

PHYSIKALISCHE EXPERIMENTE MIT WASSER

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften

eingereicht an der
Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Claudio Alexander REDDY

am Institut für Experimentalphysik
an der Technischen Universität Graz

Begutachter: Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Gernot Pottlacher

Graz, 2019

Diese Seite wurde aus formatierungstechnischen Gründen freigelassen.

Für nähere Informationen siehe Kapitel 3 "Experimenteller Hauptteil".

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Graz, im Mai 2019

Unterschrift: _____

Diese Seite wurde aus formatierungstechnischen Gründen freigelassen.

Für nähere Informationen siehe Kapitel 3 "Experimenteller Hauptteil".

DANKSAGUNG

„Nur ein Narr macht keine Experimente.“

Charles Darwin

Schon Charles Darwin erkannte die Wichtigkeit von Experimenten. Aus meiner Sicht, der eines zukünftigen Physiklehrers, sind Experimente ein unverzichtbares Werkzeug um SchülerInnen naturwissenschaftliche Phänomene verständlicher zu machen. Experimente in der Schule dienen nicht nur dazu einen Unterrichtsstoff zu verdeutlichen, vielmehr sollen die SchülerInnen für die Naturwissenschaft begeistert werden und zum eigenständigen Denken angeregt werden. Ich bin sehr dankbar dafür, dass ich mit dieser Diplomarbeit die Gelegenheit bekomme ein Werkzeug zu erstellen, welches ich in meiner weiteren Berufslaufbahn noch häufig benutzen kann.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Gernot Pottlacher recht herzlich bedanken. Ich bin besonders dankbar für seine vielen Hinweise sowie Ratschläge, welche mir sehr bei der Bearbeitung meiner Diplomarbeit halfen.

Der größte Dank gilt jedoch meinen Großeltern, Helmut und Stefanie. Hätten sie mich nicht großgezogen, wäre ich sicher nicht dort wo ich heute stehe. Sie haben auf so vieles verzichtet um mir und meinem Bruder ein anständiges Leben zu ermöglichen. Auch heute stehen sie mir noch tatkräftig zur Seite und unterstützen mich moralisch. ***Danke, ohne euch wäre all das niemals möglich geworden.***

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Freundin Anna bedanken, die mir viel Geduld und Hilfsbereitschaft bei den Experimenten entgegengebracht hat. Meinen Brüdern Mario und Pierce möchte ich auch an dieser Stelle danken, sie begleiteten und bestärkten mich stets.

KURZFASSUNG

Bei der vorliegenden Diplomarbeit steht das Thema Wasser im Mittelpunkt. Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in einen theoretischen sowie einen experimentellen Teil. Durch allgemeine Informationen zum Thema Wasser, wie das Wasservorkommen auf der Erde und Wasserknappheit soll ein einführendes Grundlagenwissen sowie die Wichtigkeit von Wasser als Ressource vermittelt werden. Insbesondere werden zudem physikalische Eigenschaften von Wasser auf molekularer Ebene beschrieben. Den anschließenden Hauptteil der Arbeit bilden 93 Experimente, unterteilt in die Themenbereiche *Mechanik*, *Wärmelehre*, *Optik*, *Akustik* sowie *Elektrik*. In diese Themenbereiche führen theoretische Kapitel ein, gefolgt von einer Beschreibung des Experimentes sowie einer physikalisch aufgearbeiteten Erklärung dessen. Neben aussagekräftigen Fotos der selbst durchgeführten Experimente soll ein eigens erstellter Online-Videokanal für zusätzliche Nachvollziehbarkeit sorgen.

Ziel der verfassten Arbeit ist es, Personen im Bildungsbereich anzusprechen und ihnen geeignetes Anschauungsmaterial für den Physikunterricht oder auch zur privaten Verwendung zur Verfügung zu stellen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Verständlichkeit der behandelten Themen gelegt. Die Grundidee dabei ist es, dass sämtliche Experimente auch für Personen ohne physikalisches Grundwissen verständlich sind. Darüber hinaus bieten die theoretische Einführung sowie die physikalische Betrachtung der Experimente zudem einen Mehrwert für bereits erfahrene Personen auf diesem Gebiet, wodurch die Arbeit insgesamt für ein breites Publikum geeignet ist.

Schlagwörter: Physikalische Experimente, Wasser, Pädagogik

ABSTRACT

This thesis focuses on the topic of water, where a theoretical and an experimental part are distinguished. Through general information on the topic of water, such as existing water resources and the problem of water scarcity, both an introductory basic knowledge and the importance of water as a resource shall be conveyed. Furthermore, also the physical properties of water at the molecular level are described within this first theoretical part. The consecutive main part of the thesis consists of 93 experiments, divided into the subject areas *mechanics*, *thermodynamics*, *optics*, *acoustics* and *electrics*. Relevant chapters start with a short theoretical introduction, followed by a description as well as a physically elaborated explanation of the respective experiment itself. In addition to expressive photos of the experiments carried out, a purpose-built online video channel shall provide additional traceability.

The aim of the written work is to address people in the field of education and to provide them with suitable visual material for teaching purposes within physics lessons as well as for own private use. Particular attention was paid to the comprehensibility of the topics covered: all experiments are explained in an understandable matter, even for people without basic physical knowledge. Additionally, the theoretical introduction as well as the physical approach of describing the experiments offer an added value for already experienced individuals in this field, which makes the work suitable for a broad audience.

