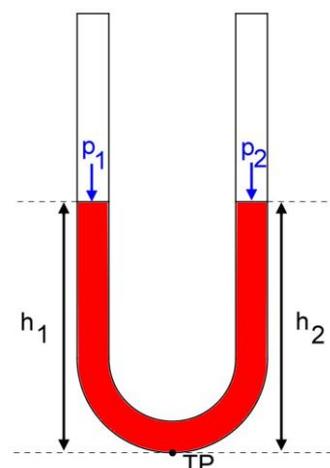


Abbildung 56: Druckgleichheit

Die Differenz der Flüssigkeitshöhen im Schlauch ist ein Maß für den Druckunterschied zwischen dem Druck am Strohhalmende und dem auf den offenen Schenkel des U's wirkenden Luftdruck. Es gilt:

$$\Delta p = \Delta h \rho_{Fl} g \quad (3.35:2)$$

($\Delta p = p_2 - p_1$... Druckunterschied in den Schenkeln, $\Delta h = h_1 - h_2$... Höhenunterschied der Flüssigkeit)

Da während des gesamten Experiments der Druck p_1 der gleiche bleibt, entspricht Δp der Druckänderung, die durch das Eintauchen des Trinkhalms in die Flüssigkeit verursacht wird.

Mit dem soeben erklärten Druckmesser werden in diesem Versuch zwei Messungen durchgeführt. Einmal wird der Druck gemessen, der in einer gewissen Flüssigkeitstiefe von unten in den Strohhalm drückt und das zweite Mal erfolgt die Messung mit abgeknicktem Strohhalm. Bei der zweiten Ausführung wird also jener Druck gemessen, der in der gleichen Tiefe aber seitlich herrscht. Bei beiden Messungen stellt sich der gleiche Höhenunterschied (Δh) im U-Rohr ein, woraus

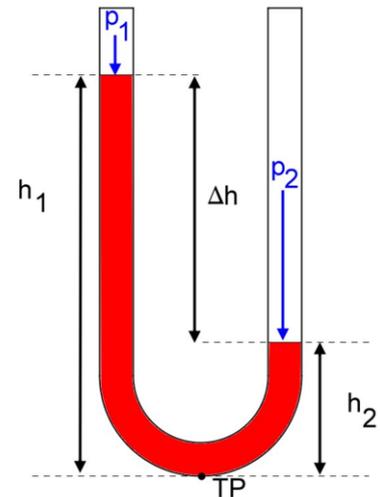


Abbildung 57:
Unterschiedliche Drücke

ersichtlich wird, dass in der gleichen Wassertiefe der gleiche Druck herrscht und das unabhängig von der Richtung. Man spricht in diesem Zusammenhang von der allseitigen Gleichheit des Drucks in Flüssigkeiten.

3.36 Vergleich des hydrostatischen Drucks in verschiedenen Flüssigkeitstiefen und bei verschiedenen Flüssigkeitsdichten

Material

- zwei identische PET-Flaschen
- drei Strohhalm (mit Knickstelle)
- ein T-Stück eines Gardena Micro-Drip-Systems
- Salz oder Zucker

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die beiden PET-Flaschen füllt man zu drei-Viertel mit Wasser. Die Strohhalm werden in bzw. auf das T-Stück gesteckt (siehe Abbildung 58).

Daraufhin werden Strohhalm 1 und Strohhalm 2 jeweils in eine der beiden PET-Flaschen gegeben. Bläst man nun in Strohhalm 3,

so treten sowohl am Ende von Strohhalm 1, als auch an dem von Strohhalm 2, Luftblasen aus. Schüttet man aber aus einer der Flaschen etwas Wasser ab, so tritt nur noch aus jenem Trinkhalm Luft aus, der sich in der Flasche mit dem niedrigeren Flüssigkeitsstand befindet.

Eine weitere Möglichkeit dieses Experiment durchzuführen besteht darin, in einer der Flaschen Salz oder Zucker mit dem Wasser zu vermischen. Bläst man dann in den Strohhalm, so steigen Luftblasen nur in jener Flasche auf, in der sich reines Wasser befindet.

Physikalische Erklärung

In dieser Versuchsanordnung wird mit einem Druck (p) in Strohhalm 3 geblasen. Durch die gleichmäßige Druckausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen (vergleiche auch Abschnitt 3.22) liegt an den Enden von Strohhalm 1 und Strohhalm 2 der gleiche

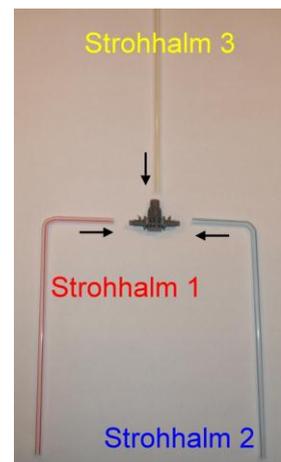


Abbildung 58:
Versuchsaufbau

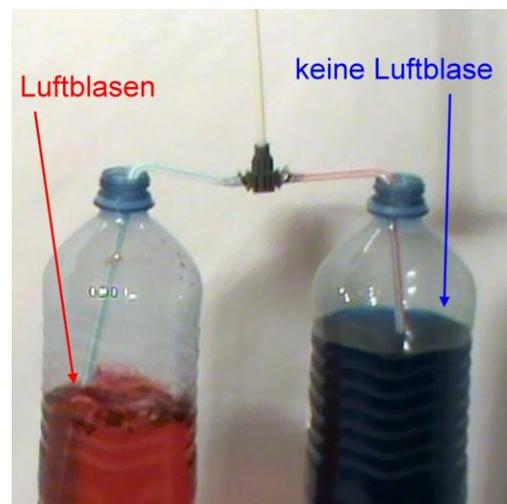


Abbildung 59: Druckunterschiede abhängig von der Eintauchtiefe

Druck an. Die Luft kann aus den Trinkhalmen in dem Augenblick austreten, in dem die Summe aus hydrostatischem Druck in der Flüssigkeit (p_{hyd}) und dem Luftdruck (p_L) geringer ist als der Druck in den Strohhalm. Der hydrostatische Druck hängt dabei von der Höhe der Wassersäule (h) über dem Punkt an dem gemessen wird und von der Dichte der Flüssigkeit (ρ_{Fl}) ab:

$$p_{hyd} = \rho_{Fl}gh \quad (3.36:1)$$

(g ... Erdbeschleunigung)

Zu Beginn des Experiments sind die Eintauchtiefen der Strohhalm 1 (h_1) und 2 (h_2) gleich groß, weshalb die hydrostatischen Drücke (p_{hyd_1} und p_{hyd_2}) auch gleich groß sind. Aus diesem Grund beginnt aus beiden Trinkhalmen gleichzeitig Luft auszutreten.

Verändert man nun eine der Eintauchtiefen, indem man aus der Flasche in die Strohhalm 1 eintaucht etwas Wasser abgießt ($h_1 < h_2$), so ist der hydrostatische Druck am Ende von Strohhalm 1 geringer als der bei Strohhalm 2. Daher tritt am Ende von Trinkhalm 1 Luft aus, während bei Strohhalm 2 nichts passiert. Bläst man aber stark genug in Halm 3, so tritt aus beiden Halmen Luft aus, aber aus Strohhalm 1 immer mehr als aus Trinkhalm 2.

Eine weitere Möglichkeit zu einem Druckunterschied zu gelangen besteht darin, die Dichte einer der Flüssigkeiten zu verändern. Gibt man beispielsweise in die Flasche in die Strohhalm 1 eintaucht etwas Zucker oder Salz, so erhöht sich die Dichte (ρ_{Fl_1}) der Flüssigkeit in dieser Flasche. Da die Dichte in der zweiten Flasche (ρ_{Fl_2}) geringer ist, ist auch bei gleicher Eintauchtiefe der Strohhalm der hydrostatische Druck (p_{hyd_2}) geringer als der in Flasche 1. Daher tritt in diesem Fall aus dem Ende von Strohhalm 2 zuerst Luft aus.

vgl. [11, p. 281ff]

3.37 Hydrostatischer Druck bei kommunizierenden Gefäßen

Material

- eine große PET-Flasche
- 1 m eines dünnen glasklaren Schlauchs
- Teppichmesser
- Bohrer und Bohrmaschine
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Mit dem Teppichmesser wird der Boden der PET-Flasche abgeschnitten. Man bohrt ein kleines Loch in den Verschluss der Flasche, sodass der Schlauch gerade durch diese Bohrung passt. Das Schlauchstück wird mit einem Ende von außen durch das Loch im Flaschendeckel geschoben, sodass ca. 1 cm auf der Gewindeseite des Verschlusses übersteht. Mit der 2-Komponenten-Knetmasse klebt man den Schlauch in dieser Position am Flaschendeckel fest und dichtet die Verbindungsstelle ab.



Abbildung 60: Wasserfontäne

Befüllt man die abgeschnittene Flasche mit Wasser und hält sie so, dass die Wasseroberfläche höher steht, als das Ende des aus der Flasche führenden Schlauchs, tritt aus dem Schlauchende eine Wasserfontäne aus. Je größer die Höhendifferenz (h) zwischen Wasseroberfläche und Schlauchende ist, umso höher spritzt es aus dem Schlauch.

Befinden sich Wasseroberfläche und Schlauchende auf gleicher Höhe, so versiegt die Fontäne vollständig.

vgl [26, p. 69]

Physikalische Erklärung

Es gilt, dass in miteinander verbundenen Gefäßen Flüssigkeiten immer gleich hoch stehen.

In dem hier beschriebenen Experiment liegen, wenn man die Wasserflasche und das Schlauchstück bis zur tiefsten Stelle des Schlauchs als ein Gefäß betrachtet (Gefäß 1) und das Schlauchstück von tiefsten Punkt bis zum Ende des Schlauchs als ein zweites Gefäß ansieht (Gefäß 2), kommunizierende Gefäße vor (Abbildung 61).

Am tiefsten Punkt des Schlauchs (T_P) sind die beiden soeben definierten „Gefäße“ miteinander verbunden. An dieser Stelle muss die Summe aus Luftdruck und dem hydrostatischen Druck durch die Wassersäule in Gefäß 1 gleich der Summe aus Luftdruck und hydrostatischem Druck, verursacht durch die Wassersäule in Gefäß 2, sein. Da der gleiche atmosphärische Luftdruck sowohl auf die Wasseroberfläche in der Flasche als auch auf die im Schlauch wirkt, können etwaige Druck-

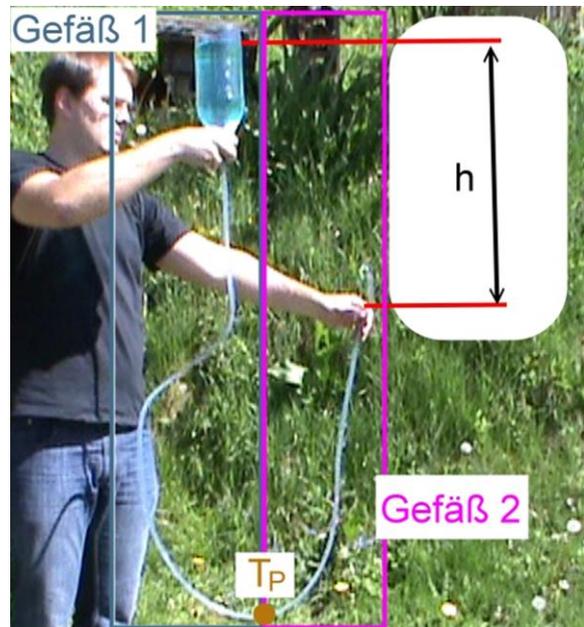


Abbildung 61: Verbundene Gefäße

unterschiede am tiefsten Punkt des Schlauchs nur durch verschieden hohe Wassersäulen in den beiden Gefäßen zustande kommen. Der Druckunterschied (Δp) am tiefsten Punkt lässt sich somit berechnen durch:

$$\Delta p = \rho g h \quad (3.37:1)$$

(ρ ... Dichte von Wasser, g ... Erdbeschleunigung, h ... Höhenunterschied der Flüssigkeitssäulen)

Da Systeme von verbundenen Gefäßen nach Druckausgleich streben, wird im Fall verschieden hoher Wassersäulen in den einzelnen Gefäßen Wasser in den Bereich der niedrigeren Wassersäule (Bereich niedrigeren hydrostatischen Drucks) gedrückt.

Bei aufgehobener Flasche ist das Ende des Schlauchs unterhalb der Wasseroberfläche in Gefäß 1, deshalb kann sich in Gefäß 2 keine Wassersäule ausbilden, weil die begrenzenden Gefäßwände fehlen. So bleibt der Druckunterschied bestehen und Wasser quillt aus dem Schlauchende, bis die Flasche leer ist.

Bemerkungen:

Die Tatsache, dass sich Flüssigkeiten in verbundenen Gefäßen immer gleich hoch stellen, macht man sich auch bei der Schlauchwaage zu Nutze. Das ist ein mit

Flüssigkeit gefüllter Schlauch, mit dem es möglich ist, über eine größere Entfernung Punkte gleicher Höhe zu finden.

Der Umstand, dass ein größerer Höhenunterschied zwischen Flasche und Schlauchende einen höheren Druck am Ende des Schlauchs zur Folge hat, wird auch in der Medizin ausgenutzt. So werden mit Flüssigkeit gefüllte Infusionsflaschen oberhalb von Patienten aufgehängt und mit einem Schlauch und einer Nadel mit der Vene des oder der Kranken verbunden. Durch den Druckunterschied fließt Flüssigkeit in den Körper des Patienten und der Person wird so langsam ein Medikament verabreicht.

3.38 Mechanische Kippschwingung - Siphon

Material

- eine PET-Flasche
- 50 cm eines glasklaren Schlauches (Durchmesser: ½“)
- ein Teppichmesser
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Mit dem Teppichmesser wird der Boden der PET-Flasche abgeschnitten. Der Schlauch wird durch die Flaschenöffnung gesteckt, sodass er ca. 15 cm aus dem Flaschenhals ragt und der Rest des Schlauchs sich im Flaschenkörper befindet. Das Ende in der Flasche wird so gebogen, dass es U-förmig in der Flasche liegt, wobei der Scheitel nach oben und das Schlauchende nach unten gerichtet ist. Mit der 2-Komponenten-Knetmasse wird die Verbindung zwischen Flaschenhals und Schlauch fixiert und abgedichtet.

Füllt man Wasser in die so präparierte Flasche, steigt der Wasserspiegel so lange, bis er den Scheitel des Schlauch-U's erreicht. Dann rinnt das Wasser durch den Schlauch rasch aus und das Ausfließen endet erst dann, wenn der Wasserspiegel in der Flasche das in der Flasche befindliche Schlauchende erreicht hat.

vgl. [14]



Abbildung 62: Siphon

Physikalische Erklärung

Flüssigkeiten in miteinander verbundenen Gefäßen steigen immer gleich hoch (siehe Abschnitt 3.37). In unserem Experiment wird die Flasche langsam mit Wasser befüllt und der Wasserspiegel steigt horizontal nach oben. Erreicht der Wasserspiegel das Ende des gebogenen Schlauchs, so steigt das Wasser auch im Schlauch an. Erreicht der Wasserspiegel den Scheitel des U's, so gelangt Flüssigkeit in den aus der Flasche führenden Schlauchschenkel und rinnt durch diesen aus der Flasche.

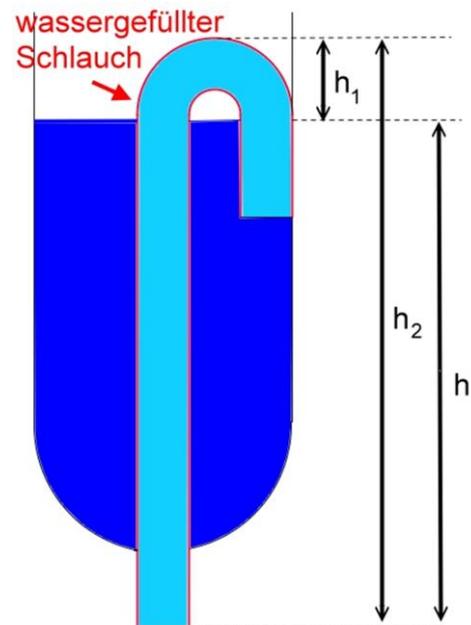


Abbildung 63:
Prinzip eines Saughebers

- a) Prinzip eines Saughebers: Ist der gesamte Schlauch mit Wasser gefüllt, wirkt der Schlauch im Experiment wie ein Saugheber, also eine Vorrichtung, mit der man eine Flüssigkeit aus einem höhergelegenen Behälter in einen tiefergelegenen umfüllen kann. Zwischen den beiden Enden des Schlauchs herrscht der Druckunterschied (Δp):

$$\Delta p = \rho g \cdot (h_2 - h_1) \quad (3.38:1)$$

(ρ ... Dichte von Wasser, g ... Erdbeschleunigung, h_1 und h_2 ... siehe Abbildung 63)

Dieser Druckunterschied bewirkt, dass das Wasser zu dem Ende hin beschleunigt wird, welches sich tiefer befindet, also in Richtung des aus der Flasche führenden Schlauchendes. Da zusätzlich zum Druckunterschied zwischen den Wassermolekülen Kohäsionskräfte wirken, fließt Wasser aus der Flasche.