Keywords: physical experiments, water, education

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Hintergrund zum Thema Wasser	3
2.1	Informationen zu Wasser	3
2.2	Wasser im Detail	5
2.2.1	Das Wassermolekül	5
2.2.2	Aggregatzustände von Wasser und deren Phasenübergänge	10
3	Experimenteller Hauptteil.....	14
3.1	Versuche zur Mechanik.....	16
3.1.1	Oberflächenspannung	16
[1]	Die Haftwirkung von Wasser	18
[2]	Oberflächenspannung von Wasser	20
[3]	Der verknotete Wasserstrahl.....	22
[4]	Der trockene Tauchgang.....	24
[5]	Der sich anscheinend aufwärtsbewegende Ball	26
[6]	Die farbige Kreide	28
[7]	Minimalflächen bei Seifenblasen	30
[8]	Innendruck von Seifenblasen	34
3.1.2	Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen	36
[9]	Das Druckausbreitungsgerät.....	40
[10]	Hydraulik	42
[11]	Die tauchende Kerze.....	44
[12]	Der scheinbar verstopfte Trichter	46
[13]	Tornado in der Flasche	48
[14]	Das hydrostatische Paradoxon.....	50
[15]	Der hydrostatische Druck	52
[16]	Das U-Rohr-Manometer	54
[17]	Druckdose mit U-Rohr-Manometer.....	56
[18]	Den Luftdruck wegsperren	58

[19]	Der Luftdruck hält Wasser	60
[20]	Der Luftdruck bringt das Wasser zum Überlaufen	62
[21]	Pythagoreischer Trinkbecher.....	64
[22]	Der Heronsbrunnen.....	66
3.1.3	Das Archimedische Prinzip.....	68
[23]	Die Mohrsche Waage.....	70
[24]	Ein Stein im Boot.....	72
[25]	Das schmelzende Eis.....	74
[26]	Der nichtschwimmende Tischtennisball.....	76
[27]	Das schwimmende Öl	78
[28]	Kartesischer Taucher	80
3.1.4	Gravitation.....	82
[29]	Alle Körper fallen gleich schnell.....	84
[30]	Aufhebung des Schweredrucks.....	86
[31]	Mit Hilfe von Wasser höher springen.....	88
3.1.5	Strömungen	90
[32]	Laminare und turbulente Strömungen	94
[33]	Bernoulli-Versuch.....	96
[34]	Wasserstrahlpumpe	98
[35]	Der schwebende Tischtennisball.....	100
[36]	Kurve unter Wasser	102
[37]	Strömungswiderstandskoeffizient.....	104
[38]	Zerschlagen einer Flasche mit bloßer Hand.....	106
3.1.6	Drehbewegungen und Scheinkräfte	108
[39]	Zentripetal- und Zentrifugalkraft	110
[40]	Wasser als Parabel	112
[41]	Segnersches Wasserrad	114
3.2	Versuche zur Wärmelehre.....	116
3.2.1	Anomalie des Wassers.....	116
[42]	Ein fester Zustand, der schwimmt	118

[43]	Der Kaltwasserschwimmer	120
[44]	Größte Dichte bei 4°C	122
[45]	Ausdehnung von Eis	124
3.2.2	Wärmeübertragung	126
[46]	Der Farbvulkan.....	130
[47]	Trennung von Wasser aufgrund von Wärme	132
[48]	Das Konvektionsrohr	134
[49]	Wasser ist ein schlechter Wärmeleiter	136
[50]	Wasser als Wärmeleiter	138
[51]	Absorption von Wärme.....	140
3.2.3	Wärmeausdehnung von Körpern.....	142
[52]	Dichteparadoxon	142
3.2.4	Diffusion	144
[53]	Brown'sche Bewegung.....	146
[54]	Diffundierendes Helium	148
3.2.5	Gasgesetze.....	150
[55]	Eine Münze trockenlegen.....	154
[56]	Die implodierte Dose	156
[57]	Temperaturveränderungen und der Luftballon	158
3.2.6	Phasenübergänge.....	160
[58]	Wasser durch kaltes Wasser zum Kochen bringen	162
[59]	Siedendes Wasser bei Raumtemperatur	164
[60]	Das Kryophor	166
[61]	Das Hypsometer	168
[62]	Die trinkende Ente.....	170
[63]	Kältemischung.....	172
[64]	Der Leidenfrost-Effekt	174
[65]	Der Mpemba-Effekt.....	176
3.2.7	Wirkung von Siede- und Kristallisationskeimen	178
[66]	Der Siedeverzug	178

[67]	Unterkühltes Wasser	180
[68]	Gefrorene Seifenblasen	184
3.2.8	Wasser und Feuer	186
[69]	Unter Wasser brennender Sternspritzer	186
[70]	Brennender Schaum	188
3.3	Versuche zur Optik	190
3.3.1	Reflexion, Brechung und Absorption	190
[71]	Lichtbrechung und Lichtreflexion	194
[72]	Der gebogene Lichtstrahl	196
[73]	Die unter Wasser brennende Kerze	198
[74]	Verswinden durch den Brechungsindex	200
[75]	Das spiegelnde Ei	202
[76]	Wasser als Lichtleiter	204
[77]	Der leuchtende Wasserstrahl	206
[78]	Absorption von Licht	208
3.3.2	Farbmischung	210
[79]	Aufspaltung des Lichts durch Wasser	212
[80]	Additive Farbmischung	214
[81]	Subtraktive Farbmischung	216
3.3.3	Farben in der Astronomie	218
[82]	Die Himmelsfarben im Glas	220
[83]	Die kleine Mondfinsternis	222
3.3.4	Linse	224
[84]	Wasser als Sammellinse	226
[85]	Die Schusterkugel	228
[86]	Kaustiken	230
3.3.5	Interferenzfarben	232
[87]	Die Seifenblase	234
3.4	Versuche zur Akustik	236
[88]	Die singenden Gläser	236

[89]	Wasser als stehende Welle	238
[90]	Der Wasserhammer	242
3.5	Versuche zur Elektrik	244
3.5.1	Leitfähigkeit.....	244
[91]	Salzwasser als Leiter	244
3.5.2	Elektrostatik	246
[92]	Der krumme Wasserstrahl.....	246
3.5.3	Elektrolyse	248
[93]	Elektrolyse einer Lösung aus Kochsalz und Wasser	248
4	Literaturverzeichnis.....	250
5	Abbildungsverzeichnis	256
6	Symbolverzeichnis.....	268
7	Konstanten	274

1 EINLEITUNG

„Forscher finden erstmals Wasser in Partikeln eines Asteroiden.“ (Futurezone, 2019). Erst kürzlich konnten zwei Wissenschaftler der Arizona State University eingeschlossenes Wasser als Bestandteil von Pyroxen in Staubpartikeln eines Asteroiden nachweisen. Diese Entdeckung könnte weiteren Aufschluss über das Wasservorkommen der Erde liefern, denn für ForscherInnen ist immer noch nicht genau nachweisbar, woher der gesamte Wasservorrat der Erde entstammt (Standard, 2019; Jin & Bose, 2019; Welsch et al., 2013, S. 459).

Wasser ist nicht nur wie die zu Beginn eingeführte Schlagzeile erschließt, ein aktuelles Thema, sondern von enormer Wichtigkeit für Natur und Mensch. Insgesamt erreicht das Wasservorkommen auf der Erde ein Volumen von circa 1,4 Milliarden Kubikkilometer, was in etwa dem Volumen eines Würfels mit einer Kantenlänge von 1.119 Kilometern entsprechen würde. Wasser gilt zudem als Grundvoraussetzung für Leben, denn beinahe alle Zellen höherer Lebewesen bestehen zu 70 bis 90 Prozent aus Wasser (Welsch et al., 2013, S. 313-314). Mittlerweile ist Wasser nicht nur im Alltag in ständiger Verwendung, auch Wirtschaft und Technik greifen auf diese wichtige Ressource mit verschiedensten Anwendungsmöglichkeiten zurück. Trotz des enormen Wasservorrates auf der Erde, stellt die Versorgung von Menschen mit sauberem Wasser in vielen Regionen noch ein enormes Problem dar, denn nur 0,4 % des Wasservorkommens sind als Trinkwasser verfügbar. Aus diesem Grund wurde 2010 das „Recht auf Zugang zu sauberem Wasser“ von den United Nations (UN) als Menschenrecht deklariert (United Nations, 2019).

Neben der Bedeutung von Wasser für die Gesellschaft, stellt es auch die Basis vieler Wettererscheinungen und Vorgänge in der Klimatologie dar. Gerade in Zeiten des Klimawandels und der globalen Erderwärmung nehmen die so genannten Treibhausgase (THG) eine wichtige Rolle ein. Dabei ist vor allem Wasserdampf als wichtigstes THG eine klimarelevante Wirkung zugeschrieben, da dieser ca. zwei Drittel zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt (Goosse et al., 2010, S. 27; Welsch et al., 2013, S. 367). Für den vom Menschen verursachten Klimawandel sind jedoch THG und Spurengase wie Kohlendioxid CO_2 , Distickstoffmonoxid N_2O , Ozon O_3 und Methan CH_4 sowie Fluorkohlenwasserstoffe (FCKWs) relevant. Solche Spurengase resultieren aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe, Viehwirtschaft, Abholzung, etc. und sind hauptverantwortlich für die Erhöhung der globalen mittleren Temperatur (Greenpeace, 2019).

Zuvor angeschnittene Themen zeigen einen Einblick in das breite Spektrum und verdeutlichen die Relevanz und Aktualität der Ressource Wasser. Ferner hat das Themengebiet Wasser in der Wissenschaft, insbesondere in der Hydrologie, eine fortwährend große Bedeutung. Aufgrund dessen wurde das Thema Wasser auch als Schwerpunkt dieser Arbeit gewählt.

In vorliegender Arbeit wird der Themenschwerpunkt Wasser anhand von Experimenten physikalisch didaktisch aufbereitet. Diese Methode wurde ausgewählt, da das Experimentieren einen wesentlichen Bestandteil der Physik ausmacht. Insbesondere gelten Experimente im Physikunterricht als sinnvolle Unterstützung des Lehrens und Lernens. Darüber hinaus kann der Einsatz von Experimenten für zusätzliche Motivation von SchülerInnen sorgen (Wiesner et al., 2017, S. 106).

Als wohl bekanntestes Beispiel für die Sinnhaftigkeit von Experimenten ist die Entdeckung des „Mpemba-Effektes“ zu nennen, durch welches ein Schüler der Mittelstufe beobachtete, dass unter bestimmten Voraussetzungen heißes Wasser schneller gefriert als kaltes (siehe S. 176). So werden oft unbeantwortete Fragestellungen auf einem Anspruchsniveau beantwortet, welches dem der SchülerInnen entspricht. Der Einsatz von Experimenten im Physikunterricht kann überdies zu verschiedenen Zielen beitragen: Vermittlung von Fachwissen durch Veranschaulichung eines Konzeptes, Näherbringen von naturwissenschaftlichem Arbeiten sowie Erwerben von grundlegenden experimentellen Fähigkeiten bis hin zum Anregen des allgemeinen Interesses (Wiesner et al., 2017, S. 106-107). Grundsätzlich gilt jedoch, dass sämtliches Experimentieren bewusst eingesetzt und stets an die Zielsetzung der jeweiligen Unterrichtseinheit und das Vorwissen der SchülerInnen angepasst werden sollte, da ansonsten der potenzielle Mehrwert verloren geht. (Wiesner et al., 2017, S. 113-114).

Die Arbeit in vorliegender Form greift diese Aspekte auf und bietet somit einen zusammenfassenden Überblick über verschiedenste Bereiche der Physik und verbindet diese mit der Ressource Wasser. Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in einen theoretischen sowie experimentellen Teil. Im folgenden Theorieteil wird auf grundlegende Informationen von Wasser wie beispielsweise Wasservorkommen und Wasserknappheit (Kapitel 2.1) näher eingegangen. Anschließend bietet Kapitel 2.2 einen Überblick über die physikalischen Eigenschaften von Wasser, wobei Kapitel 2.2.1 das Wassermolekül näher durchleuchtet, während in Kapitel 2.2.2 die Aggregatzustände von Wasser und deren Phasenübergänge dargestellt werden. Den anschließenden Hauptteil der Arbeit bilden 93 Experimente, unterteilt in die Themenbereiche Mechanik, Wärmelehre, Optik, Akustik sowie Elektrik.