Ist der Flüssigkeitsstand in der Flasche so weit abgesunken, dass die Wasseroberfläche das in der Flasche befindliche Ende des Schlauchs nicht mehr berührt, gelangt Luft in den Schlauch, die Flüssigkeitssäule im Schlauch reißt ab und der Entleerungsvorgang endet.

vgl. [11, p. 284ff]

- b) Kippschwingung: Lässt man langsam Wasser in den Flaschenkörper einlaufen und betrachtet die Wasserstandshöhe in Abhängigkeit von der Zeit, so zeigt sich, dass man es bei diesem Experiment mit einer mechanischen Kippschwingung zu tun hat. Kippschwingung ist eine „Bezeichnung für

Schwingungen mit einer sägezahnförmigen Schwingungskurve. Idealerweise zeigen Kippschwingungen also einen linearen Anstieg mit der Zeit und dann einen abrupten Abfall der veränderlichen Größe.“ [36] Üblicherweise wird die Entladung „mit einem Mal durch das Erreichen eines Schwellenwerts ausgelöst.“ [37]

In diesem Experiment ist der Schwellenwert genau jene Wasserstandshöhe, bei der sich die Flüssigkeit in der Flasche auf gleicher Höhe wie der höchste Punkt des Schlauchs befindet.

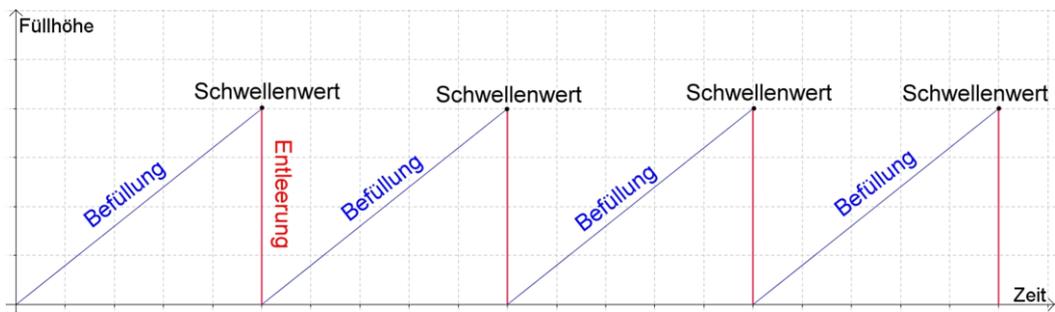


Abbildung 64: Kippschwingung

Bemerkungen:

Das soeben beschriebene Experiment verhält sich wie ein Siphon.

3.39 Ausgleich des hydrostatischen Drucks von Wasser durch den atmosphärischen Luftdruck

Material

- eine Glasflasche mit breiter Öffnung (ev. Milchflasche)
- Suppenteller oder flache Schüssel
- zwei Münzen

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die beiden Münzen werden so in den Suppenteller gelegt, dass es möglich ist, die Glasflasche mit dem Flaschenhals nach unten auf diesen beiden Münzen abzustellen. Die Flasche wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt. Mit einer Hand wird die Flaschenöffnung verdeckt, die Flasche auf den Kopf gedreht und auf die Münzen gestellt. Beim Platzieren der Wasserflasche auf den Münzen rinnt etwas Flüssigkeit in den Teller. Hat die Flüssigkeit die Höhe der Münzen erreicht, so fließt kein Wasser mehr aus der Flasche.

Hebt man die Flasche leicht an, sodass ihre Öffnung nicht mehr die Wasseroberfläche berührt, so rinnt wieder Wasser aus der Flasche in den Teller. Sobald aber der Wasserstand so hoch ist, dass die Wasseroberfläche die Flaschenöffnung berührt, stoppt der Wasserfluss.

Physikalische Erklärung

Dreht man eine gefüllte Flasche auf den Kopf und hält währenddessen mit der Hand die Flaschenöffnung zu, so wirkt auf die Handfläche der hydrostatische Druck (p_{hyd}) der in der Flasche befindlichen Wassersäule.

$$p_{hyd} = \rho_{Fl}gh \quad (3.39:1)$$

(ρ_{Fl} ... Dichte der Flüssigkeit, h ... Wasserhöhe in der Flasche, g ... Erdbeschleunigung)

Bei einer 30 cm hohen Wasserflasche würde der hydrostatische Druck 30 hPa betragen. Der uns umgebene atmosphärische Luftdruck liegt aber bei ca. 1000 hPa.

Zu Beginn dieses Experiments fließt soviel Wasser in den Teller, bis das Wasser die Flaschenöffnung berührt. Auf die Wasseroberfläche im Teller wirkt der atmosphärische Luftdruck, während an der Unterseite der Flasche nur der hydrostatische Druck des Wassers in der Flasche wirkt. Da der atmosphärische Druck

und ein Vielfaches größer ist als der hydrostatische Druck kann keine Flüssigkeit mehr ausfließen.

Dieses Experiment gelingt auch, wenn sich zu Beginn des Experiments etwas Luft in der Flasche befindet. Diese Luft hat denselben Druck wie der atmosphärische Luftdruck und an der Flaschenöffnung herrscht somit ein Druck, der sich aus der Summe von hydrostatischem Druck und Gasdruck in der Flasche zusammensetzt. Dieser Druck ist größer als der Luftdruck, der auf die Wasseroberfläche im Teller wirkt. Aus diesem Grund fließt etwas Wasser aus der Flasche in den Teller, wodurch sich das Luftvolumen in der Flasche vergrößert und der Gasdruck in der Flasche geringer wird. In dem Augenblick, indem die Summe aus Gasdruck in der Flasche und hydrostatischem Druck gleich dem atmosphärischen Luftdruck ist, befindet sich das System im Gleichgewicht und es fließt kein Wasser mehr aus der Flasche.

vgl. [11, p. 405f]

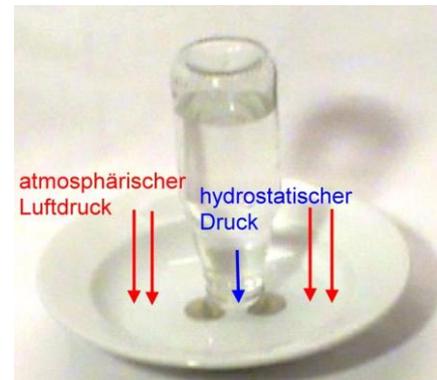


Abbildung 65: Atmosphärischer und hydrostatischer Druck

3.40 Atmosphärischer Luftdruck hilft beim Heben einer Wassersäule

Material

- eine PET-Flasche
- eine Gummikappe (üblicherweise zum Verschließen von Saftflaschen)
- ein Teppichmesser
- ein Kübel oder eine Wanne

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Kübel wird bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Mit dem Teppichmesser schneidet man den Boden der PET-Flasche ab. Die Gummikappe wird knapp unterhalb ihrer geschlossenen Seite bis zur Hälfte eingeschnitten und der so präparierte Verschluss wird auf die Flasche gesteckt.

Die Kombination aus abgeschnittener Flasche und Verschlusskappe wird mit einer Hand ergriffen und mit nach unten gerichteter Öffnung mehrmals schnell im Wasser im Kübel auf und ab bewegt.

Man sieht, wie eine Wassersäule in der Flasche nach oben steigt, schließlich die Oberseite erreicht und sogar aus dem Einschnitt in der Gummikappe spritzt.

vgl. [26, p. 86]

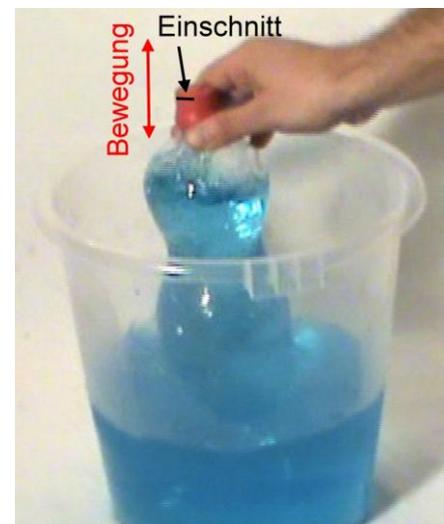


Abbildung 66: Wassersäule

Physikalische Erklärung

Wird die abgeschnittene PET-Flasche ins Wasser getaucht, so dringt dieses durch die Öffnung an der Unterseite in den Flaschenkörper ein. Während des Einströmens des Wassers kann Luft durch die angeschnittene Verschlusskappe entweichen.

Hebt man die Flasche nach oben, wird ein Teil der Flüssigkeit mit aufgehoben und der Wasserstand in der Flasche ist höher als der des Wassers im Kübel. Aufgrund des hydrostatischen Drucks der Wassersäule in der Flasche könnte man annehmen, dass das Wasser wieder aus der Flasche entweichen würde. Bei einem etwaigen Ausfließen des Wassers aus der Flasche müsste gleichzeitig Luft in die Flasche

gelangen. Die angeschnittene Gummiverschlusskappe wirkt aber wie ein Ventil, welches sich beim Einströmen der Luft verschließt. Deshalb gelangt keine bzw. nur sehr wenig Luft in die Flasche. Die Wassersäule in der Flasche sinkt etwas ab, wodurch das Volumen für die in der Flasche eingeschlossene Luft etwas größer wird und der Gasdruck sinkt. Dann ist der atmosphärische Luftdruck, der auf die Wasserfläche im Kübel drückt, gleich groß wie die Summe aus hydrostatischem Druck durch die Wassersäule im Flaschenkörper und dem Gasdruck innerhalb der Flasche. Es liegt also derselbe Fall vor, der bereits in Abschnitt 3.39 erläutert wurde. Bei jedem Eintauchen der Flasche wird mehr Wasser in den Flaschenkörper geschoben, wodurch die Wassersäule ansteigt, bis das Wasser schließlich den gesamten Flaschenraum ausfüllt.

Bemerkungen

Dieses Experiment gelingt am besten, wenn man die Flasche sehr schnell auf und ab bewegt.

Ist die Flasche vollständig mit Wasser gefüllt, so kann man mit der zweiten Hand oben auf die Gummikappe drücken, um zu erreichen, dass gar keine Luft in die Flasche gelangen kann. Die Flasche mit der Wassersäule kann dann soweit aus dem Wasser gehoben werden, bis die Unterseite der Flasche die Wasseroberfläche des sich im Kübel befindlichen Wassers nicht mehr berührt. Sobald der Kontakt zwischen Wasseroberfläche und Flaschenabschnitt nicht mehr besteht, fließt plötzlich das gesamte Wasser aus der Flasche. Der Grund dafür ist, dass dann der hydrostatische Druck nicht mehr durch den auf die Wasserfläche im Kübel wirkenden Luftdruck kompensiert wird.

3.41 Atmosphärischer Luftdruck hält einen Luftballon aufgeblasen

Material

- eine PET-Flasche
- ein Luftballon (wenn möglich länglich)
- ein Nagel, Bohrer, oder Stechaale

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Ungefähr 3 cm vom Flaschenboden entfernt wird ein Loch in die Flasche gebohrt, welches aber nur so klein sein darf, dass man es ohne Probleme mit einem Finger verdecken kann. Durch den Flaschenhals wird ein Luftballon in die Flasche geschoben und über die Flaschenöffnung gestülpt.

Verschließt man mit einem Finger das in die Flasche gebohrte Loch und versucht den Luftballon aufzublasen, so merkt man bald, dass das nicht gelingt. Lässt man hingegen das Loch frei, so ist es kein Problem den Luftballon aufzublasen.

Ist der Ballon mit Luft gefüllt und verschließt man dann das Loch, so behält der Luftballon, wenn man den Mund vom Flaschenhals nimmt, seine aufgeblasene Form und es ist möglich durch den Flaschenhals in den Luftballon zu blicken. Hebt man dann den Finger, so beginnt sich der Ballon zusammenzuziehen. Sobald man aber die Bohrung wieder verschließt, behält der Ballon seine Größe.



Abbildung 67: Luftballon in der Flasche

Physikalische Erklärung

Beim Aufblasen eines Luftballons werden in diesen Luftmoleküle gepresst. Durch die erhöhte Anzahl an Molekülen innerhalb des Ballons steigt der Druck an. Der Druck der im Ballon befindlichen Luft entspricht der Summe von äußerem Luftdruck und jenem Druck, der durch das Bestreben des Luftballons sich zusammenzuziehen verursacht wird. Augenscheinlich ist also der Gasdruck im Ballon größer als jener außerhalb.

Im ersten Schritt der Versuchsausführung wird versucht den Luftballon in einem geschlossenen Gefäß aufzublasen. Um zu erklären warum das nicht gelingen kann, ist

es zweckmäßig das Volumen der Luft in der Flasche und jenes im Luftballon zu betrachten. Bläst man in den Luftballon, so hat dieser das Bestreben sich auszudehnen und damit sein Volumen zu vergrößern. In dem Maße, in dem sich das Volumen des Luftballons vergrößert, muss sich aber auch das Volumen der Luft innerhalb der Flasche verringern. Da aber keine Luftmoleküle aus der Flasche entweichen können, ist eine Volumsvergrößerung des Luftballons nur möglich, wenn das in der Flasche befindliche Gas komprimiert wird. Die menschliche Lunge kann aber keinen großen Überdruck erzeugen (ca. 0,1 bar), wodurch die Komprimierung der Luft innerhalb der Flasche sehr gering ist und sich der Luftballon nur in sehr geringem Maße aufblasen lässt.

Bei der zweiten Durchführung des Experiments hat die Luft innerhalb der Flasche die Möglichkeit durch das gebohrte Loch zu entweichen. Dadurch ist das Aufblasen des Luftballons in der Flasche nicht schwerer als außerhalb der Flasche. Verschließt man, bei aufgeblasenem Ballon, das in der Flasche befindliche Loch mit einem Finger und entfernt den Mund von der Öffnung des Luftballons, so sinkt der Druck im Luftballon von max. 1,04 bar auf den Umgebungsluftdruck ab (ca. 1 bar), da handelsübliche Luftballone einen Überdruck von maximal 0,04 bar aushalten, bevor sie zerreißen. Dieser Druckunterschied (0,04 bar) bewirkt eine Veränderung des Volumens des Luftballons um ca. 4 %, welche für das menschliche Auge fast nicht wahrnehmbar ist. Durch die Volumsverringerng des Luftballons wird aber das Volumen, welches der in der Flasche befindlichen Luft zur Verfügung steht, vergrößert, wodurch dort der Gasdruck absinkt. Somit kommt es zu einem Gleichgewicht bei dem gilt:

$$p_{Luft} - p_{Ballon} = p_{Flasche} \quad (3.41:1)$$

(p_{Luft} ... äußerer Luftdruck (ca. 1 bar), $p_{Flasche}$... Gasdruck in der Flasche (ca. 0,96 bar), p_{Ballon} ... Druck durch das Bestreben des Ballons sich zusammenzuziehen (ca. 0,04 bar))

Gilt dieses Gleichgewicht, behält der Ballon seine Form.

Hebt man bei aufgeblasenem Ballon den Finger von der Bohrung, so ist der Gasdruck in der Flasche gleich dem äußeren Luftdruck und der durch das Bestreben des Ballons sich zusammenzuziehen verursachte Druck reicht aus, damit der Luftballon sein Volumen verkleinern kann.

vgl. [11, p. 400]

3.42 In Wasser gelöstes Kohlendioxid bläst einen Luftballon auf

Material

- eine Flasche kohlendioxidhaltiges Mineralwasser
- ein Luftballon

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Luftballon wird über den Hals der geöffneten Mineralwasserflasche gestülpt. Während man mit einer Hand den Luftballon festhält, wird die Flasche leicht geschüttelt.

Daraufhin kann man beobachten, wie sich der Luftballon aufrichtet und aufbläst.

Physikalische Erklärung

In prickelndem Mineralwasser befindet sich gelöstes Kohlendioxid. Durch das Schütteln der Mineralwasserflasche geht ein Teil des gelösten Kohlendioxids in die Gasphase über, wodurch die Anzahl der Gasmoleküle steigt.

Nach der Zustandsgleichung idealer Gase gilt:

$$pV = NkT \rightarrow V = N \frac{kT}{p} \quad (3.42:1)$$

(N ... Anzahl der Gasmoleküle, k ... Boltzmann-Konstante, V ... Volumen, p ... Druck, T ... Temperatur)

Die erhöhte Zahl von Gasmolekülen führt zu einer Erhöhung des Drucks im Luftballon, was wiederum zu einer Volumsvergrößerung führt. Diese Volumsvergrößerung zeigt sich durch die Ausdehnung des Luftballons.

vgl. [11, p. 428f]

Bemerkungen

Es ist sinnvoll vor Beginn dieses Experiments den Luftballon mehrmals aufzublasen und die Luft dann wieder entweichen zu lassen, da er dadurch etwas vorgedehnt wird und das Experiment besser gelingt.



Abbildung 68:
Ballon aufgeblasen

3.43 Freisetzen des Kohlendioxids von Cola Light

Material

- eine Flasche eines kohlenensäurehaltigen Getränks (am besten Cola Light)
- eine Packung Mentos-mint-Pastillen
- eine 20-ml-Injektionsspritze
- 25 mm Forstnerbohrer und Bohrmaschine
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall)
- eine Nähnadel und Faden
- ev. Klebeband

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Mit dem Forstnerbohrer wird in der Mitte des Flaschenverschlusses ein 25 mm großes Loch gebohrt. Man zieht den Spritzenkolben aus der Spritze und der Spritzenschaft wird mit 2-Komponenten-Knetmasse auf die Bohrung geklebt, sodass ein durchgängiger Kanal, bestehend aus Spritze und Flaschendeckel, entsteht. Knapp oberhalb der Klebstelle sticht man mit der Nadel durch die Spritzenwand. Dabei kann es hilfreich sein die Nadel mit einem Feuerzeug zu erhitzen.

Nach diesen Vorbereitungen werden in den Spritzenschaft einige Mentos (ca. 5 – 8 Stück) eingefüllt und die Nadel durch



Abbildung 69: Mit Mentos befüllte Spritze

das zuvor gemachte Loch geschoben, sodass die Mentos nicht mehr aus der Spritze fallen können. Die Kombination aus Spritze, Flaschendeckel und Mentos schraubt man auf die unmittelbar zuvor geöffnete Flasche mit dem kohlenensäurehaltigen Getränk.