In der bisherigen Literatur existieren noch keine Arbeiten dieser Art, welche eine vergleichbare Sammlung von Experimenten zu vorliegendem Themenschwerpunkt darstellen. Vor allem physikalische Berechnungen bei einer Auswahl an Experimenten, sowie die ansprechende fotografische Dokumentation, welche so gestaltet ist, dass Phänomene auf einen Blick erkennbar sind, machen die vorliegende Arbeit einzigartig.

Das Hauptziel dieser Arbeit liegt darin, zum Experimentieren (sei es im Physikunterricht oder auch privat) anzuregen. Zusätzlich können vorhandene Fotos und Videos von im Bildungsbereich tätigen Personen im Unterricht verwendet werden, sollte aufgrund von fehlender Zeit eigenständiges Experimentieren nicht möglich sein.

2 HINTERGRUND ZUM THEMA WASSER

Im folgenden Kapitel wird auf Fakten rund um das Thema Wasser eingegangen. Zu Beginn des Kapitels wird erörtert, wieviel Wasser auf unserem Planeten zur Verfügung steht und welcher Anteil davon als Trinkwasser nutzbar ist. Im Anschluss wird auf die Ressourcenknappheit eingegangen. Zuletzt werden die physikalischen Eigenschaften eines Wassermoleküls sowie die Aggregatzustände und deren Phasenübergänge genauer erläutert.

2.1 Informationen zu Wasser

Wasservorkommen auf der Erde

Die Oberfläche unseres Planeten ist zu ca. 70 Prozent mit Wasser bedeckt (Abbildung 1). Von diesem Wasser sind in etwa 97,5 % Salzwasser, welches sich in den Ozeanen und Meeren befindet. Die restlichen 2,5 % setzen sich zusammen aus 2,1 % Süßwasser in gefrorener bzw. unterirdischer Form sowie 0,4 % nutzbares Süßwasser. Betrachtet man das nutzbare Süßwasser etwas genauer, so befindet sich der Großteil davon mit 67,4 % in Seen. Weitere 20,7 % des nutzbaren Süßwassers treten in Form von Bodenfeuchte in Erscheinung. Weitere 9,5 % sind Regenwasser, während lediglich 1,6 % des nutzbaren Süßwassers in Flüssen vorkommt. Die letzten 0,8 % sind in Lebewesen gespeichert (Welsch et al., 2013, S. 313-314).

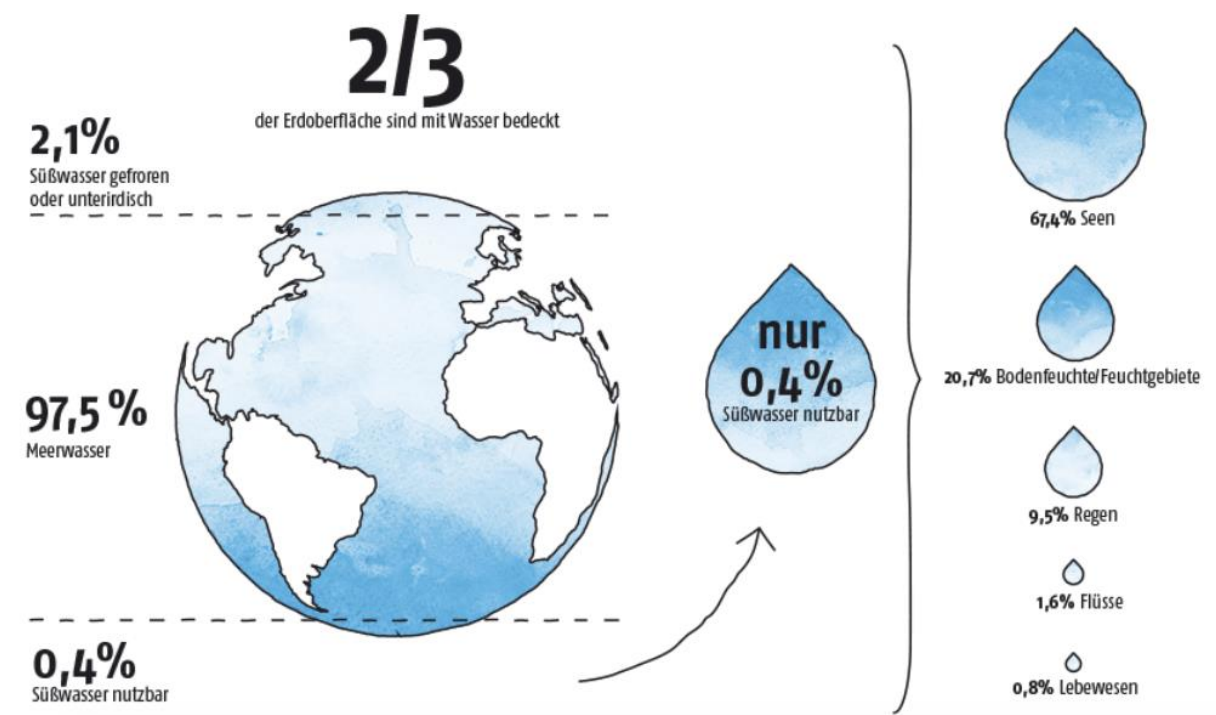


Abbildung 1: Wasservorkommen auf der Erde

Quelle: <http://www.virtuelles-wasser.de/was-ist-virtuelles-wasser/>

Wasser als knappe Ressource

Während Österreich ein großes Süßwasservorkommen hat, so besteht speziell in Entwicklungs- und Schwellenländern ein Mangel. Dieser Mangel hat bereits im Nahen Osten, Nordafrika, Zentralasien und in Teilen Australiens ein kritisches Ausmaß angenommen. Selbst in Europa gibt es in manchen Gebieten einen Wassermangel. In Spanien entsteht beispielsweise die erste Wüste von Europa. Selbst Gebiete, in welchen heutzutage ein scheinbarer Überfluss an Wasser vorherrscht, sind in Zukunft von Wasserknappheit bedroht. In Abbildung 2 wird dargestellt, dass besonders in Afrika der Anteil der Menschen, welche keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben, groß ist (RESET, 2019).

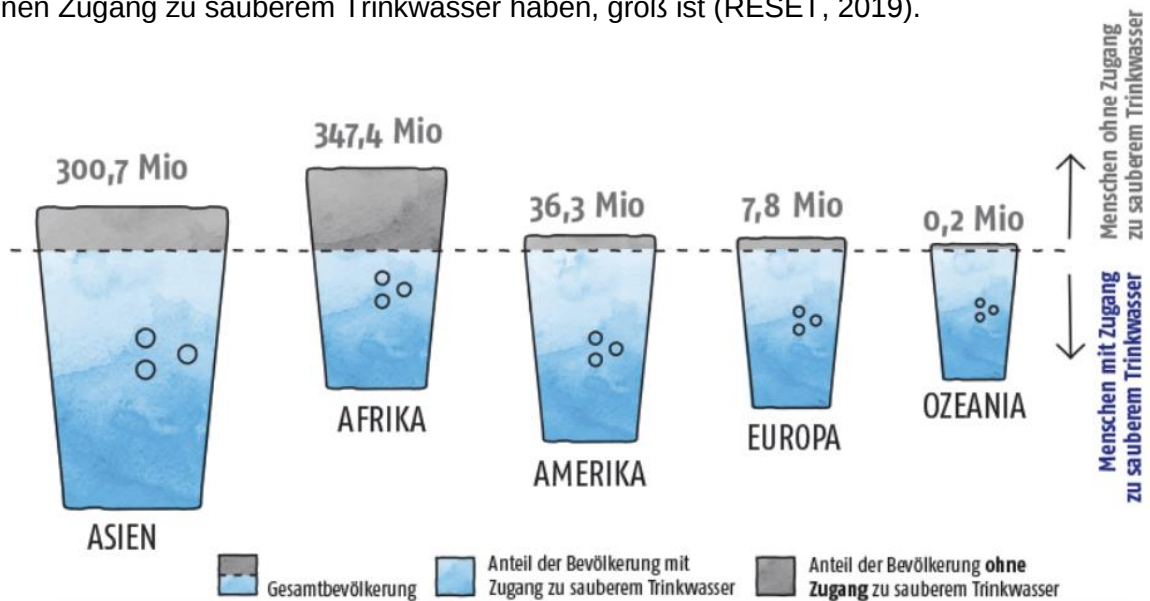


Abbildung 2: Anteil der Bevölkerung mit und ohne Zugang zu sauberem Wasser

Quelle: <http://www.virtuelles-wasser.de/was-ist-virtuelles-wasser/>

Die Ursachen für das immer knapper werdende Trinkwasser sind unter anderem die Wasserverschmutzung, die globale Erderwärmung, das Bevölkerungswachstum sowie die Übernutzung der zur Verfügung stehenden Wasserressourcen. Aufgrund des Bevölkerungswachstums gibt es mehr Menschen, die mit Lebensmitteln und Wasser zu versorgen sind. Weiters wird durch den Konsum von Gütern eine enorme Menge an Wasser benötigt, welches im Produktionsprozess zum Teil irreparabel verschmutzt wird. Die Erderwärmung trägt auch zu immer knapper werdendem Trinkwasser bei. Auf der einen Seite existieren lange Dürreperioden, während es andererseits ungewöhnlich starke Regenfälle gibt, die zu Überschwemmungen führen (RESET, 2019).

Wasserknappheit birgt ein enormes Konfliktpotential, da Wasser in jedem Bereich des Lebens einen erheblichen Einfluss hat. Ein Beispiel wodurch Konflikte entstehen ist Wasserraub, bei welchem landwirtschaftliche Flächen verkauft werden, wodurch das dort vorherrschende Wasser in privaten Besitz übergeht. Dadurch verlieren die angrenzenden BewohnerInnen ihren Zugang zu Wasser. Eine der Folgen ist Hunger, da kein Wasser zum Anbau bereitsteht. Eine weitere Folge sind Krankheiten, die verseuchtes Wasser als Ursache haben (RESET, 2019).

2.2 Wasser im Detail

2.2.1 Das Wassermolekül

Das Atom

Die ersten Vorstellungen über den Aufbau von Atomen wurden bereits ca. 500 v. Chr. diskutiert. Der griechische Naturphilosoph Leukipp sowie sein Schüler Demokrit befassten sich mit der Teilbarkeit von Materie und kamen zur Conclusio, dass es sich bei Atomen um kleinste unteilbare Stoffe handeln muss, welche sich in permanenter Bewegung befinden.

Erst am Beginn des 19. Jahrhunderts wurde die Idee von Atomen vom Engländer John Dalton wiederbelebt. Dieser konnte sich dabei schon auf Ergebnisse von Experimenten beziehen, welche die Existenz von Atomen und ihren Eigenschaften nahelegten. Die Experimente wurden so weit verfeinert, dass im Laufe der Zeit mehrere Modelle für den Atomaufbau entwickelt wurden (Rodewald, 2007, S. 23).

Eines der wichtigsten Modelle ist das Atommodell von Bohr (1885-1962), welches auf dem Atommodell von Rutherford (1871-1937) aufbaut. Für beide Modelle werden sogenannte Elementarteilchen benötigt, aus welchen ein Atom aufgebaut ist. Elementarteilchen sind, im Gegensatz zu Atomen, die wirklich kleinsten und unteilbaren Stoffe. Von diesen sind heutzutage beinahe 200 bekannt. Für die folgenden Atommodelle werden jedoch nur drei von ihnen benötigt:

- Das Elektron e : Es hat eine Masse m_e von $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ und besitzt die kleinste, negative elektrische Ladung von $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- Das Proton p : Es hat eine Masse m_p von $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und hat somit ungefähr die 2000-fache Masse eines Elektrons. Weiters besitzt das Proton die gleich große, jedoch entgegengesetzte Ladung wie das Elektron und ist daher positiv geladen.
- Das Neutron n : Es hat eine Masse m_n von $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und besitzt keine Ladung (Rodewald, 2007, S. 23 ff.).