Zieht man die Nadel aus der Spritze, so fallen die Mentos in die Flasche. Es kann beobachtet werden, wie das Cola zu schäumen beginnt und nach wenigen Augenblicken an der Oberseite der Spritze und aus der mit der Nadel gemachten Bohrung ein Flüssigkeitsstrahl austritt.

Physikalische Erklärung

Mentos-mint-Pastillen haben, unter dem Mikroskop betrachtet, eine Oberfläche, welche eine Vielzahl von Dellen aufweist. Kommt die Oberfläche einer Pastille mit einer kohlenstoffhaltigen Flüssigkeit in Kontakt, so geht das in Wasser gelöste CO_2

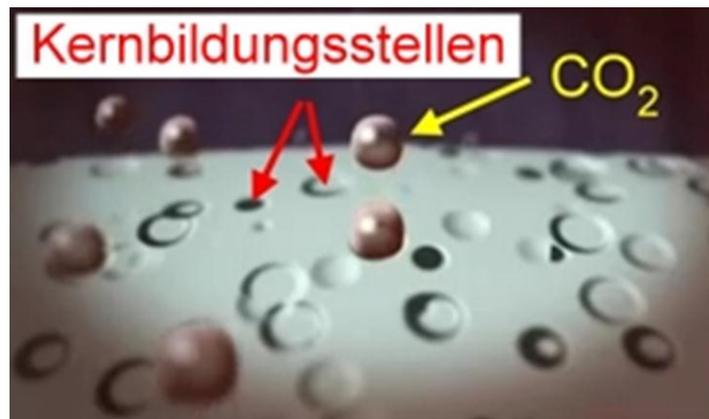


Abbildung 70: Stark vergrößerte Mentos-Oberfläche [38]

schlagartig in den gasförmigen Zustand über. Dabei sind die Dellen in der Mentos-Oberfläche Kernbildungsstellen, an denen das Freiwerden des Kohlendioxids und damit auch die Blasenbildung stattfindet (siehe Abbildung 70). Bei diesem Prozess ist bemerkenswert, dass das Freiwerden des Kohlendioxids sehr schnell abläuft.

Mentos haben auch eine viel größere Dichte als die sie umgebende Cola. Daher sinken sie schnell durch die Flüssigkeit zu Boden und kommen so mit einer großen Menge des kohlenstoffhaltigen Getränks in Kontakt. Rasch wird sehr viel Kohlendioxid in der Flasche frei.



Abbildung 71: Austreiben des Getränks

Durch das freiwerdende Kohlendioxid erhöht sich der Druck in der Flasche und die einzigen Wege den Druck auszugleichen sind die Flüssigkeit aus der Spritzenöffnung bzw. dem kleinen Loch seitlich an der Spitze zu treiben. Da ein sehr hoher Druck entsteht, sind Spritzhöhen von über 7 m durchaus möglich.

vgl. [33, p. 232ff], [38]

Bemerkungen

Obwohl dieses Experiment, meines Wissens nach, mit allen kohlenstoffhaltigen Getränken funktioniert, hat sich gezeigt, dass die größten Spritzhöhen mit Light-Getränken erzielt werden.

Um eine größere Spritzhöhe zu erreichen wäre es wünschenswert das seitliche Austreiben von Flüssigkeit zu verringern. Das gelingt, indem man nach dem Befüllen mit Mentos und dem Stecken der Nadel in die Spritze einen Klebestreifen über das Loch, indem die Nadel steckt, klebt.

Bei der Ausführung dieses Experiments besteht immer ein gewisses Risiko sich mit dem in der Flasche befindlichen Getränk zu bespritzen. Um das zu vermeiden, ist es sinnvoll, einen Faden durch das Nadelöhr der die Mentos fixierenden Nadel zu ziehen und durch einen kräftigen Zug am Faden aus sicherer Entfernung das Experiment in Gang zu setzen.

Will man dieses Experiment ohne Vorbereitungen ausführen, so kann man die Mentos direkt in eine Flasche mit kohlenstoffhaltigem Getränk werfen. Dabei erreicht man aber bei Weitem nicht die Spritzhöhen und die Spritzdauer des soeben vorgestellten Versuchsaufbaus.

3.44 Vortexringe

Material

- eine 0,5-l-PET-Flasche
- einen Luftballon
- ein Teppichmesser
- Schere
- eine Zigarette und ein Feuerzeug
- eine Injektionsspritze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Mit dem Teppichmesser schneidet man den Boden der PET-Flasche ab und entfernt den sich zum Mundstück verengenden Bereich des Luftballons. Der Luftballonrest wird über die Öffnung der Flasche gestülpt, an welcher der Flaschenboden entfernt worden ist. So erhält man eine Flasche, die anstelle des Flaschenbodens eine Luftballonmembran hat.

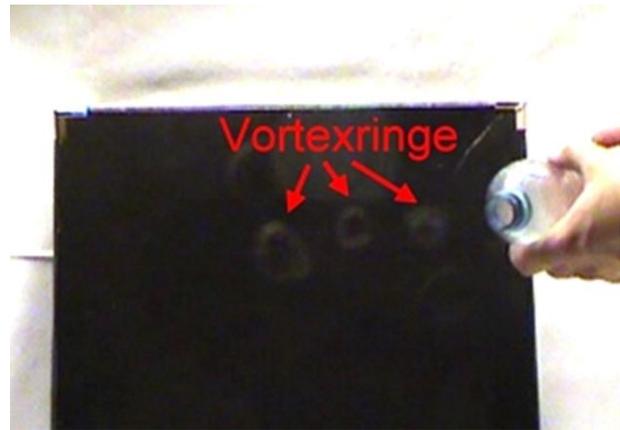


Abbildung 72: Vortexringe

Nach dem Anzünden der Zigarette hält man diese in die Flasche. Die Injektionsspritze wird in den Filter der Zigarette gesteckt und der Spritzenkolben mehrfach auf und ab bewegt. Durch dieses Vorgehen entsteht im Flaschenkörper ein dichter Rauch.

Klopft man nun leicht auf die Luftballonmembran, so kann man beobachten, wie aus dem Flaschenhals Rauchringe austreten.

Physikalische Erklärung

Schlägt man mit der Hand auf die Luftballonmembran, so verringert man damit das Volumen, welches der Luft in

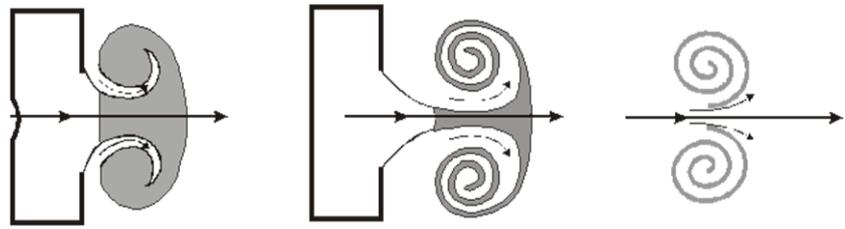


Abbildung 73: Entstehung eines Vortexrings [39]

der Flasche zur Verfügung steht. Ein kleiner Teil der Luft wird daher aus der Flasche gedrängt. Aufgrund der Viskosität der Luft haben die aus dem Flaschenhals austretenden Luftmoleküle unterschiedliche Geschwindigkeiten. Gasmoleküle, welche in der Mitte der Flaschenöffnung austreten, haben eine höhere Geschwindigkeit als jene am Rand. Diese Geschwindigkeitsunterschiede bewirken, dass sich die im Zentrum befindlichen Luftmoleküle schneller nach vorne bewegen als die am Rand und so einen Wirbel in Gang setzen.

Endet der Luftstrom aus der Flasche, so reißt der Wirbel ab und bewegt sich geradlinig von der Flaschenöffnung weg, während die im Ring befindlichen Moleküle noch immer rotieren (Abbildung 74). Erst wenn die Luftmoleküle ihre kinetische Energie an die sie umgebende Luft abgegeben haben, lösen sich die Vortexringe auf.

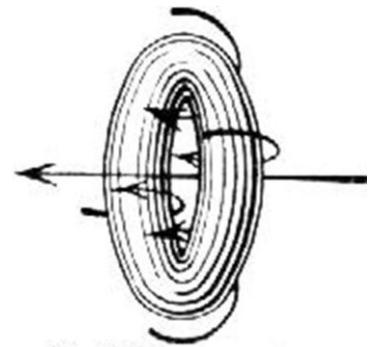


Abbildung 74: Sich fortbewegender Wirbelring [40]

vgl. [39], [40]

Bemerkungen

Die Wirbelringe werden am besten sichtbar, wenn man das Experiment vor einer dunklen Fläche durchführt.

Vortexringe lassen sich auch mithilfe einer 19-l-Flasche und einer Rauchbombe darstellen. Dazu geht man wie in Abschnitt 3.57 vor, mit dem Unterschied, dass man keinen Spiritus in die 19-l-Flasche einfüllt, sondern mit der flachen Hand auf den Flaschenboden schlägt, wodurch aus dem Flaschenhals Vortexringe austreten.

3.45 Stehende Wellen in Luft- bzw. Flüssigkeitssäulen

Material

- zwei Glasflaschen
- ein Löffel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In die beiden Glasflaschen wird Wasser gefüllt. Dabei sollte die Füllhöhe einer Flasche unterhalb der halben Flaschenhöhe, die der anderen Flasche etwas oberhalb der halben Flaschenhöhe sein.

Schlägt man mit dem Löffel jeweils auf Höhe der halben Wassersäule gegen die Glasflaschen, so erklingen Glockentöne. Der Ton, der bei der mit weniger Wasser befüllten Flasche erklingt, klingt höher als der, der bei der mehr gefüllten.

In einem weiteren Schritt setzt man die Lippen abwechselnd an den Rand der Wasserflaschen und bläst leicht über den Flaschenrand, sodass ein Ton

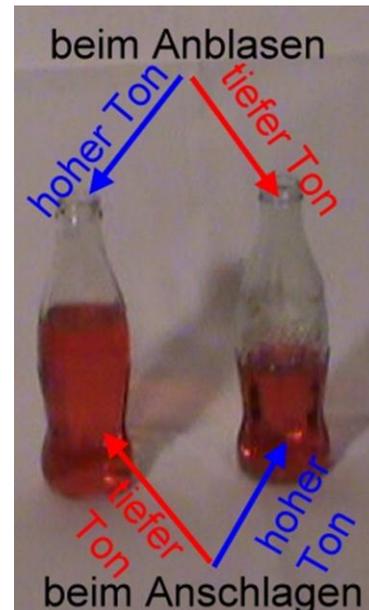


Abbildung 75: Tonhöhen

entsteht. Man hört, dass der Ton in der mit weniger Wasser befüllten Flasche tiefer ist als der Ton, der bei der anderen Flasche ertönt.

Physikalische Erklärung

Eine Schallquelle ist ein schwingender Körper, von dem aus sich Schallwellen ausbreiten.

In dem hier betrachteten Experiment wird einmal die Flüssigkeitssäule (anschlagen mit dem Löffel) und einmal die Luftsäule (blasen über den Flaschenrand) zum Schwingen gebracht. In beiden Fällen erklingt ein reiner Ton und die in der Flasche befindliche Wasser- bzw. Flüssigkeitssäule schwingt in stehenden Wellen.

Bei einer Luft- bzw. Flüssigkeitssäule gilt für die Frequenz (f) der stehenden Welle:

$$f = \frac{c}{4l} \quad (3.45:1)$$

(f ... Frequenz, c ... Schallgeschwindigkeit (abhängig vom Medium), l ... Länge der schwingenden Säule)

Je höher die Frequenz, also auch je kürzer die Wellenlänge, eines Tons ist, desto heller empfinden ihn Menschen. Es gilt weiters für den Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge (λ)

$$c = f \cdot \lambda \quad (3.45:2)$$

und somit für den Zusammenhang von Länge der Luft- bzw. Flüssigkeitssäule und die Wellenlänge:

$$l = \frac{\lambda}{4} \quad (3.45:3)$$

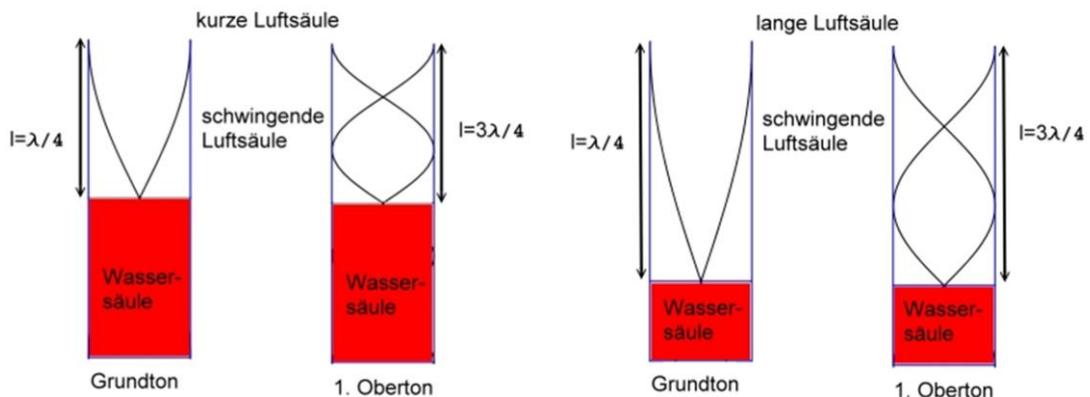


Abbildung 76: Schwingende Luftsäulen verschiedener Länge

Da in einer längeren Flüssigkeits- bzw. Luftsäule die Frequenz der stehenden Welle geringer ist, hört man beim Schwingen dieser einen tieferen Ton als bei einer kürzeren Säule.

Im Fall des Anschlagens mit dem Löffel wird die Flüssigkeitssäule zum Schwingen gebracht. Je mehr Wasser in der Flasche ist, desto tiefer ist der Ton, je weniger Wasser in der Flasche ist, desto heller erklingt er.

Beim Blasen über den Flaschenrand wird die Luftsäule oberhalb des Wassers zum Schwingen gebracht und es gilt, je mehr Wasser in der Flasche ist, desto geringer ist die Länge der Luftsäule und desto höher ist der Ton. Je weniger Wasser in der Flasche ist, desto größer ist die Länge der Luftsäule und desto tiefer klingt der Ton.

vgl. [29, p. 335]

Elektrizitätslehre und Magnetismus

3.46 Nachweis der Lenz'schen Regel

Material

- eine Glasflasche
- ein Flaschenkorken
- eine Nähnadel
- eine Aluminiumflasche (erhältlich bei Merkur im Bierregal)
- eine ca. 40 cm lange, dünne Holzleiste (ca. 1 cm x 1 cm Querschnittsfläche)
- eine Metallsäge
- eine Metallschere
- die Pfanne eines Druckknopfs (erhältlich in Fachgeschäften für Nähartikel)
- Sekundenkleber
- ein sehr starker Magnet (ev. ein Neodym-Magnet – erhältlich bei Conrad)
- ein kleiner Bohrer

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Nadel wird so durch den Flaschenkorken gesteckt, dass die Spitze ca. 2 cm übersteht. In der Mitte der Holzleiste bohrt man mit dem Bohrer ein kleines Loch und klebt die Druckknopfpfanne in dieser Bohrung fest.

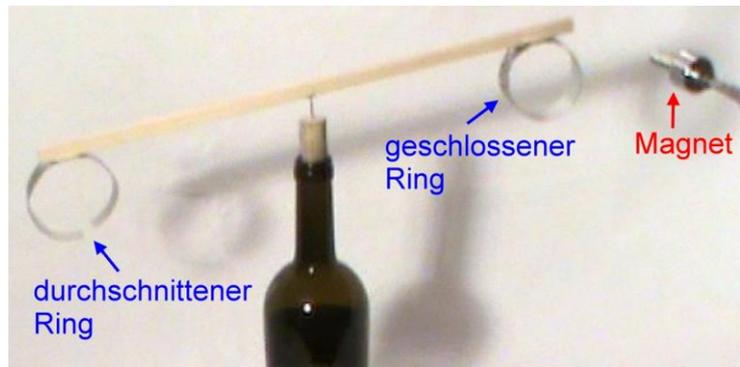


Abbildung 77: Nachweis der Lenz'schen Regel

Mit der Metallsäge werden aus der Aluminiumflasche zwei Ringe geschnitten und mit dem Klebstoff jeweils an eines der Enden der Leiste geklebt. Einer der beiden Ringe wird mit der Metallschere durchgeschnitten und etwas auseinandergebogen, sodass ein hufeisenförmiges Aluminiumstück entsteht.

Dann setzt man die Leiste auf die Spitze der Nadel, sodass diese in der Druckknopfpfanne zu liegen kommt.

Führt man mit einem Pol des sehr starken Magneten durch den geschlossenen Aluminiumring, so bewegt sich dieser vom Magneten weg. Beim Zurückziehen folgt der Ring dem Magneten.

Versucht man das Gleiche bei dem unterbrochenen Aluminiumring zu tun, so bemerkt man, dass nichts passiert und der unterbrochene Aluminiumring dem Magneten weder folgt noch vor ihm zurückweicht.

Physikalische Erklärung

Das Induktionsgesetz besagt, dass eine Änderung des magnetischen Flusses, welcher eine Leiterschleife durchsetzt, in der Leiterschleife eine Spannung induziert. Diese Induktionsspannung hat einen Stromfluss innerhalb der Leiterschleife zur Folge.

In dem von uns betrachteten Experiment ist der geschlossene Aluminiumring eine Leiterschleife. Durch das Eintauchen des Magneten in den Aluminiumring verändert sich der magnetische Fluss durch den Ring. Das hat einen Induktionsstrom zur Folge.