Das Atommodell von Rutherford

Rutherford konnte aufgrund der Streuung von Elektronen an Metallfolien die Größe von Atomen bestimmen. Mit seinen Überlegungen kam er zu dem Schluss, dass ein Atom aus einem Kern sowie einer Hülle besteht. Dabei beträgt der Durchmesser der Hülle in etwa 10^{-10} m , während der Durchmesser des Kerns lediglich 10^{-14} m beträgt. Ein anschauliches Größenverhältnis stellt ein Tischtennisball im Vergleich zu einem Fußballstadion dar. Im Kern des Atoms befindet sich beinahe die gesamte Masse, d. h. die Protonen sowie Neutronen, während sich in der Hülle die beinahe masselosen Elektronen befinden. Dabei befinden sich in neutral geladenen Atomen stets gleich viele Protonen wie Elektronen. Nach Rutherford kreisen die Elektronen in der Hülle so um den positiv geladenen Kern, dass die Zentrifugalkraft

äquivalent zur Coulomb'schen Anziehungskraft ist. Nach der klassischen Elektrodynamik würde dies jedoch bedeuten, dass durch die Bewegung der Elektronen elektromagnetische Strahlung verursacht werden müsste. Würden die Elektronen einen Teil ihrer Energie abgeben, so würden sie stetig ihren Abstand zum Kern verringern und spiralförmig in den Atomkern stürzen (Plewinsky et al., 2014, S. 1; Goretzki, 2004, S. 5).

Das Bohr'sche Atommodell

Niels Bohr erweiterte das Modell von Rutherford um zwei Postulate. Das erste Postulat besagt, dass die Elektronen den Kern ohne Energieverlust und emittierender Strahlung umkreisen können. Dies geschieht immer auf bestimmten Bahnen. Die Elektronen nehmen auf solchen Bahnen sogenannte stationäre Zustände ein. In welcher Schale sich ein Elektron befindet, wird durch die Hauptquantenzahl n beschrieben. Die Hauptquantenzahl kann dabei Werte von eins bis unendlich annehmen und muss ganzzahlig sein. Das zweite Postulat besagt, dass ein Elektron, welches zwischen zwei stationären Zuständen wechselt, entweder monochromatische Strahlung absorbieren bzw. emittieren muss. Dabei wird die Strahlung von einem Elektron absorbiert um in eine höhere Schale zu gelangen bzw. emittiert, wenn es wieder in eine Schale niedrigerer Energie geht (siehe Experiment [78]). Die Frequenz f der emittierten bzw. absorbierten Strahlung hängt dabei von der Energiedifferenz ΔE der stationären Zustände ab, zwischen welchen sich das Elektron bewegt:

$$f = \frac{\Delta E}{h} \quad (1)$$

Dabei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Das Modell von Bohr wurde erweitert und bildete somit die Basis für das Periodensystem. Dabei können sich auf jeder Schale $2 \cdot n^2$ Elektronen befinden (Abbildung 3). Die Elektronen in der äußersten Schale werden Valenzelektronen genannt. Letztlich bildet das Bohr'sche Modell einen Widerspruch zur Unschärferelation von Heisenberg (1901-1976), wonach es nicht möglich ist, zeitgleich eine Angabe über Ort sowie Geschwindigkeit von Partikeln zu machen. Aufgrund dieser Aussage muss die Idee von Teilchenbahnen verworfen werden. Für viele grundlegende chemische und physikalische Vorgänge ist dieses Modell jedoch durchaus annehmbar (Plewinsky et al., 2014, S. 1; Rodewald, 2007, S. 29).

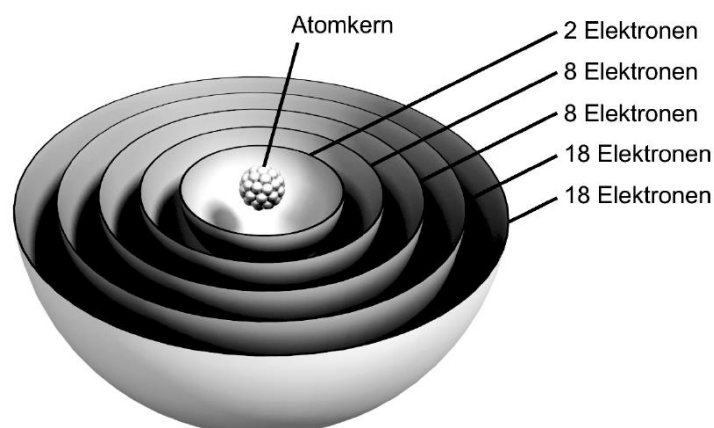


Abbildung 3: Schalenmodell eines Atoms mit Aufteilung der Elektronen
Quelle: Hüttermann, 2011, S. 4

Moleküle

Atome kommen mit Ausnahme der Edelgase nicht isoliert vor, sondern treten in Form von Molekülen auf. Das besondere an den Edelgasen ist, dass sie genau acht Elektronen ab der zweiten Schale besitzen. Helium, das erste der Edelgase, hat genau zwei Elektronen. Neon mit zwei Schalen hat zehn Elektronen (zwei in der ersten Schale und acht in der zweiten Schale). Dieses System wird bei den weiteren Edelgasen fortgeführt. Ist eine Schale vollbesetzt, so ist dies ein energetisch günstigerer Fall. Aus diesem Grund treten Edelgasatome einzeln in Erscheinung, während andere Atome Verbindungen eingehen, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird (Plewinsky et al., 2014, S. 37).

Bindungsarten

Bei den Bindungsarten unterscheidet man zwischen chemisch verursachten Bindungen, welche auch als primäre Bindungen bezeichnet werden und den Bindungen, die auf physikalische Wechselwirkungen basieren, den sogenannten sekundären Bindungen. Bei den primären Bindungen kann man zwischen kovalenter Bindung, Ionenbindung sowie der metallischen Bindung unterscheiden (Salmang & Scholze, 2007, S. 10). Im Folgenden wird auf die zwei für die Diplomarbeit relevanten Bindungen, die kovalente Bindung sowie die Ionenbindung, eingegangen.

Bei der **kovalenten Bindung** teilen sich zwei oder mehr Atome ihre Valenzelektronen. Betrachtet man Wasserstoff, so besitzt dieser ein Valenzelektron. Um seine äußerste, die erste Schale voll zu bekommen, braucht der Wasserstoff ein zweites Valenzelektron. Aus diesem Grund bildet das Wasserstoffatom sehr gerne ein Molekül mit einem zweiten Wasserstoffatom. Jedes für sich betrachtet hat nur ein Valenzelektron. Gemeinsam haben sie zwei Valenzelektronen, welche sie sich stetig teilen. Die kovalente Bindungsenergie beträgt $60 - 700 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$.

Kochsalz bzw. Natriumchlorid ist ein bekanntes Beispiel für eine **Ionenbindung**. Während Natrium mit 11 Elektronen ein Valenzelektron zu viel hat, so hat das Chlor mit 17 Elektronen genau ein Valenzelektron zu wenig für eine vollbesetzte Außenschale. Da es sowohl für das Natriumatom als auch für das Chloratom von Vorteil ist, gibt das Natrium eines seiner Valenzelektronen ab, welches vom Chlor aufgenommen wird. In Folge dessen ist das Natrium positiv geladen, da die Anzahl der Elektronen gegenüber den Protonen um eins gesunken ist. Beim Chlor verhält es sich analog, nur dass dieses aufgrund der steigenden Elektronenzahl negativ geladen ist. Geladene Atome werden als Ionen bezeichnet. Das positiv geladene Natrium ist ein sogenanntes Kation, während es sich beim negativ geladenen Chlor um ein Anion handelt. Entgegengesetzt geladene Ionen ziehen sich aufgrund des Coulomb'schen Potentials an. Bei der elektrostatischen Anziehung zwischen dem Chlorion und dem Natriumion handelt es sich um die Ionenverbindung. Ionenverbindungen verfügen über eine Bindungsenergie von $600 - 1100 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$.

Beispiele für sekundäre Bindungen sind die Van der Waals-Bindungen mit einer Bindungsenergie von $0,08 - 40 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ sowie die Wasserstoffbrückenbindungen mit einer Bindungsenergie von $< 40 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ (Salmang & Scholze, 2007, S. 10-11; Hüttermann, 2011, S. 4-5). Auf die Wasserstoffbrückenbindung wird im Folgenden näher eingegangen.

Das Wassermolekül

Das Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen H sowie einem Sauerstoffatom O . Die chemische Formel von Wasser ist somit H_2O . Während die beiden Wasserstoffatome jeweils ein Valenzelektron besitzen und nach einem zweiten streben, hat das Sauerstoffatom insgesamt acht Elektronen. Davon befinden sich zwei in der ersten Schale und sechs in der zweiten und somit äußersten Schale, wodurch es den Bedarf nach zwei weiteren Valenzelektronen hat, damit diese vollständig besetzt ist. Das Sauerstoffatom geht mit jedem der beiden Wasserstoffatome eine kovalente Bindung ein. Dabei teilt das Sauerstoffatom zwei seiner Valenzelektronen mit je einem der Wasserstoffatome, welches ihr Valenzelektron mit dem Sauerstoffatom teilen. Während die kovalente Bindung zwischen zwei Wasserstoffatomen ausgeglichen ist, trifft dies auf die Bindung zwischen dem Wasserstoff- und Sauerstoffatom nicht zu. Dies liegt an der sogenannten **Elektronegativität**, welche die Fähigkeit der Atome beschreibt, bei einer Bindung die Elektronen zu sich zu ziehen. Dabei unterscheidet sich die Elektronegativität zwischen den einzelnen Elementen und wird anhand einer Vergleichsskala mit Werten von 0 bis 4, einheitenlos angegeben. Dabei besitzt Fluor die größte Elektronegativität mit 4. Im Vergleich zur Elektronegativität von Sauerstoff mit 3,5 ist jene von Wasserstoff mit 2,1 gering. Binden sich zwei Wasserstoffatome, so ziehen beide mit der gleichen Kraft die Bindungselektronen zu sich. Beim Wassermolekül übt der Sauerstoff eine größere Kraft aus, wodurch sich die Bindungselektronen bei der Umrundung der beiden Atomkerne öfters in der Nähe von diesem befinden. Da die Elektronen über eine negative Ladung verfügen, beeinflusst die Lage dieser die Ladung der Atome. Da, einfach ausgedrückt, mehr negative Ladung zum Sauerstoffatom gezogen wird, hat dieses eine insgesamt negative Ladung, während die Wasserstoffatome positiv geladen sind. Da es sich bei der Ladung jedoch um weniger als eine Elementarladung handelt, spricht man hier von nur einer Teilladung bzw. einer Polarisierung, welche über ein δ gekennzeichnet wird (Abbildung 4). Das δ sagt dabei nichts über die tatsächliche Ladungsmenge aus, sondern kennzeichnet lediglich die Polarisierung der Atome in einem Molekül. Weiters beträgt der Bindungswinkel α zwischen den beiden Wasserstoffatomen mit positiver Polarisierung 105° , wodurch klar wird, dass der Schwerpunkt der positiven Teilladung zwischen diesen liegt. Der Schwerpunkt der negativen Teilladung liegt im Sauerstoffatom, wodurch das Molekül als gesamtes betrachtet einen Dipol aufweist.

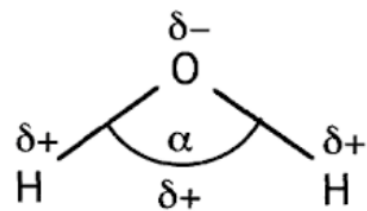


Abbildung 4: Polarisierung des Wassermoleküls
Quelle: Müller, 2005, S. 98

Der Dipolcharakter des Wassers ist beispielsweise für das Lösen von Kochsalz in Wasser verantwortlich (EXP [91]). Weiters ziehen sich, aufgrund von elektrostatischen Wechselwirkungen, Wassermoleküle gegenseitig an (Abbildung 5). Solch eine Verbindung wird **Wasserstoffbrückenbindung** bzw. **Wasserstoffbrücke** genannt. Diese sind im Wasser beispielsweise für die Kohäsionskräfte (Kapitel 3.1.1) oder auch den vergleichsweise hohen Schmelz- und Siedepunkt (Kapitel 3.2.6) verantwortlich (Müller, 2011, S. 96 ff.).