Nach der Lenz'schen Regel ist dieser induzierte Strom so gerichtet, dass das vom induzierten Strom erzeugte Magnetfeld der Änderung des magnetischen Flusses

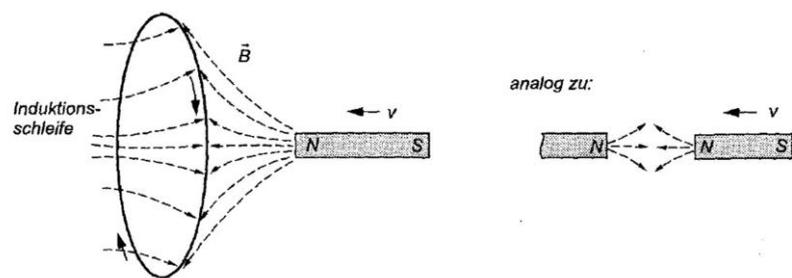


Abbildung 78: Induktionsstrom in einem Ring bei Annäherung eines Magneten [42, p. 142]

entgegenwirkt (Abbildung 78).

Aus diesem Grund weicht der Ring vom Magneten zurück. Beim Herausziehen des Magneten dreht sich die Richtung des Induktionsstroms um und versucht den Magneten im Ring festzuhalten, weshalb er ihm folgt.

Führt man das gleiche Eintauchen und Herausziehen des Magneten beim durchgeschnittenen Aluminiumring durch, so können in diesem Fall keine Kreisströme induziert werden, da die Leiterschleife nicht geschlossen ist. Deswegen bildet sich auch kein Magnetfeld aus, welches mit dem des Permanentmagneten wechselwirken könnte.

vgl. [41], [42, p. 142ff]

Bemerkungen

Die Aluminiumringe können alternativ auch fertig gekauft, aus einem Aluminiumblech gebogen oder aus einer Aluminiumdose geschnitten werden. Es ist aber wichtig, dass es sich beim Material wirklich um Aluminium handelt, da dieses einerseits sehr leicht ist und andererseits keine ferromagnetischen Eigenschaften besitzt. Im Falle eines Rings aus einem ferromagnetischen Material (z. B. Eisen) würde die magnetische Wirkung auf den Ring den Effekt der Lenz'schen Regel überdecken und sowohl der durchschnittene Ring als auch der geschlossene würden dem Magneten folgen.

Das Anbringen der Druckknopffanne spielt insofern eine wichtige Rolle, als dass es nur so gelingt, die Reibung zwischen Nadel und Holzleiste so weit zu vermindern, dass die durch die Induktionsströme verursachte Abstoßung bzw. Anziehung seine sichtbare Bewegung zur Folge hat. Es wäre aber auch möglich die Aluminiumringe einfach auf langen Fäden aufzuhängen und so die Lenz'sche Regel nachzuweisen.

Die oben beschriebene Versuchsanordnung geht auf den Physiker Michael Faraday zurück, der mit diesem Experiment die elektromagnetische Induktion näher erkunden wollte. Da aber der von ihm konstruierte Drehmechanismus eine zu große Reibung aufwies und der verwendete Magnet wohl zu schwach gewesen sein dürfte, blieb ihm der Erfolg versagt.

vgl. [41, p. 747f]

3.47 Nachweis von Eisen in Frühstücksflocken

Material

- eine PET-Flasche mit breitem Flaschenhals
- Frühstücksflocken, welche laut Nährwertangaben Eisen enthalten
- ein sehr starker Magnet (ev. ein Neodym-Magnet - erhältlich bei Conrad)
- ein Blatt Papier

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Eine Portion der Frühstücksflocken wird in die PET-Flasche gefüllt, indem man aus einem Blatt Papier einen Trichter rollt und durch diesen die Flocken in die Flasche schüttet. Daraufhin wird die Flasche zu zwei Dritteln mit Wasser gefüllt, der Deckel verschlossen, kräftig geschüttelt und dann für fünfzehn Minuten stehen gelassen.

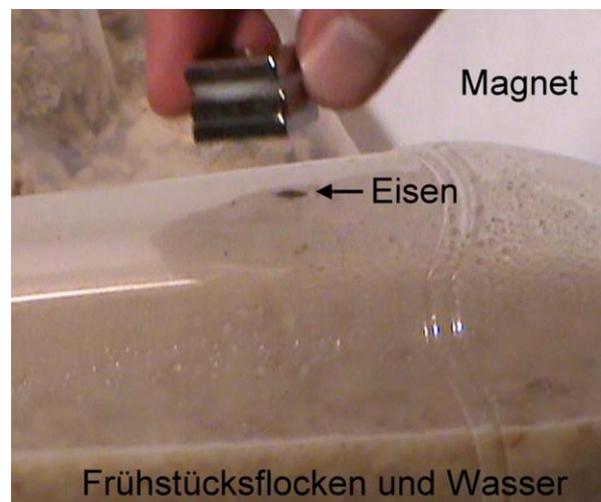


Abbildung 79: Nachweis von Eisen

Nach der Wartezeit sollte sich in der

Flasche nur noch ein dünnflüssiger Brei befinden. Die Flasche wird waagrecht gehalten und der Magnet von unten gegen die Flaschenwand gepresst. In dieser Position wird die Flasche noch einmal geschüttelt. Daraufhin dreht man, während der Magnet ständig Kontakt zur Flaschenwand hat, die Flasche um, sodass die PET-Flasche wieder waagrecht liegt, sich der Magnet aber an der Oberseite der Flasche befindet.

Hebt man den Magneten auf, so sieht man unter diesem einen dunklen Fleck, welcher den Bewegungen des Magneten folgt. Es handelt sich dabei um das den Frühstücksflocken zugesetzte Eisen.

vgl. [43]

Physikalische Erklärung

Frühstücksflocken wird in der Produktion Eisen zugesetzt. Durch das Einweichen der Flocken und das Schütteln gelingt es, dass das Eisen aus den Frühstücksflocken gelöst wird und im Wasser umher schwimmt.

Eisen ist ein ferromagnetischer Stoff. In ferromagnetischen Stoffen richten sich, wenn sie in ein magnetisches Feld gebracht werden, ihre magnetischen Momente (Elementarmagnete) parallel zur Richtung des äußeren Magnetfelds aus. Aus diesem Grund werden ferromagnetische Stoffe von Magneten angezogen.

Das passiert auch mit den umherschwimmenden Eisenpartikeln, die sich dadurch unterhalb an der Flaschenwand direkt unterhalb des Magneten absetzen. Hat sich genug Eisen angesammelt, kann man es sogar mit freiem Auge erkennen.

Optik

3.48 Brechung von Licht

Material

- eine möglichst eckige, durchsichtige Flasche
- Milch
- Streichhölzer
- ein Laserpointer

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Flasche wird bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt und das Wasser mit ein paar Tropfen Milch versetzt. Daraufhin entzündet man ein Streichholz und lässt es in der Flasche verlöschen. Dann verschließt man schnell die Flasche und hält sie horizontal. Leuchtet man in einem abgedunkelten Raum von unten bzw. von oben auf die Flasche, so sieht man, dass an der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft der Laserstrahl einen Knick hat und seine Richtung verändert.

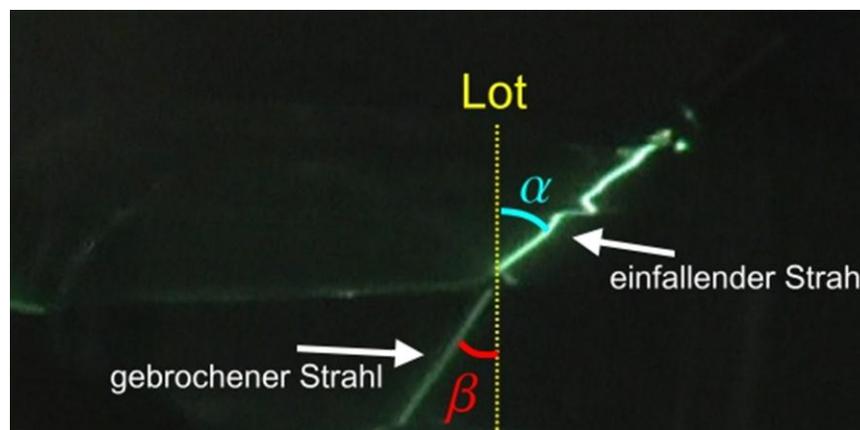


Abbildung 80: Brechung

Physikalische Erklärung

Tritt ein Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes Medium über, so kommt es zu einer Richtungsänderung des Strahls. Dieses Phänomen wird als Brechung bezeichnet.

Beim Übergang von einem optisch dünneren Medium (im Fall dieses Experiments Luft) in ein optisch dichteres Medium (Wasser) wird der Strahl zum Lot, beim

Übergang von einem optisch dichteren Medium zu einem optisch dünneren Medium vom Lot gebrochen.

Misst man den Einfallswinkel (α) und den Brechungswinkel (β), so kann daraus mithilfe des Brechungsgesetzes das Verhältnis der Brechzahlen und das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Medien berechnet werden.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3.48:1)$$

(n_1 ... Brechzahl von Luft, n_2 ... Brechzahl von Wasser, c_1 ... Lichtgeschwindigkeit in Luft,
 c_2 ... Lichtgeschwindigkeit in Wasser)

vgl. [29, p. 365]

Das Versetzen des Wassers mit Milch und das Verlöschen-lassen eines Streichholzes in der Flasche haben den Sinn, dass Störpartikel in die Luft bzw. in die Flüssigkeit gelangen. Der Laserstrahl wird zum Teil an diesen gestreut und kann dadurch vom menschlichen Auge wahrgenommen werden.

3.49 Partielle Reflexion von Licht

Material

- eine möglichst eckige, durchsichtige Flasche
- Milch
- Streichhölzer
- ein Laserpointer

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Vorbereitungen und der Ablauf dieses Experiments sind die selben wie in Abschnitt 3.48. Diesmal wird mit dem Laserpointer von oben in die Flasche geleuchtet und zwar so, dass der Strahl sich beim Auftreffen auf die Wasserfläche in zwei Lichtstrahlen teilt. Einer der Strahlen dringt ins Wasser ein, der Zweite wird von der Wasseroberfläche reflektiert.

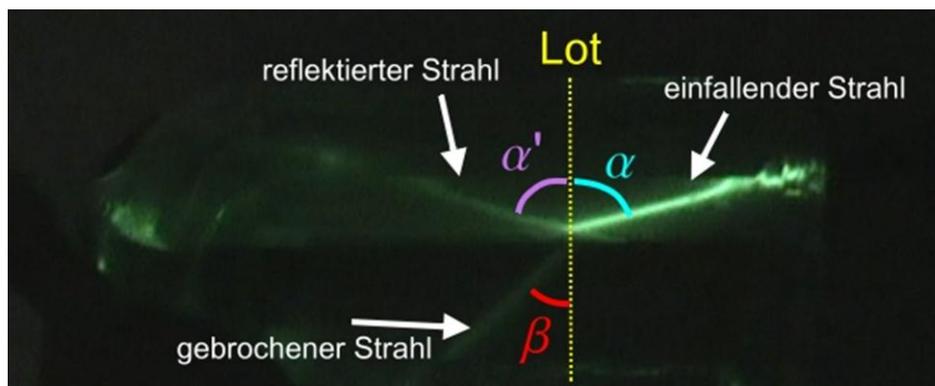


Abbildung 81: Partielle Reflexion

Physikalische Erklärung

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen einem optisch dünneren Medium (Luft) und einem optisch dichteren Medium (Wasser), so kommt es nur in seltenen Fällen dazu, dass nur Brechung oder nur Reflexion auftritt. Im Regelfall wird ein Teil des Lichtstrahls reflektiert, während der Rest in das andere Medium eindringt und gebrochen wird. Man spricht in diesem Fall von partieller Reflexion.

Auch bei der partiellen Reflexion gilt für den reflektierten Strahl das Reflexionsgesetz ($\alpha = \alpha'$) und für den gebrochenen Strahl das Brechungsgesetz (siehe Abschnitt 3.48).
vgl. [29, p. 365ff]

3.50 Totalreflexion von Licht

Material

- eine möglichst eckige, durchsichtige Flasche
- Milch
- ein Laserpointer

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Flasche wird bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt und ein paar Tropfen Milch dazugegeben. Daraufhin verschließt man die Flasche und hält sie horizontal.

In einem abgedunkelten Raum leuchtet man mit einem Laserpointer vom Flaschenboden aus in den mit Wasser befüllten Bereich der Flasche. Man sieht bei Wahl eines geeigneten Winkels, dass der Laserstrahl an der Wasseroberfläche reflektiert wird.

vgl. [41, p. 821f]

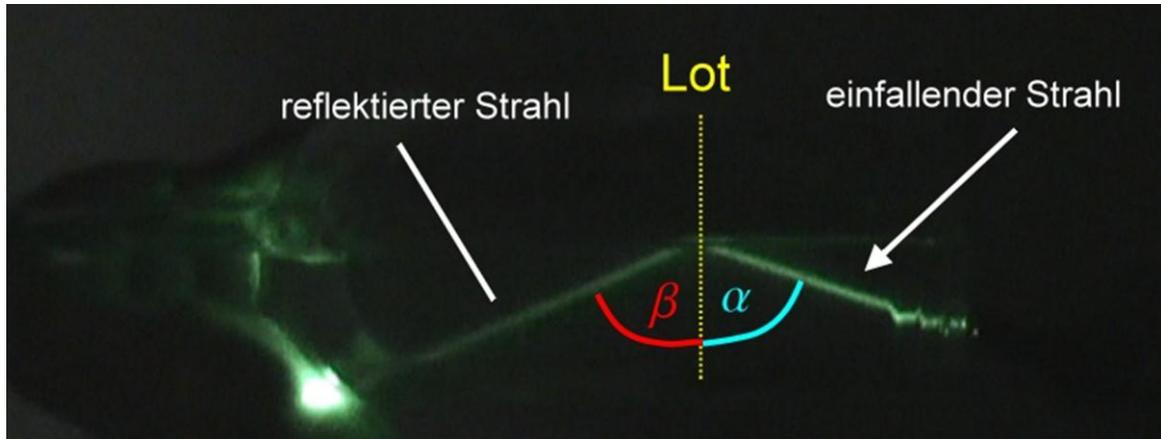


Abbildung 82: Totalreflexion

Physikalische Erklärung

Beim Übergang eines Lichtstrahls von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres kommt es ab dem Überschreiten eines bestimmten Grenzwinkels zur Totalreflexion.

In diesem Experiment wird der Übergang eines Laserstrahls von Wasser (dichteres Medium) in Luft (dünneres Medium) betrachtet. Ab einem Winkel von $48,5^\circ$ tritt in

diesem Fall Totalreflexion auf. Bei Totalreflexion gilt das Reflexionsgesetz, also sind Einfallswinkel (α) und Ausfallswinkel (β) gleich groß.

Der Grenzwinkel der Totalreflexion (α_G) gibt Aufschluss über das Verhältnis der Brechzahlen und das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Medien, bei deren Übergang die Totalreflexion stattfindet.

$$\sin\alpha_G = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3.50:1)$$

(n_1 ... Brechzahl von Wasser, n_2 ... Brechzahl von Luft, c_1 ... Lichtgeschwindigkeit in Wasser,
 c_2 ... Lichtgeschwindigkeit in Luft)

vgl. [29, p. 366]

Das Versetzen des Wassers mit ein paar Tropfen Milch dient dazu den Verlauf des Lichtstrahls im Wasser sichtbar zu machen. Das funktioniert, weil durch die Milch kleine Fetttropfchen ins Wasser gelangen, an denen das Licht gestreut wird.

Bemerkungen

Mit dem gleichen Versuchsaufbau kann man auch ein Experiment zur Streuung durchführen. Dabei leuchtet man mit einer Taschenlampe der Länge nach durch die Flasche. Blickt man von vorne in den Strahl, so sieht man, dass das Licht leicht ins Rötliche geht. Blickt man hingegen von der Seite (im rechten Winkel auf den Lichtstrahl) auf die Flasche, so sieht man eine bläuliche Färbung. Nähere Informationen dazu findet man in der Diplomarbeit von Herrn David Auer mit dem Titel „Physikalische Freihandversuche aus Optik“ eingereicht 2005 an der Karl-Franzens Universität Graz.

3.51 Totalreflexion in Wasser - ein Wasserstrahl als Lichtleiter

Material

- eine PET-Flasche
- Alufolie
- Nagel
- Laserpointer oder Taschenlampe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die PET-Flasche wird mit Alufolie umhüllt, sodass nur noch der Flaschenhals frei bleibt. Dabei kann es hilfreich sein, die Alufolie mit zwei bis drei Gummiringen an der Flasche zu fixieren. Mit dem Nagel werden die Alufolie und die Flasche ca. 5 cm oberhalb des Flaschenbodens durchstochen. An der dem Loch



Abbildung 83: Wasserstrahl als Lichtleiter

gegenüberliegenden Flaschenwand wird auf einer 2 cm² großen Fläche die Alu Folie entfernt.

Während man mit einer Hand das Loch in der Flasche zuhält, wird die Flasche bis zum Rand mit Wasser gefüllt. In einem verdunkelten Raum hebt man den Finger von der Öffnung und es tritt Wasser aus. An die Alufolie-freie Stelle an der Rückseite der Flasche hält man den Laser bzw. die Taschenlampe und leuchtet in die Flasche. Man kann beobachten, dass an jener Stelle, an der der austretende Wasserstrahl am Boden auftrifft, ein heller Fleck zu sehen ist.

Physikalische Erklärung

Die den aus der Flasche austretenden Wasserstrahl umgebende Luft hat einen geringeren Brechungsindex als Wasser. Wenn ein



Abbildung 84: Totalreflexion in einem Wasserstrahl

Lichtstrahl von Wasser in Luft übergehen will, tritt Totalreflexion auf, sofern der Grenzwinkel (α_G) der Totalreflexion (beim Übergang von Wasser in Luft $48,5^\circ$) überschritten wird.

In dem hier betrachteten Experiment fällt der Lichtstrahl sehr flach in den Wasserstrahl ein, da sich die Lichtquelle auf gleicher Höhe wie das Austrittsloch befindet. Der Grenzwinkel wird überschritten und es kommt zur Totalreflexion im Wasserstrahl. Wäre der Wasserstrahl gerade und nicht gekrümmt, würde alles Licht im Wasserstrahl totalreflektiert. Da der Strahl aber eine Krümmung aufweist, unterschreitet ein geringer Anteil des Lichts den Grenzwinkel und geht verloren. Deshalb ist die Intensität am Ende des Wasserstrahls geringer als die Intensität des einstrahlenden Lichts.

vgl. [41, p. 815ff]

Bemerkungen

Gibt man zu dem in die Flasche eingefüllten Wasser etwas Milch hinzu, so wird ein Teil des sich im Wasserstrahl befindlichen Lichts gestreut und unterschreitet den Grenzwinkel der Totalreflexion. Licht tritt aus, wodurch der gesamte Wasserstrahl von der Austrittsöffnung bis zum Auftreffpunkt sichtbar wird (Abbildung 85).

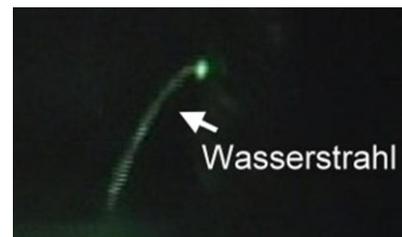


Abbildung 85:
Gestreutes Licht im Wasserstrahl

Anstelle einer mit Alufolie umwickelten Wasserflasche kann man für dieses Experiment auch eine Aluminiumdose verwenden. In diesem Fall wird an einer Seite ein Loch gebohrt, aber von oben, durch die Dosenöffnung, in die Dose geleuchtet. Das einstrahlende Licht wird an den Innenwänden der Dose reflektiert und ein Anteil des Lichts fällt so in den aus der Dose austretenden Wasserstrahl ein, dass diese Lichtstrahlen den Grenzwinkel der Totalreflexion überstreiten und im Wasserstrahl totalreflektiert werden.

3.52 Flasche als Lupe

Material

- eine durchsichtige Flasche mit rundem Querschnitt

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Flasche wird bis zum Rand mit Wasser gefüllt und verschlossen, sodass sich möglichst keine Luft mehr in ihr befindet.

Stellt man die Flasche vor mit Text bedrucktes Blatt, so bemerkt man, dass bei einem Blick durch die Flasche die Schriftzeichen deutlich vergrößert sind.

vgl. [44, p. 58]



Abbildung 86: Flasche als Lupe

Physikalische Erklärung

Eine mit Wasser gefüllte Flasche ist optisch dichter als die die Flasche umgebende Luft. Daher wirkt sie, wenn man seitlich durch den Flaschenkörper blickt, wie eine bikonvexe Linse. Der direkt hinter der Flasche aufgestellte Text befindet sich innerhalb der einfachen Brennweite,

wodurch die Flasche die Buchstaben vergrößert und wie eine Lupe wirkt.

Brennpunktstrahl, virtuelles Bild, Mittelpunktstrahl sowie das entstehende virtuelle Bild sind in Abbildung 87 dargestellt.

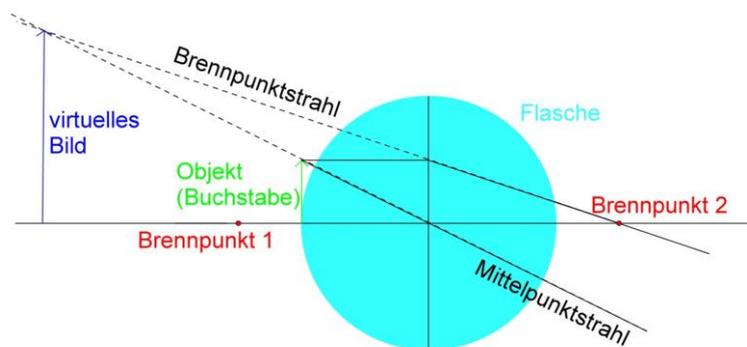


Abbildung 87: Strahlengang der Lupe

Bemerkungen

Es ist möglich, dass die durch die Flasche betrachtete Schrift, nicht scharf ist. In diesem Fall muss der Abstand zwischen Text und Flasche variiert werden.

Wärmelehre

3.53 Luftthermometer

Material

- eine große PET-Flasche (1,5 l oder 2 l)
- 5 mm Bohrer und Bohrmaschine
- ein langer, möglichst durchsichtiger Trinkhalm
- 2-Komponenten-Knetmasse (Kaltmetall) oder Plastilin
- Ostereierfarbe oder Lebensmittelfarbe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In den Verschluss der PET-Flasche wird mittig ein Loch gebohrt. Durch dieses wird der Trinkhalm soweit in die Flasche geschoben, bis sich ein Ende des Strohhalmes ca. 5 cm über den Flaschenboden befindet. Mit der 2-Komponenten-Knetmasse wird der Trinkhalm auf dieser Höhe fixiert und die Bohrung abgedichtet.

In die Flasche wird soviel mit Lebensmittelfarbe eingefärbtes Wasser gefüllt, dass das untere Ende des Strohhalmes ca. 3 cm in die Flüssigkeit eintaucht.

Verschließt man die Flasche und umfasst sie mit den Händen, so kann man beobachten, wie Wasser in den Strohhalm steigt.

vgl. [45, p. 20]



Abbildung 88:
Flaschenthermometer

Physikalische Erklärung

Der Zusammenhang zwischen Druck (p), Volumen (V) und Temperatur (T) von idealen Gasen (Gasmoleküle haben keine räumliche Ausdehnung und es kommt zu keinen Wechselwirkungen zwischen den Gasmolekülen) wird durch die Zustandsgleichung idealer Gase beschrieben:

$$pV = NkT \quad (3.53:1)$$

(N ... Anzahl der Gasmoleküle, k ... Boltzmann-Konstante)

Bei der folgenden Erklärung wird davon ausgegangen, dass sich die in der Flasche eingeschlossene Luft wie ein ideales Gas verhält. Diese Annahme trifft auf sehr viele

reale Gase näherungsweise zu, insbesondere bei niedrigen Drücken und hohen Temperaturen.

Zu Beginn des Experiments hat die in der Flasche eingeschlossene Luft die Temperatur T_1 und den Druck p_1 . Legt man nun die Hände um die Flasche, so erwärmt sich die eingeschlossene Luft und nach einer gewissen Zeit hat sie eine Temperatur T_2 und einen Druck p_2 . Das Volumen der Luft, bleibt aber während des kompletten Versuchsablaufs in etwa konstant. Somit ergibt sich aus der Zustandsgleichung idealer Gase (3.53:1) folgendes:

$$\frac{p_1 V}{p_2 V} = \frac{NkT_1}{NkT_2} \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} \quad (3.53:2)$$

Wie aus Formel (3.53:2) ersichtlich, erhöht sich der Druck in der Flasche wenn die Temperatur der Luft ansteigt. Der Druckunterschied zwischen Luftdruck außerhalb der Flasche (p_A) und Gasdruck innerhalb der Flasche (p_2) bewirkt, dass Wasser in den Strohhalm gepresst wird. Die Wassersäule im Trinkhalm steigt bis zu einer Höhe h an, sodass der hydrostatische Druck durch die Flüssigkeitssäule und der Luftdruck außerhalb der Flasche gemeinsam gleich groß sind wie der Gasdruck im Inneren der Flasche:

$$p_2 = \rho gh + p_A \quad (3.53:3)$$

(ρ ... Dichte der Flüssigkeit, g ... Erdbeschleunigung)

Wird im umgekehrten Fall die Luft innerhalb der Flasche abgekühlt, so verringert sich der Druck der Luft und die Wassersäule sinkt wieder.

vgl. [12, p. 327ff], [46]

Bemerkungen

Der gleiche Aufbau kann auch dazu benutzt werden, um ein Flüssigkeitsthermometer herzustellen. Dazu wird die Flasche bis ganz oben mit Wasser gefüllt. Erwärmt sich nun das Wasser in der Flasche, so steigt eine Wassersäule im Strohhalm, da wärmeres Wasser ein größeres Volumen einnimmt als kälteres. Dieses Experiment hat aber den Nachteil, dass sich Flüssigkeiten viel langsamer erwärmen als Gase und die Versuchsdurchführung längere Zeit dauert. Darüberhinaus haben Flüssigkeiten (insbesondere Wasser) Dichteanomalien, wodurch es schwieriger ist, eine Temperaturskala zu finden.

vgl. [46]

3.54 Volumsvergrößerung bei Erwärmung von Luft – Aufblasen eines Luftballons

Material

- eine Glasflasche
- ein Luftballon
- ein Topf mit warmem Wasser
- kaltes Wasser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Glasflasche wird mit kaltem Wasser ausgespült und der Luftballon wird über den Flaschenhals gestülpt. Daraufhin wird die Flasche in den Topf mit warmem Wasser gestellt. Nach kurzem Warten beginnt sich der Luftballon mit Luft zu füllen und aufzurichten.

vgl. [45, p. 90]



Abbildung 89:
Erwärmung von Luft

Physikalische Erklärung

Dieses Experiment ist das exakte Gegenstück zu jenem in Abschnitt 3.59.

In dem hier betrachteten Versuch wird zuerst die Luft innerhalb der Flasche abgekühlt und in einem weiteren Schritt erwärmt. Dadurch wird der Druck der Luft innerhalb der Flasche größer als der äußere Luftdruck und dieser Druckunterschied bewirkt, dass Luft aus der Flasche in den Luftballon gelangt und diesen aufbläst.

3.55 Volumsvergrößerung bei Erwärmung von Luft – der Flaschengeist

Material

- eine Glasflasche
- eine Münze (muss die Flaschenöffnung abdecken und darf nicht zu schwer sein)
- kaltes Wasser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Experiments sollte sich in der Flasche möglichst kalte Luft befinden. Um das zu erreichen, kann man die Flasche mit kaltem Wasser ausspülen oder sie in einen Kühlschrank stellen.

Der Flaschenrand der gekühlten Flasche wird mit etwas Speichel benetzt und die Münze auf die Flaschenöffnung gelegt, sodass die Öffnung vollständig verdeckt ist. Mit den Händen umfasst man den Flaschenkörper. Nach Kurzem kann man beobachten, wie sich von Zeit zu Zeit die Münze kurz hebt und dann wieder zurück auf die Flaschenöffnung fällt.



Abbildung 90:
Flaschengeist

Physikalische Erklärung

Zu Beginn dieses Experiments ist die Luft innerhalb der Flasche kalt und der Gasdruck in der Flasche ist gleich dem atmosphärischen Luftdruck außerhalb der Flasche. Durch das Umfassen des Flaschenkörpers mit den Händen kommt es zu einer langsamen Erwärmung der Luft. Wie bereits in Abschnitt 3.54 besprochen führt diese Erwärmung zu einer Volumsvergrößerung der Luft innerhalb der Flasche und der Gasdruck in der Flasche steigt an. In dem Augenblick, in dem der Druck innerhalb der Flasche größer ist als die Summe von Gewichtsdruck der Münze und äußerem Luftdruck, wird die Münze durch den Überdruck in der Flasche kurz angehoben und Luft entweicht. Der Druck innerhalb der Flasche wird dadurch wieder geringer und die Münze fällt zurück auf den Flaschenhals.

Die Luft erwärmt sich weiter und der Vorgang wiederholt sich mehrmals.

vgl. [14]

3.56 Schlagartiges Verbrennen eines Spiritus-Luft-Gemisches

Material

- eine sehr große und stabile Flasche (19-l-Trinkwasserspenderbehälter – z. B. erhältlich bei TRIPLE A <http://www.watercooler.at>)
- Spiritus
- ein langstieliges Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In die Flasche werden ca. 10 ml Spiritus gefüllt, die Spiritusflasche verschlossen und in einer Entfernung von einigen Metern abgestellt. Daraufhin schwenkt und dreht man die Flasche für ca. 1 min, sodass der Alkohol sich in der Flasche verteilt.

Das langstielige Feuerzeug wird oberhalb der Flaschenöffnung platziert und betätigt.

Innerhalb weniger Augenblicke entzündet sich das in der Flasche befindliche Spiritus-Luft-Gemisch und aus der Flaschenöffnung schießt eine Flamme.

vgl. [47]

Versucht man unmittelbar nach dem Erlöschen der Flammen das Experiment zu wiederholen, lässt sich das Spiritus-Luft-Gemisch innerhalb der Flasche nicht mehr entzünden.



Abbildung 91: Brennendes Spiritus-Luft-Gemisch

 Spiritus ist eine leichtentzündliche Flüssigkeit, wodurch es bei unsachgemäßer Verwendung zu Verbrennungen oder Bränden kommen kann. Aus diesem Grund sollte bei der Durchführung des Experiments eine Schutzbrille getragen und eine Löschdecke bzw. ein Feuerlöscher bereitgestellt werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass sich oberhalb der Flaschenöffnung keine entflammaren Materialien befinden.

Weitere Informationen über den Umgang mit gefährlichen Stoffen sind im Merkblatt M390 der Allgemeinen Unfallversicherung (AUVA) im Internet unter https://www.sozialversicherung.at/mediaDB/MMDB124509_M390.pdf abrufbar.

Physikalische Erklärung

Spiritus ist vergälltes Ethanol, das schon bei Zimmertemperatur verdampft. Durch das Schütteln und Schwenken der Flasche wird der Spiritus verteilt und ein Anteil des Alkohols verdampft. Im Flaschenkörper entsteht ein Spiritus-Luft-Gemisch, welches hoch entzündlich ist.

Zündet man das Feuerzeug oberhalb der Flaschenöffnung, werden aus der Flasche austretende Spiritus-Dämpfe entflammt. Beim Verbrennen erreicht Spiritus eine Temperatur von ca. 300 °C. Diese reicht aus, um in der Nähe befindliches Ethanol (Flammpunkt: 81 °C) zu entzünden.

Da sich das zündfähige Gemisch innerhalb der Flasche befindet, breiten sich die Flammen rasch in das Innere des Gefäßes aus. Durch die Erhöhung der Temperatur in der Flasche dehnt sich die in ihr befindliche Luft aus. Dadurch wird ein Teil des zündfähigen Gemischs durch die Flaschenöffnung nach außen verdrängt. Dieses Ethanol-Luft-Gemisch entzündet sich ebenfalls, was die aus der Flaschenöffnung austretenden Flammen erklärt.

Ist der gesamte Sauerstoff oder das gesamte Ethanol in der Flasche verbrannt, erlöschen die Flammen.

Bei einem unmittelbar folgenden Versuch das Experiment zu wiederholen, ist innerhalb der Flasche zu wenig Sauerstoff um die Verbrennung ablaufen zu lassen. Aus diesem Grund muss man vor der zweiten Versuchsausführung einige Minuten warten, sodass sich die Flasche wieder mit frischer Luft füllen kann.

Bemerkungen

Damit das Abbrennen des Spiritus-Luft-Gemisches gut sichtbar wird, sollte dieses Experiment in einem abgedunkelten Raum ausgeführt werden. Alternativ ist es auch möglich die Flamme mit Kalzium, welches man in Apotheken in Pulverform kaufen kann, einzufärben. Das gelingt, indem man nach dem Schwenken der Flasche etwas Kalzium in die Flasche gibt, wodurch die Flammen eine tief orange Färbung bekommen.

3.57 Rauch wird durch sich erwärmende Luft verdrängt

Material

- eine sehr große und stabile Flasche (19-l-Trinkwasserspenderbehälter – z. B. erhältlich bei TRIPLE A <http://www.watercooler.at>)
- eine Rauchbombe (erhältlich in Geschäften, welche pyrotechnische Utensilien verkaufen)
- Spiritus
- langstieliges Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Rauchbombe wird entzündet und durch den Flaschenhals in die Flasche geworfen. Innerhalb weniger Sekunden füllt sich der gesamte Flaschenraum mit dichtem Rauch.

Im nächsten Schritt werden ca. 10 ml Spiritus in die Flasche gegossen, der Spiritusbehälter verschlossen und in sicherer Entfernung abgestellt. Dann wird die mit Rauch gefüllte Flasche geschwenkt und geschüttelt, sodass sich der Spiritus im Flaschenkörper verteilt.

Das Feuerzeug wird über die Flaschenöffnung gehalten und entzündet. Dadurch entflammt das in der Flasche befindliche Spiritus-Luft-Gemisch (siehe Abschnitt 3.56). Ist das gesamte Spiritus Luftgemisch abgebrannt und erlöschen die Flammen, ist auch der Rauch verschwunden.
vgl. [26, p. 106]



Abbildung 92:
Rauchextraktion



Rauchbomben sollten unmittelbar nach dem Entzünden in die Flasche geworfen werden. Darüberhinaus ist es unbedingt notwendig die Sicherheitshinweise auf der Verpackung der Rauchbomben zu beachten.



Spiritus ist eine leichtentzündliche Flüssigkeit, wodurch es bei unsachgemäßer Verwendung zu Verbrennungen oder Bränden kommen kann. Aus diesem Grund sollte bei der Durchführung des Experiments eine Schutzbrille getragen und eine Löschdecke bzw. ein Feuerlöscher bereitgestellt werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass sich oberhalb der Flaschenöffnung keine entflammaren Materialien befinden.

Weitere Informationen über den Umgang mit gefährlichen Stoffen sind im Merkblatt M390 der Allgemeinen Unfallversicherung (AUVA) im Internet unter https://www.sozialversicherung.at/mediaDB/MMDB124509_M390.pdf abrufbar.

Physikalische Erklärung

Rauch ist eine Mischung aus festen und gasförmigen Bestandteilen. Die festen Bestandteile (Rauchpartikel) bewegen sich mit der sie umgebenden Luft mit.

In unserem Versuch befindet sich vor dem Anzünden ein Gemisch aus Rauchpartikeln, Ethanol und Luft in der Flasche. Wird dieses Gemisch entzündet, so steigt die Lufttemperatur schlagartig an. Aufgrund des enormen Temperaturanstiegs (von ca. 20 °C auf ca. 300 °C) vergrößert sich das Volumen der Luft in der Flasche stark. Nur noch ein geringer Teil der ursprünglichen Luft findet weiterhin im Gefäß Platz und der größte Teil wird durch den Flaschenhals verdrängt.

Während die Luftmoleküle sich aus der Flasche bewegen, nehmen sie die Rußpartikel mit, weshalb sich am Ende des Experiments kein sichtbarer Rauch mehr in der Flasche befindet.

3.58 Wärmeausdehnung von Metall

Material

- zwei gleich hohe Glasflaschen
- ca. 50 cm einer Schweißstange (Durchmesser 1 – 2 mm) oder eine Stricknadel
- eine Nadel
- Papier oder Karton
- Schere
- Zange
- Bunsenbrenner oder Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

An einem Ende der Schweißstange werden 2 cm mit der Zange im rechten Winkel abgebogen. Der abgebogene Teil wird in die Öffnung einer der Glasflaschen gesteckt, sodass er an einer Flaschenwand anliegt. Das andere Ende der Schweißstange legt man auf den Flaschenhals der zweiten Flasche.

Mit der Schere wird aus dem Karton einen Pfeil (ca. 10 cm lang) ausgeschnitten, den man auf die Nadel steckt. Die Nadel wird zwischen Schweißstange und Flaschenöffnung, auf der Seite auf der die Stange nicht abgebogen ist, eingeklemmt. Idealerweise sollte der Pfeil bei Versuchsbeginn nach oben zeigen.



Abbildung 93: Wärmeausdehnung von Metall

Erhitzt man mit dem Bunsenbrenner die Mitte der Schweißstange, so kann man beobachten, wie sich der Pfeil zu drehen beginnt. Wird der Bunsenbrenner abgestellt, so kehrt der Pfeil nach kurzer Zeit wieder in seine Ausgangsposition zurück.

Physikalische Erklärung

Metalle dehnen sich aus, wenn sie erwärmt werden. Die Längenänderung (Δl), die bei einer Temperaturänderung (ΔT) auftritt, ist abhängig von der Länge des Metallstabs (l) und dem Material aus welchem der Stab gefertigt ist.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \quad (3.58:1)$$

(α ... Längenausdehnungskoeffizient)

Da der Längenausdehnungskoeffizient sehr klein ist (Größenordnung $10^{-6} \frac{1}{K}$), ist die Längenänderung eines 50 cm langen Metallstücks beim Erhitzen mit einem Bunsenbrenner sehr gering (weniger als 1 mm). Um diese minimalen Änderungen sichtbar zu machen, wird die Anordnung aus Nadel und Pfeil verwendet. Hat die verwendete Nadel einen Durchmesser von ungefähr 1 mm und ist der Abstand der Pfeilspitze zur Nadel ca. 5 cm, würde, rechnerisch, eine Längenänderung des Drahts um nur 1 mm bewirken, dass die Spitze des Pfeils einen Kreisbogen von etwa 10 cm Länge beschreibt. Bei der Verwendung von Nadel und Pfeil mit den oben beschriebenen Abmessungen würde das Übersetzungsverhältnis also 1:100 betragen. Durch die Wahl einer dünneren Nadel bzw. Verwendung eines längeren Pfeils kann das Übersetzungsverhältnis noch vergrößert werden.

Obwohl beim realen Ausführen des Experiments die Bewegung des Pfeils geringer ist als die zuvor berechnete Bewegung, ist diese noch mit freiem Auge leicht zu erkennen.

vgl. [41, p. 578f]

3.59 Volumsverringering bei Abkühlung von Luft

Material

- eine Glasflasche
- ein Luftballon
- ein Topf mit kaltem Wasser
- heißes Wasser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Zuerst wird die Glasflasche mit heißem Wasser ausgespült. Der Luftballon wird in die Flasche gesteckt und über den Flaschenhals gestülpt. Daraufhin stellt man die Flasche in den Topf mit kaltem Wasser.

Nach kurzem Warten beginnt sich der Luftballon in der Flasche, wie von selbst, auszudehnen.

vgl. [45, p. 92]



Abbildung 94: Abkühlung von Luft

Physikalische Erklärung

Der Zustand eines Gases ist abhängig von seinem Druck (p), seiner Temperatur (T) und dem Volumen (V), welches das Gas einnimmt. Aufgrund der Zustandsgleichung für ideale Gase

$$pV = NkT \quad (3.59:1)$$

(N ... Anzahl der Gasmoleküle, k ... Boltzmann-Konstante)

verringern sich Druck und/oder Volumen eines Gases, wenn die Temperatur des Gases abnimmt.

Das Ausspülen der Flasche mit warmem Wasser bewirkt, dass sich die Luft im Inneren erwärmt. Die aufgewärmte Luft wird durch den Luftballon eingeschlossen. Stellt man dann die Flasche in das kalte Wasser, so kühlt die Luft im Inneren ab. Durch dieses Vorgehen hat sich Druck der Luft innerhalb der Flasche verringert, sodass er geringer ist als der atmosphärische Luftdruck. Dieser Druckunterschied bewirkt, dass der Luftballon in die Flasche gedrückt wird und sich dort ausdehnt.

3.60 Abkühlung von Gasen führt zu einer Verringerung des Drucks

Material

- eine Glasflasche mit breitem Hals (ev. Milchflasche)
- ein hartgekochtes, geschältes Ei
- Spiritus
- langstieliges Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Ein wenig Spiritus (ca. 3 - 5 ml) wird in die Flasche gegeben. Daraufhin wird sie für etwa eine Minute geschwenkt und gedreht, sodass sich in der Flasche ein Spiritus-Luft-Gemisch bildet. Das Feuerzeug entzündet man oberhalb des Flaschenhalses, wodurch das in der Flasche befindliche Ethanol-Luft-Gemisch schlagartig verbrennt. (siehe Abschnitt 3.56)

Nach dem Erlöschen der Flamme wird das Ei rasch auf die Flaschenöffnung gelegt, sodass diese luftdicht verschlossen ist.

Man kann beobachten, wie sich das Ei langsam durch den Flaschenhals in die Flasche bewegt und schließlich ganz in sie hineinfällt.



Abbildung 95: Ei wird in die Flasche gedrückt



Spiritus ist eine leichtentzündliche Flüssigkeit, wodurch es bei unsachgemäßer Verwendung zu Verbrennungen oder Bränden kommen kann. Aus diesem Grund sollte bei der Durchführung des Experiments eine Schutzbrille getragen und eine Löschdecke bzw. ein Feuerlöscher bereitgestellt werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass sich oberhalb der Flaschenöffnung keine entflammaren Materialien befinden.

Weitere Informationen über den Umgang mit gefährlichen Stoffen sind im Merkblatt M390 der Allgemeinen Unfallversicherung (AUVA) im Internet unter https://www.sozialversicherung.at/mediaDB/MMDB124509_M390.pdf abrufbar.

Physikalische Erklärung

Durch das Entzünden des Spiritus-Luft-Gemischs wird die in der Flasche befindliche Luft stark erwärmt. Das auf den Flaschenhals gelegte Ei verschließt diesen und verhindert, dass Gasmoleküle in die Flasche strömen können.

Mit der Zeit kühlt die Luft in der Flasche ab, was nach der Zustandsgleichung für ideale Gase eine Verringerung des Drucks in der Flasche (p) zur Folge hat.

$$pV = NkT \quad (3.60:1)$$

(N ... Anzahl der Gasmoleküle, k ... Boltzmann-Konstante, V ... Volumen, T ... Temperatur)

Durch das Abkühlen der Luft in der Flasche wird der in der Flasche herrschende Druck geringer als der atmosphärische Luftdruck. Dieser Druckunterschied bewirkt, dass das Ei ein kleines Stück in die Flasche rutscht. Dadurch verringert sich das Luftvolumen im Gefäß und der Gasdruck in der Flasche steigt an. Folglich ist der Druckunterschied zwischen Außen- und Innendruck nicht mehr so groß.

Bei weiterem Abkühlen verringert sich der Druck in der Flasche wieder, was zu einem erneuten Hineinrutschen des Eies führt.

Dieser Prozess vollzieht sich so lange, bis das Ei vollständig durch den Flaschenhals gelangt ist.

Bemerkungen

Weniger spektakulär und viel langsamer als bei der Ausführung des Experiments mit Spiritus läuft dieser Versuch ab, wenn man die Glasflasche mit heißem Wasser ausspült, dann das Ei auf den Flaschenhals legt und die Flasche in kaltes Wasser stellt. Auch in diesem Fall wird das Ei langsam in die Flasche gezogen.

3.61 Atmosphärischer Luftdruck drückt eine Flasche zusammen

Material

- eine sehr große und stabile Flasche (19-l-Trinkwasserspenderbehälter – z. B. erhältlich bei TRIPLE A <http://www.watercooler.at>)
- Spiritus
- langstieliges Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

In die Flasche werden ca. 10 ml Spiritus geschüttet, die Spiritusflasche verschlossen und in einer Entfernung von einigen Metern abgestellt. Daraufhin dreht und schüttelt man die Flasche für ca. 1 min, sodass sich der Spiritus über die Wände verteilen und verdampfen kann.

Das langstielige Feuerzeug führt man zur Öffnung der Flasche und betätigt es, wodurch sich das in der Flasche befindliche Luft-Spirit-Gemisch entzündet (siehe Abschnitt 3.56). Sobald die Flammen in der Flasche



Abbildung 96:
Implodierte Flasche

verloschen sind, wird eine Hand auf die Flaschenöffnung gelegt. Nach wenigen Augenblicken sieht man, wie sich die Flasche zu deformieren beginnt und die Flaschenwände zusammengedrückt werden.

Hebt man die Hand von der Flaschenöffnung, so nimmt das Gefäß sofort wieder seine ursprüngliche Form an.

vgl. [48]



Spiritus ist eine leichtentzündliche Flüssigkeit, wodurch es bei unsachgemäßer Verwendung zu Verbrennungen oder Bränden kommen kann. Aus diesem Grund sollte bei der Durchführung des Experiments eine Schutzbrille getragen und eine Löschdecke bzw. ein Feuerlöscher bereitgestellt werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass sich oberhalb der Flaschenöffnung keine entflammaren Materialien befinden.

Weitere Informationen über den Umgang mit gefährlichen Stoffen sind im Merkblatt M390 der Allgemeinen Unfallversicherung (AUVA) im Internet unter https://www.sozialversicherung.at/mediaDB/MMDB124509_M390.pdf abrufbar.

Physikalische Erklärung

Beim Entzünden des Spiritus-Luft-Gemischs steigt die Lufttemperatur innerhalb der Flasche schlagartig von Zimmertemperatur auf über 300 °C an. Durch die damit verbundene Volumsvergrößerung des Gases werden Luftmoleküle durch die Flaschenöffnung nach außen verdrängt.

Sind die Flammen innerhalb der Flasche erloschen, beginnt sich die Luft wieder abzukühlen. Hält man aber während des Abkühlungsvorgangs die Flaschenöffnung bedeckt, so können keine Luftmoleküle von außerhalb der Flasche in diese gelangen, weshalb der Gasdruck innerhalb der Flasche sinkt. Der Gasdruck im Gefäß wird um ein Vielfaches kleiner als der die Flasche umgebende atmosphärische Luftdruck. Diesem Druckunterschied hält die Flaschenwand nicht stand und sie wird eingedrückt.

3.62 Konvektion in Flüssigkeiten verschiedener Temperatur

Material

- vier gleiche Glasflaschen mit großer Öffnung
- gelbe und blaue Lebensmittel- oder Ostereierfarbe
- eine Spielkarte oder ein Stück Karton

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Drei der Flaschen werden mit kaltem Wasser gefüllt und mit Lebensmittelfarbe eingefärbt (zwei Flaschen mit Gelb, eine Flasche mit Blau). In der vierten Flasche mischt man blaue Farbe und warmes Wasser.

Auf eine mit gelbem Wasser gefüllte Flasche wird eine Spielkarte gelegt und mit einer Hand festgehalten. Die Flasche wird auf den Kopf gedreht und auf die mit blauem kaltem Wasser befüllte Flasche gestellt. Daraufhin wird die Spielkarte zwischen den Flaschen herausgezogen. Nachdem die Karte entfernt worden ist, sieht man, dass sich die Flüssigkeiten in den beiden Flaschen nicht miteinander vermischen (die untere Flasche bleibt blau, die obere gelb).

Mit den zwei verbliebenen Flaschen verfährt man gleich, wobei wieder die gelbe Flasche auf der Blauen zu stehen kommen sollte. Wird in diesem Fall die Spielkarte zwischen den Flaschen entfernt, so beobachtet man, dass das blaue Wasser aus der unteren Flasche in die obere strömt und Flüssigkeit aus der höher gelegenen Flasche, in die untere

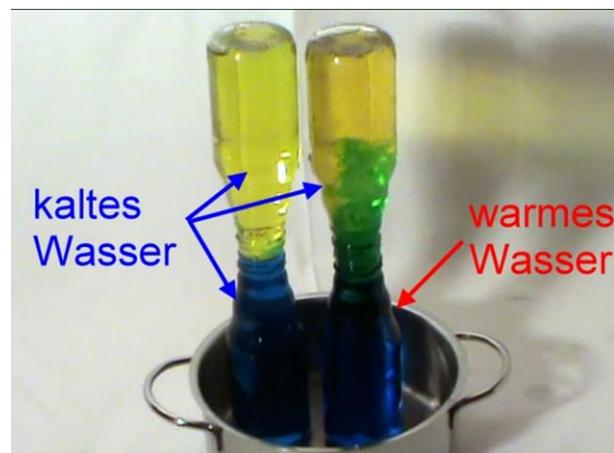


Abbildung 97: Konvektion

gelangt. Das zeigt sich dadurch, dass sich in der oberen Flasche grüne Farbe (eine Mischung aus Gelb und Blau) ausbreitet (Abbildung 97). Diese Flüssigkeitsdurchmischung geht so lange vor sich, bis in beiden Flaschen nach gewisser Zeit eine einheitlich grüne Farbe entstanden ist.

Physikalische Erklärung

Wärmetransport, der an die Strömung eines Mediums gebunden ist, nennt sich Konvektion. Konvektion findet nur in Flüssigkeiten und Gasen statt und kann durch Dichteunterschiede bei verschiedenen Temperaturen begründet werden.

vgl. [29, p. 321]

In jenem Teil des Experiments, bei dem die Flasche mit kaltem Wasser auf jene mit warmem Wasser gesetzt wird, tritt Konvektion auf. Das liegt daran, dass die Dichte von Wasser mit zunehmender Temperatur abnimmt. Deshalb liegt zu Beginn des Experiments eine Schicht von Wasser mit höherer Dichte über einer mit niedrigerer Dichte. Das warme, spezifisch leichtere, Wasser erfährt somit einen Auftrieb und steigt auf. Während des Aufsteigens in die obere Flasche durchmischen sich kaltes und warmes Wasser, was auch in der Änderung der Farbe zu sehen ist. Im gleichen Maße, wie warmes Wasser von der unteren in die obere Flasche gelangt, sinkt auch kaltes Wasser in die untere Flasche ab. Erst wenn in den Flaschen überall die gleiche Temperatur herrscht und damit auch überall die gleiche Farbe zu sehen ist, findet keine Konvektion mehr statt.

In den beiden Flaschen, die zu Beginn des Experiments aufeinander gestellt werden, befindet sich Wasser der gleichen Temperatur und daher auch gleicher Dichte. Aus diesem Grund tritt keine Konvektion auf und die Farben vermischen nur sehr langsam. In diesem Fall geschieht die Farbmischung durch Diffusion, „einem physikalischen Prozess, der zu einer gleichmäßigen Verteilung von Teilchen und somit zur vollständigen Durchmischung zweier oder mehrerer Stoffe führt.“ [49]

vgl. [50, p. 50ff]

3.63 Schmelzpunkterniedrigung von Eis durch Druck

Material

- eine 2 l Flasche (ca. halbgefüllt)
- zwei 1 l PET-Flaschen (gefüllt und verschlossen)
- ca. 30 cm dünner Draht (ev. Basteldraht)
- kantiger Eiswürfel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

An den beiden Enden des Drahtstücks werden die beiden 1 l Wasserflaschen befestigt, indem man um den Flaschenhals der Flaschen jeweils eine Drahtschleife legt und diese festzieht. Der Eiswürfel wird mittig auf der Öffnung der 2 l Flasche platziert. Sollte der Eiswürfel nicht gut auf der Flasche aufliegen und rutschen, so ist es zweckmäßig einen Flaschenkorken in die Flaschenöffnung zu stecken und den Eiswürfel auf diesen zu legen.

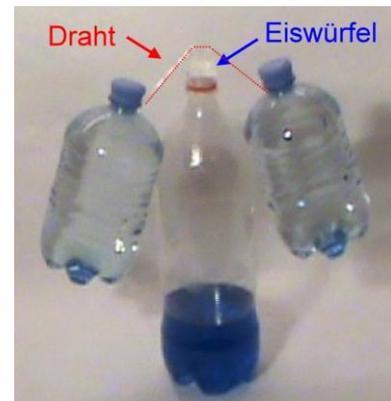


Abbildung 98:
Draht schneidet durch Eis

Im nächsten Schritt wird der Draht mit den beiden 1 l Flaschen auf die 2 l Flasche gehängt. (siehe Abbildung 98)

Schon nach kurzer Zeit kann man beobachten, wie der Draht in den Eiswürfel eindringt und diesen schließlich vollständig durchschneidet.

Physikalische Erklärung

In welchem Aggregatzustand (fest, flüssig oder gasförmig) sich ein Stoff befindet, hängt davon ab, welche Temperatur der Stoff hat und welcher Druck auf den Stoff wirkt. Diesen Zusammenhang kann man in einem sogenannten Phasendiagramm darstellen. Üblicherweise ist es so, dass flüssige Stoffe bei gleichbleibender Temperatur und gleichzeitiger Erhöhung

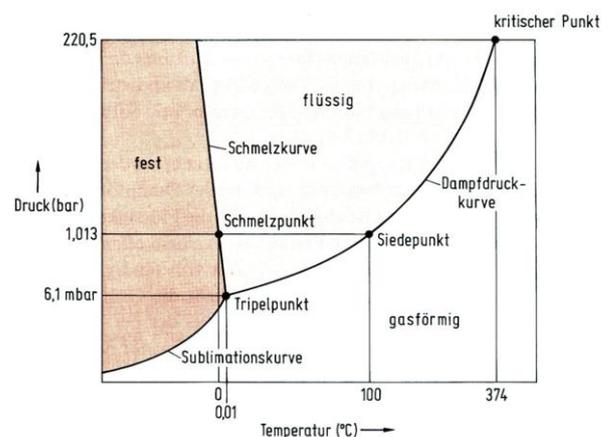


Abbildung 99: Phasendiagramm von Wasser [51]

des auf sie wirkenden Drucks in den festen Aggregatzustand übergehen.

Wie aus Abbildung 99 (Phasendiagramm von Wasser) ersichtlich, ist Wasser eine Ausnahme, da Eis bei Erhöhung des Drucks schon bei Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ schmilzt.

In diesem Experiment üben die 2 kg Masse der hängenden Wasserflaschen durch die geringe Fläche des auf dem Eiswürfel aufliegenden Drahts einen großen Druck auf den Eiswürfel aus. Dadurch erniedrigt sich der Schmelzpunkt des Eises direkt unterhalb des Drahts. Durch die Erniedrigung des Schmelzpunkts schmilzt das Eis unter dem Draht und der Draht dringt in den Eiswürfel ein. Oberhalb des Drahts herrscht aber kein erhöhter Druck mehr und die Schnittflächen des Eiswürfels frieren wieder zusammen.



Abbildung 100:
Draht im Eiswürfel

vgl. [41, p. 613], [51]

Bemerkungen

Dem hier vorgestellten Prinzip der Schmelzpunkterniedrigung von Eis durch Erhöhung des Drucks bedient man sich auch beim Eislaufen. Unter den scharfen Kufen der Schlittschuhe schmilzt das Eis und es entsteht ein Wasserfilm, auf dem der Eisläufer oder Eisläuferin gleitet.

Bei Verwendung eines dickeren Drahts gelingt dieses Experiment auch, aber dabei spielt außer der Erniedrigung des Schmelzpunkts durch den Druck die Wärmeleitfähigkeit des Drahtes eine Rolle. Der Großteil des Drahts berührt den Eiswürfel nicht. Die den Draht umgebende Luft erwärmt diesen Teil und durch die Wärmeleitfähigkeit des Metalls erwärmt sich auch jener Bereich des Drahtstücks, welcher den Eiswürfel berührt.

In diesem Fall frieren die Flächen des Eiswürfels oberhalb des Drahts aber nichtmehr zusammen.

3.64 Schmelzendes Eis führt zu keiner Veränderung des Wasserstands des umgebenden Wassers

Material

- eine 0,5 l PET-Flasche
- eine 1,5 l oder 2 l PET-Flasche
- Teppichmesser
- wasserfester Stift

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Von der 1,5 l PET-Flasche wird mit dem Teppichmesser der obere Teil so abgeschnitten, dass ein nach oben offener Zylinder übrig bleibt. In diesem Zylinder wird ca. ein halber Liter Wasser eingefüllt.

Die 0,5 l PET-Flasche wird mit Wasser befüllt und so lange in ein Gefrierfach gelegt, bis das gesamte Wasser in der PET-Flasche gefroren ist. Mit dem Teppichmesser wird die Flaschenwand aufgeschnitten, sodass man das PET-Material vom Eis trennen kann und einen großen Eisklotz erhält.

Der Eisklotz wird vorsichtig in den mit Wasser gefüllten Zylinder gegeben. Nachdem sich die Flüssigkeit beruhigt hat, markiert man mit dem Stift an der Außenseite des Zylinders die Wasserstandshöhe.

Da der Eisklotz aus dem Wasser ragt, könnte man vermuten, dass beim Schmelzen des Eises der Wasserstand im Zylinder ansteigen würde. Tatsächlich aber bleibt er gleich.

Physikalische Erklärung

Auf einen in einer Flüssigkeit befindlichen Körper wirkt ein Auftrieb (F_A), der gleich groß ist wie die Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit (siehe auch Abschnitte 3.26 und 3.27). Es gilt also für den auf einen Körper wirkenden Auftrieb:

$$F_A = V_{Fl} \rho_{Fl} g \quad (3.64:1)$$

(V_{Fl} ... verdrängtes Volumen, ρ_{Fl} ... Dichte der Flüssigkeit, g ... Erdbeschleunigung)

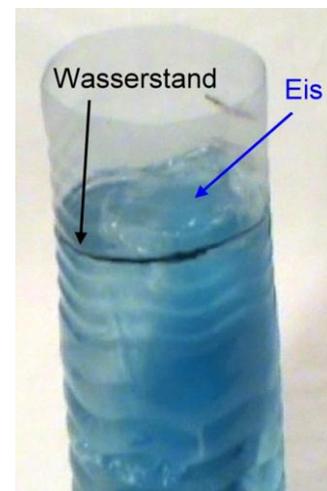


Abbildung 101: Wasserstand vor dem Schmelzen

Ist die Dichte des eintauchenden Körpers (ρ_K) geringer als die Dichte der Flüssigkeit, so schwimmt der Körper an der Oberfläche. Er taucht in diesem Fall nur so tief in die Flüssigkeit ein, bis er soviel Flüssigkeit verdrängt hat, dass das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit gleich seinem eigenen ist. Somit ist dann die Auftriebskraft gleich groß wie die Gewichtskraft (F_G) des Körpers.

$$F_G = m_K g = \rho_K V_K g \quad (3.64:2)$$

(m_K ... Masse des Körpers, ρ_K ... Dichte des Körpers, V_K ... Volumen des Körpers, g ... Erdbeschleunigung)

$$F_A = F_G \rightarrow V_{Fl} \rho_{Fl} g = \rho_K V_K g \quad (3.64:3)$$

In dem hier betrachteten Versuch ist der in die Flüssigkeit eintauchende Körper ein Eisblock. Eis hat eine geringere Dichte als Wasser, weshalb Eis an der Oberfläche schwimmt und ein Teil des Blocks aus der Wasseroberfläche ragt.

Schmilzt nun der Eisblock, so wird er zu Wasser. Nach dem archimedischen Prinzip verdrängt der Eisblock genau soviel Wasser, dass die von ihm verdrängte Flüssigkeit das gleiche Gewicht wie der

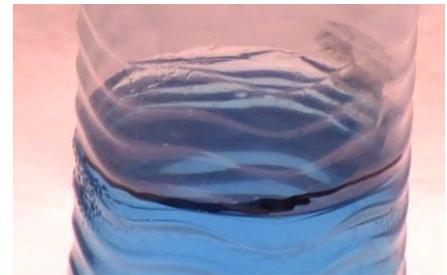


Abbildung 102:
Wasserstand nach dem Schmelzen

Eisblock selbst hat. Die Masse eines Eisblocks ist immer gleich groß wie die Masse des Wassers aus dem er besteht. Deswegen verdrängt er während des gesamten Experiments immer genau das gleiche Volumen, welches er im vollständig geschmolzenen Zustand einnehmen wird.

Aus diesem Grund bleibt der Wasserspiegel beim Schmelzen eines in Wasser schwimmenden Eisblocks konstant.

vgl. [41, p. 611]

3.65 Adiabatische Expansion führt zur Bildung von Nebel

Material

- eine PET-Flasche
- ein Autoreifenventil (erhältlich bei Reifenhändlern)
- 10 mm Bohrer und Bohrmaschine
- heißes Wasser
- Fahrradpumpe mit Druckanzeige

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Verschluss der PET-Flasche wird mit dem Bohrer mittig durchbohrt. Durch das Loch wird das Autoreifenventil geschoben und in die Bohrung gedrückt, sodass es im Deckel feststeckt. (Abbildung 103)



Abbildung 103:
Deckel mit Ventil

Man füllt heißes Wasser in die PET-Flasche, sodass es ca. 2 cm hoch steht. Daraufhin verschließt man die Flasche mit dem präparierten Verschluss und schüttelt sie für ungefähr eine halbe Minute. Anschließend wird die Fahrradpumpe mit dem Ventil verbunden und man pumpt die Flasche auf etwa 6 bar auf.

Nach dem Lösen der Fahrradpumpe vom Ventil umfasst man den Flaschendeckel fest und schraubt ihn ab. Luft entweicht und in der Flasche bildet sich deutlich sichtbarer Nebel.



Abbildung 104: Mit Nebel gefüllte Flasche



Beim Abschrauben des Flaschendeckels sollte die Flasche so gehalten werden, dass weder sie noch der Verschluss in Richtung anderer Menschen gerichtet sind. Der Überdruck in der Flasche kann, sollte der Flaschendeckel und/oder der Flaschenkörper nicht fest genug gehalten werden, dazu führen, dass diese zu gefährlichen Geschossen werden.

Physikalische Erklärung

Wasserdampf ist der gasförmige Aggregatzustand von Wasser. In der uns umgebenden Luft befindet sich immer ein gewisser Anteil von Wasserdampf. Abhängig von der Temperatur der Luft kann diese eine bestimmte Höchstmenge (Sättigungsmenge) von Wasserdampf enthalten. Je höher die Temperatur ist, umso mehr Wasserdampf kann die Luft aufnehmen (Abbildung 105).

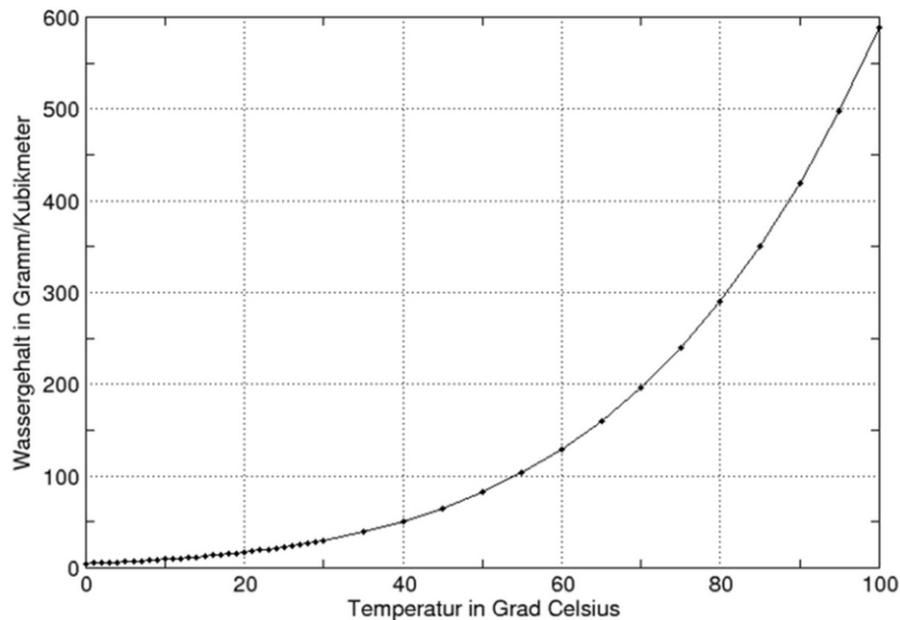


Abbildung 105: Sättigungsmenge von Wasserdampf in der Luft [52]

Wird die Sättigungsmenge überschritten, so kondensiert der Wasserdampf und bildet in der Luft fein verteilte Wassertröpfchen (Nebel). Damit eine Kondensation stattfinden kann, ist es aber nötig, dass Kondensationskeime, wie zum Beispiel Staub oder Rußpartikel, vorhanden sind.

vgl. [29, p. 278f], [52]

Durch das Einfüllen von heißem Wasser in die Flasche und das anschließende Schütteln wird der Anteil des Wasserdampfs der in der Flasche befindlichen Luft erhöht. Beim Pumpen werden Luftpartikel in das Innere der Flasche gepresst, wodurch sich der Druck in der Flasche erhöht.

Beim Öffnen des Verschlusses treibt der in der Flasche herrschende Überdruck die Luftpartikel mit hoher Geschwindigkeit aus der Flasche. Bei diesem Vorgang handelt es sich um eine adiabatische Expansion. Durch die Expansion der Luft sinkt ihre Temperatur, wodurch sie weniger Wasserdampf aufnehmen kann. Die

Sättigungsmenge wird überschritten und Wasserdampf kondensiert an in der Luft befindlichen Kondensationskeimen.

Bemerkungen

Üblicherweise sind in der uns umgebenden Luft genügend Kondensationskeime vorhanden, sodass sich Nebel bilden kann. Sollte das Experiment aber nicht gelingen, kann die Anzahl der Kondensationskeime der Luft in der Flasche erhöht werden. Dazu entzündet man ein Streichholz und lässt es in der Flasche abbrennen, wodurch die Anzahl der Rußpartikel ansteigt.

3.66 Unterkühltes Wasser

Material

- mehrere originalverschlossene Mineralwasserflaschen ohne Kohlensäure
- Tiefkühltruhe oder Kühlschrank mit Tiefkühlfach

Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die originalverschlossenen Mineralwasserflaschen werden für mehrere Stunden in ein Tiefkühlfach oder eine Gefriertruhe gelegt. Bei 0,5 l Flaschen und einer Gefrierfachtemperatur von -18 °C hat sich eine Dauer von 4 h 15 min als ideal erwiesen. Für andere Temperaturen und Wassermengen muss die Gefrierdauer individuell ermittelt werden.

Nach dem Abkühlen wird die Flasche vorsichtig aus dem Gefrierfach genommen. Nun kann das Experiment auf zwei Arten durchgeführt werden:

- Das Wasser wird in eine Schüssel gegossen: Beim Auftreffen des Wassers in der Schüssel entsteht schlagartig Eis. Mit etwas Geschick kann ein „Eisberg“ in der Schüssel entstehen, der bis in die Flasche hineinwächst.
- Die Flasche wird zusammengedrückt: Kurz nach dem Zusammendrücken gefriert das gesamte Wasser in der Flasche. Öffnet man dann die Flasche und stellt sie auf den Kopf, bemerkt man, dass kein Wasser ausfließt.

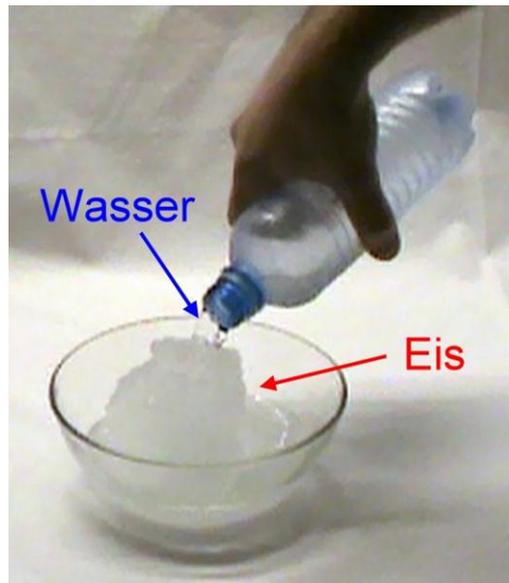


Abbildung 106: Unterkühltes Wasser – Variante a)



Abbildung 107: Unterkühltes Wasser – Variante b)

Physikalische Erklärung

Während der Lagerung des Mineralwassers im Gefrierfach wird dieses stark abgekühlt. Zum Zeitpunkt der Entnahme hat seine Temperatur ca. -7 °C . Alltägliche Erfahrungen

würden nahe legen, dass das Wasser bereits gefroren sein müsste, was es aber nicht ist. Das Phänomen, das man die Temperatur einer Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt absenken kann, ohne dass sie erstarrt, nennt sich Unterkühlung einer Flüssigkeit. Eine unterkühlte Flüssigkeit befindet sich in einem metastabilen Zustand, das heißt, dass eine einmal in Gang gesetzte Kristallisation sich spontan fortsetzt. Bis heute ist noch nicht restlos geklärt, wie es zu diesem Phänomen kommen kann.

vgl. [53]

Folgende Theorie zur Erklärung ist aber am weitesten verbreitet:

Damit Wasser gefrieren kann, müssen sich Kristallisationskeime in der Flüssigkeit befinden. Solche Keime können eine raue Oberfläche des Wasserbehälters, Verunreinigungen in der Flüssigkeit (Fremdatome, Staubpartikel, Schwebestoffe oder Ähnliches), oder Eiskristall-Embryonen sein. Unter Eiskristall-Embryonen versteht man eine „Anhäufung von Wassermolekülen in geordneter Form“ [54]. Solche Eiskristall-Embryonen bilden sich und zerfallen in einem ständigen Wechsel während Wasser flüssig ist. Hat ein Eiskristall-Embryo eine gewisse Größe überschritten, so können sich weitere Wassermoleküle an diesen anheften und er wächst. Dadurch breitet sich die kristalline Struktur des Embryos immer weiter aus, bis das gesamte Wasser gefroren ist.

In diesem Experiment verwendet man Mineralwasser, welches sehr rein ist. Daher mangelt es an Kristallisationskeimen und das Wasser friert nicht bei 0 °C. Schüttet man nun das Wasser in die Schüssel, so können in der Schüssel befindliche Partikel, die Oberfläche der Schüssel oder durch den Aufprall auf die Schüssel erzeugte Eiskristall-Embryonen als Keime dienen und das Wasser friert.

In der zweiten Variante der Ausführung des Experiments werden durch das Zusammendrücken der Flasche Eiskristall-Embryonen erzeugt, die das Frieren des Wassers auslösen.

Bemerkungen

Bei der Durchführung dieses Experiments ist es sinnvoll mehrere Flaschen (3 – 4 Stück) gleichzeitig in das Kühlfach zu legen, da es vorkommen kann, dass das Wasser in der einen oder anderen Flasche vorzeitig friert oder das Experiment schon während des Entnehmens der Flasche aus dem Gefrierfach, durch Vibration ausgelöst, abläuft.

Unter Laborbedingungen ist es möglich Wasser auf bis unter -40 °C abzukühlen, ohne dass es erstarrt. Aber auch in unserer Umwelt kommen wir gelegentlich mit diesem Phänomen in Kontakt. Ein besonders eindrucksvolles und gefährliches Beispiel ist Eisregen (Blitzeis). In hohen



Abbildung 108: Eisregen [56]

Atmosphärenschichten gibt es nur geringe Mengen an Kristallisationskeimen. Dadurch kann Wasser in Wolken weit unter den Gefrierpunkt abkühlen, ohne dass es zur Eisbildung kommt. Regnet es nun und trifft dieses unterkühlte Wasser auf ein Hindernis (zum Beispiel eine Straße) so friert es schlagartig, was zu einer sehr glatten Eisschicht auf dem Hindernis führt. Im Straßenverkehr haben solche Eisregenschauer oft Unfälle zur Folge, da sich die Fahrverhältnisse innerhalb von Sekunden verändern. vgl. [53], [54], [55]

4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Holzstütze zur Schwerpunktsunterstützung	11
Abbildung 2: Unterstützung des Schwerpunkts.....	12
Abbildung 3: Schwerpunkt links von der Drehachse und daraus resultierendes Drehmoment.....	14
Abbildung 4: Gleichgewichtslage	15
Abbildung 5: Rücktreibendes Moment bei Auslenkung aus der Gleichgewichtslage.....	16
Abbildung 6: Trägheit einer Münze - Vorbereitung	17
Abbildung 7: Trägheit einer Flasche	18
Abbildung 8: Am Wollfaden hängende Flasche	20
Abbildung 9: Abbrechen des Flaschenbodens	22
Abbildung 10: Vakuubläschen [16]	23
Abbildung 11: Entkorken einer Weinflasche ohne Korkenzieher	24
Abbildung 12: Wasserrad	26
Abbildung 13: Wasserrad – Erklärung.....	27
Abbildung 14: Schlauchstück	28
Abbildung 15: Hahnstück	29
Abbildung 16: Startvorrichtung.....	29
Abbildung 17: Raketenflügel	30
Abbildung 18: Startklare Rakete	30
Abbildung 19: Entweichen der Luft.....	33
Abbildung 20: Einrichten des Korkens	35
Abbildung 21: Am Plastiksack haftender Korken	36
Abbildung 22: Wasserstrahl während des freien Falls.....	37
Abbildung 23: Vertikale Kraftkomponente	40
Abbildung 24: Flaschen in Rotation	41
Abbildung 25: Verschluss (Ober- und Unteransicht).....	43
Abbildung 26: Rotationsparaboloid	44
Abbildung 27: Flasche im Sicherheitskäfig.....	45
Abbildung 28: Flasche bei ca. 9 bar.....	46
Abbildung 29: Flasche bei ca. 15 bar.....	46
Abbildung 30: Zerstörer Schutzkäfig und Flaschenteile	47
Abbildung 36: Verschiedene Austrittswinkel der Strahlen	48
Abbildung 31: Flaschenverbindungsstück.....	50
Abbildung 32: Flaschentornado	51
Abbildung 33: Vergleich der Ausströmgeschwindigkeiten	52

Abbildung 34: Löchrige Flasche verschlossen	53
Abbildung 35: Löchrige Flasche unverschlossen	54
Abbildung 37: Wasser kann nicht in die Flasche rinnen	56
Abbildung 38: Luft verdrängt das Wasser	58
Abbildung 39: Taucherglocke [27]	59
Abbildung 40: Aufbau des U-Boot-Modells	60
Abbildung 41: U-Boot während des Aufsteigens	61
Abbildung 42: Taucher Variante b)	63
Abbildung 43: Kartesianische Taucher	64
Abbildung 44: Flüssigkeiten verschiedener Dichte	65
Abbildung 45: Verschluss auf Höhe der Grenzschicht	67
Abbildung 46: Aufsteigen des Öls	69
Abbildung 47: Rosine beim Aufsteigen	70
Abbildung 48: Auf- und absteigende Wassertropfen.....	71
Abbildung 49: Kohlendioxid haftet an Wassertropfen.....	72
Abbildung 50: Aufbau des Heronschen Brunnens	73
Abbildung 51: Heronscher Brunnen.....	74
Abbildung 52: Goethebarometer - Verschluss.....	76
Abbildung 53: Goethebarometer	76
Abbildung 54: U-Rohr-Manometer Druck von unten	79
Abbildung 55: U-Rohr-Manometer Druck von der Seite.....	79
Abbildung 56: Druckgleichheit	80
Abbildung 57: Unterschiedliche Drücke.....	81
Abbildung 58: Versuchsaufbau	82
Abbildung 59: Druckunterschiede abhängig von der Eintauchtiefe	82
Abbildung 60: Wasserfontäne.....	84
Abbildung 61: Verbundene Gefäße.....	85
Abbildung 62: Siphon	87
Abbildung 63: Prinzip eines Saughebers	88
Abbildung 64: Kippschwingung	89
Abbildung 65: Atmosphärischer und hydrostatischer Druck	91
Abbildung 66: Wassersäule.....	92
Abbildung 67: Luftballon in der Flasche.....	94
Abbildung 68: Ballon aufgeblasen.....	96
Abbildung 69: Mit Mentos befüllte Spritze.....	97

Abbildung 70: Stark vergrößerte Mentos-Oberfläche [38].....	98
Abbildung 71: Austreiben des Getränks.....	98
Abbildung 72: Vortexringe	100
Abbildung 73: Entstehung eines Vortexrings [39].....	101
Abbildung 74: Sich fortbewegender Wirbelring [40]	101
Abbildung 75: Tonhöhen.....	102
Abbildung 76: Schwingende Luftsäulen verschiedener Länge.....	103
Abbildung 77: Nachweis der Lenz'schen Regel.....	104
Abbildung 78: Induktionsstrom in einem Ring bei Annäherung eines Magneten [42, p. 142].....	105
Abbildung 79: Nachweis von Eisen	107
Abbildung 80: Brechung.....	109
Abbildung 81: Partielle Reflexion.....	111
Abbildung 82: Totalreflexion.....	112
Abbildung 83: Wasserstrahl als Lichtleiter.....	114
Abbildung 84: Totalreflexion in einem Wasserstrahl.....	114
Abbildung 85: Gestreutes Licht im Wasserstrahl.....	115
Abbildung 86: Flasche als Lupe	116
Abbildung 87: Strahlengang der Lupe.....	116
Abbildung 88: Flaschenthermometer	117
Abbildung 89: Erwärmung von Luft	119
Abbildung 90: Flaschengeist.....	120
Abbildung 91: Brennendes Spiritus-Luft-Gemisch	121
Abbildung 92: Rauchextraktion.....	123
Abbildung 93: Wärmeausdehnung von Metall	125
Abbildung 94: Abkühlung von Luft.....	127
Abbildung 95: Ei wird in die Flasche gedrückt	128
Abbildung 96: Implodierte Flasche	130
Abbildung 97: Konvektion	132
Abbildung 98: Draht schneidet durch Eis.....	134
Abbildung 99: Phasendiagramm von Wasser [51].....	134
Abbildung 100: Draht im Eiswürfel	135
Abbildung 101: Wasserstand vor dem Schmelzen.....	136
Abbildung 102: Wasserstand nach dem Schmelzen	137
Abbildung 103: Deckel mit Ventil.....	138
Abbildung 104: Mit Nebel gefüllte Flasche	138

Abbildung 105: Sättigungsmenge von Wasserdampf in der Luft [52]	139
Abbildung 106: Unterkühltes Wasser – Variante a).....	141
Abbildung 107: Unterkühltes Wasser – Variante b).....	141
Abbildung 108: Eisregen [56]	143

5 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur, "Lehrplan Physik für die AHS-Unterstufe," [Online].
Available: <http://www.bmukk.gv.at/medienpool/791/ahs16.pdf>.
[Accessed 06 05 2012].
- [2] Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur, "Lehrplan Physik für die AHS-Oberstufe," [Online].
Available: http://www.bmukk.gv.at/medienpool/11862/lp_neu_ahs_10.pdf.
[Accessed 06 05 2012].
- [3] "Skriptum zur Vorlesung Didaktik der Physik II - Universität Regensburg," 1992. [Online].
Available: http://www.uni-augsburg.de/studium/vertretung/fsphysik/studium/Skripte/Didaktik_der_Physik_1.pdf.
[Accessed 06 05 2012].
- [4] D. Auer, Physikalische Freihandversuche aus Optik, Graz: Technische Universität Graz - Institut für Experimentalphysik, 2005.
- [5] H. Hahn, Physikalische Freihandversuche, Berlin: Verlag von Otto Salle, 1905.
- [6] W. Heyder, Die Stellung des Freihandversuchs im System der Experimente des Physikunterrichts und seine Bedeutung für die Entwicklung des Erkenntnisvermögens der Schüler, Rostock: Universität Rostock, 1967.
- [7] B. Korn, Der Freihandversuch und seine didaktische Bedeutung für den Physikunterricht in der Sekundarstufe I, Netphen: Universität GH Siegen, 1981.
- [8] H. J. Schlichting, "Freihandversuche - Probleme und Möglichkeiten experimenteller Minimalversuche (Artikel aus Physik in der Schule 34/4, 141 - 146; 1996)," [Online].
Available: http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/freihand_minimlaversuche.pdf.
[Accessed 07 05 2012].

- [9] "Educational Innovations," [Online].
Available: <http://www.teachersource.com/Physics/MassAndCenterofGravity/SodaBottleIllusion.aspx>.
[Accessed 22 12 2011].
- [10] W. Rentzsch, Experimente mit Spaß - Bewegung und Kräfte, Wien: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, 1995.
- [11] Berthold, Christ, H. Braam, Herfert, Hilscher, Kraus and Möller, "Physikalische Freihandexperimente Band 1," Köln, Aulis Verlag Deubner, 2006.
- [12] H. Jäger and W. Ernst, Skriptum zur Vorlesung Experimentalphysik 1, Graz: Institut für Experimentalphysik: Technische Universität Graz, 2005.
- [13] H. Stroppe, Formeln und Sätze der Physik, München: Carl Hanser Verlag, 1991.
- [14] G. Pottlacher, *Vorlesung Schulversuche II*, Graz, 2009.
- [15] "youtube - Breaking the Bottom Out of a Glass Bottle," [Online].
Available: http://www.youtube.com/watch?v=hVDi_XRzjFM.
[Accessed 01 05 2012].
- [16] "youtube - Time Warp Bottle," [Online].
Available: <http://www.youtube.com/watch?v=cOeNxkksruo>.
[Accessed 09 05 2012].
- [17] "youtube - Wie man einen Korke aus einer Flasche bekommt," [Online].
Available: http://www.youtube.com/watch?v=IKqSfHrK_bo.
[Accessed 28 04 2012].
- [18] "Sächsischer Bildungsserver," [Online].
Available: <http://marvin.sn.schule.de/~physik/gase/g12.php#oben>.
[Accessed 26 03 2012].
- [19] "Wikipedia - Berstdruck," [Online].
Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Berstdruck>.
[Accessed 03 05 2012].
- [20] P. Fleißner, "Physikalische Freihandversuche zu Hydrostatik und Hydrodynamik," Graz, Karl-Franzens-Universität Graz, 2007.

- [21] "Steve Sprangler Science - Tornado in a Bottle," [Online].
Available: <http://www.stevespranglerscience.com/content/experiment/tornado-in-a-bottle>.
[Accessed 11 02 2012].
- [22] S. Spangler, Naked Eggs And Flying Potatoes (Kindle Edition), Austin, Texas: Greenleaf Book Group LLC , 2010.
- [23] W. Demtröder, Experimentalphysik 1, Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [24] "physiktreff.de," [Online].
Available: <http://www.physiktreff.de/material/physreg/physreg1.htm>.
[Accessed 01 05 2012].
- [25] "Wikipedia - Tenside," [Online].
Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Tenside>.
[Accessed 01 05 2012].
- [26] W. Rentzsch, Experimente mit Spaß - Hydro- und Aeromechanik Akustik, Wien: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, 1995.
- [27] "Wikipedia - Taucherglocke," [Online].
Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Taucherglocke>.
[Accessed 01 05 2012].
- [28] R. Kay, Was soll ich heute tun? Tricks mit Physik, Hamburg: Neuer Tesseloff Verlag, 1974.
- [29] H. Kuchling, Taschenbuch der Physik 18. Auflage, Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [30] "Wikipedia - U-Boot," [Online].
Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/U-Boot>.
[Accessed 19 02 2012].
- [31] "KBismarck - The Battleship Bismarck," [Online].
Available: <http://www.kbismarck.com/u-boot/uphysik-grundlagen.htm>.
[Accessed 19 02 2012].

- [32] R. Wodzinski, "Institut für Physik der Universität Kassel," [Online].
Available: <http://www.physik.uni-kassel.de/did/gs/Cartesischer%20Taucher.htm>.
[Accessed 26 03 2012].
- [33] M. O'Hare, Wie man mit einem Schokoriegel die Lichtgeschwindigkeit misst, Frankfurt am Main: Fischer Verlag GmbH, 2009.
- [34] "Make: technology on your time," [Online].
Available: <http://blog.makezine.com/2008/06/08/build-herons-fountain-1/>.
[Accessed 14 02 2012].
- [35] "Universität Münster," [Online].
Available: http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/goethe_barometer.pdf.
[Accessed 21 02 2012].
- [36] "Technik Lexikon - Kippschwingung," [Online].
Available:
<http://www.techniklexikon.net/d/kippschwingung/kippschwingung.htm>.
[Accessed 02 05 2012].
- [37] "Wikipedia - Kippschwingung," [Online].
Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kippschwingung>.
[Accessed 02 05 2012].
- [38] "youtube - Diet Coke & Mentos," [Online].
Available: <http://www.youtube.com/watch?v=LjbJELjLgZg>.
[Accessed 03 05 2012].
- [39] "Universität Stuttgart - Physikalisches Institut," [Online].
Available: <http://www.pi1.physik.uni-stuttgart.de/teaching/Vorlesungsversuche/V334.html>.
[Accessed 02 05 2012].
- [40] "Mahidol Physics Education Centre," [Online].
Available: <http://mpec.sc.mahidol.ac.th/radok/phismath/physics/f3.htm>.
[Accessed 02 05 2012].
- [41] Berthold, Christ, Braam, Haubrich, Hefert, Hilscher, Kraus and Möller, Physikalische Freihandexperimente: Band 2, Köln: Aulis Verlag Deubner, 2006.

- [42] H. Jäger and W. E. Ernst, Skriptum zur Vorlesung Experimentalphysik 2, Graz: Institut für Experimentalphysik: Technische Universität Graz, 2006.
- [43] "Steve Sprangler Science - Eating Nails for Breakfast," [Online].
Available: <http://www.stevespranglerscience.com/content/science-video/eating-nails-for-breakfast>.
[Accessed 02 05 2012].
- [44] W. Rentzsch, Experimente mit Spaß - Optik, Wien: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, 2005.
- [45] W. Rentzsch, Experimente mit Spaß - Wärme, Wien: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, 1995.
- [46] "Portal - TU Graz," [Online].
Available: <http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i51110/files/Lehre/Praktika/GP1/Vorbereitung/Luftthermometer.pdf>.
[Accessed 09 04 2012].
- [47] "youtube - Water Cooler Bottle Methanol Fireball," [Online].
Available: <http://www.youtube.com/watch?v=98JuJ-G1qXY&feature=endscreen&NR=1>.
[Accessed 02 05 2012].
- [48] "Steve Sprangler Science - Whoosh Bottle Science," [Online].
Available: <http://www.stevespranglerscience.com/content/science-video/whoosh-bottle-science>.
[Accessed 02 05 2012].
- [49] "Wikipedia - Diffusion," [Online].
Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion>.
[Accessed 02 05 2012].
- [50] S. Sprangler, "Fire Bubbles and Exploding Toothpaste," Austin, Breenleaf Book Group Press, 2012.
- [51] "Universität Freiburg," [Online].
Available: <http://portal.uni-freiburg.de/fkchemie/lehre/grundvorlesung/uebungen/stunde6/pdwasser/view>.
[Accessed 11 04 2012].

- [52] "Wikipedia - Sättigung," [Online].
Available: [http://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4ttigung_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4ttigung_(Physik)).
[Accessed 01 05 2012].
- [53] "PhysOrg.com," [Online].
Available: <http://www.physorg.com/news191068504.html>.
[Accessed 16 02 2012].
- [54] "Universität Hohenheim," [Online].
Available: <https://www.uni-hohenheim.de/lehre370/weinbau/praktikum/eisnuk.htm>.
[Accessed 16 02 2012].
- [55] "Wikipedia - Unterkühlung (Thermodynamik)," [Online].
Available: [http://de.wikipedia.org/wiki/Unterk%C3%BChlung_\(Thermodynamik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Unterk%C3%BChlung_(Thermodynamik)).
Accessed 16 02 2012].
- [56] "noows Nachrichten," [Online].
Available: http://www.noows.de/gallery/einzelbilder/panorama/Eisregen_dapd_Felix_Abraham.jpg.
[Accessed 16 02 2012].