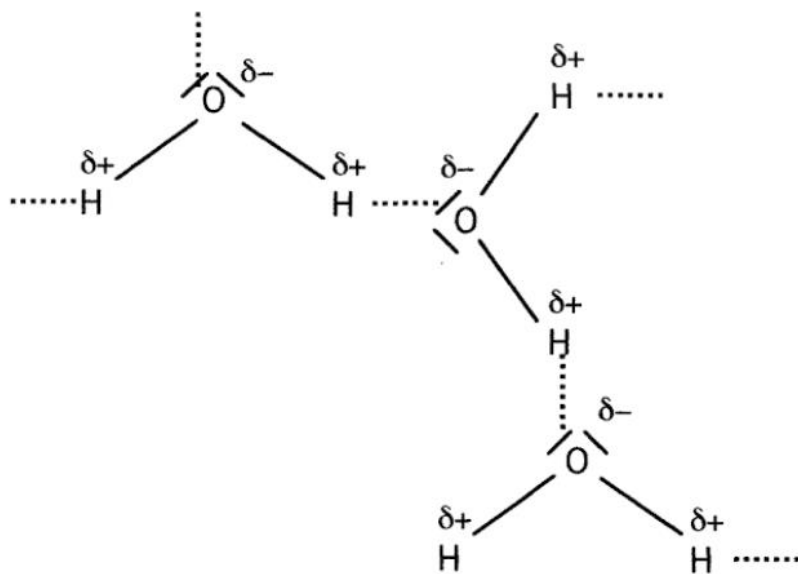


Abbildung 5: Eindimensionale Schicht von Wassermolekülen, welche über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind.

Quelle: Müller, 2005, S. 99

Zustande kommen die Wasserstoffbrücken im Wasser, da das Sauerstoffatom über vier weitere Valenzelektronen verfügt, welche sich zu je zwei Elektronenpaare zusammenschließen. Da Elektronenpaare aufgrund von elektrostatischen Wechselwirkungen bestrebt sind einen möglichst großen Abstand zueinander zu haben, bilden die zwei Elektronenpaare gemeinsam mit den zwei Wasserstoffatomen ein Tetraeder, dessen Zentrum das Sauerstoffatom ist. Aufgrund der negativen Ladung eines Elektronenpaars, kann ein solches mit einem Wasserstoffatom eines benachbarten Wassermoleküls wechselwirken, wodurch eine Wasserstoffbrückenbindung zustande kommt. Ebendiese Verbindung ist für die Anomalie des Wassers verantwortlich (Kapitel 3.2.1) (Hüttermann, 2011, S. 13 & 24).

2.2.2 Aggregatzustände von Wasser und deren Phasenübergänge

Aggregatzustände

Im Wesentlichen kommen Stoffe in der Natur in drei Zuständen, den sogenannten Aggregatzuständen vor. Diese werden oft auch als Phasen bezeichnet. Bei den Aggregatzuständen handelt es sich um fest, flüssig und gasförmig. Welcher der Aggregatzustände in Erscheinung tritt, hängt vom Stoff, der Temperatur sowie dem Umgebungsdruck ab, deren Zusammenhang im Phasendiagramm (Abbildung 8) dargestellt ist. Ob ein Stoff fest, flüssig oder gasförmig ist, hängt vom Verhältnis seiner temperaturabhängigen Bewegungsenergie (Kapitel 3.2.5) zu den intermolekularen Kräften ab.

Bei **Festkörpern** ist die Anziehungskraft der Moleküle bzw. Atome im Vergleich zur Bewegungsenergie so groß, dass sich diese in Form eines Gitters anordnen, bei welchem sie ihre Position beibehalten und durch die Bewegungsenergie schwingen. Ein Festkörper verfügt somit über eine bestimmte Gestalt sowie ein bestimmtes Volumen.

Bei einer **Flüssigkeit** sind die Anziehungskräfte der Moleküle noch groß genug, um sie knapp beieinander zu halten, jedoch nicht um Verschiebungen untereinander zu verhindern. Flüssigkeiten sind kaum komprimierbar, haben keine bestimmte Gestalt jedoch ein fixes Volumen.

Gase haben eine so hohe kinetische Energie, dass diese die intermolekularen Kräfte so weit übertrifft, dass sich das Gas beliebig ausdehnen kann. Somit hat es weder ein bestimmtes Volumen noch eine bestimmte Gestalt. Geht man von einem niedrigeren Zustand in einen höheren Zustand, also zum Beispiel von flüssig zu fest oder von fest zu gasförmig, so benötigt man dafür Energie. Geht man umgekehrt in einen niedrigeren Zustand, so wird Energie freigegeben (Kuchling, 2011, S. 269; Brown et al., 2011, S. 423).

Wasser kommt in der Natur sowohl fest, flüssig als auch gasförmig vor. Da jede dieser Phasen eine große Rolle im Alltag eines Menschen spielt, hat jede Phase ihren eigenen Namen. Bei festem Wasser handelt es sich um Eis, ist es flüssig, so ist es Wasser und im gasförmigen Zustand bezeichnet man es als Wasserdampf.

Aggregatzustandsänderung

Geht ein Stoff von seinem festen Zustand in den flüssigen über, so schmilzt er. Wird der Stoff anschließend wieder fest, so erstarrt er. Wechselt eine Flüssigkeit ihren Zustand zum gasförmigen, so siedet sie. Läuft der Prozess umgekehrt ab, so kondensiert ein Gas zur Flüssigkeit. Ein fester Zustand kann jedoch direkt in den gasförmigen Zustand übergehen, dabei sublimiert er. Umgekehrt kann ein Gas ohne die flüssige Phase zu durchlaufen, fest werden. Das Gas resublimiert. Die Vorgänge werden in Abbildung 6 dargestellt. Weiters wird im Folgenden kurz auf die einzelnen Phasenübergänge eingegangen.

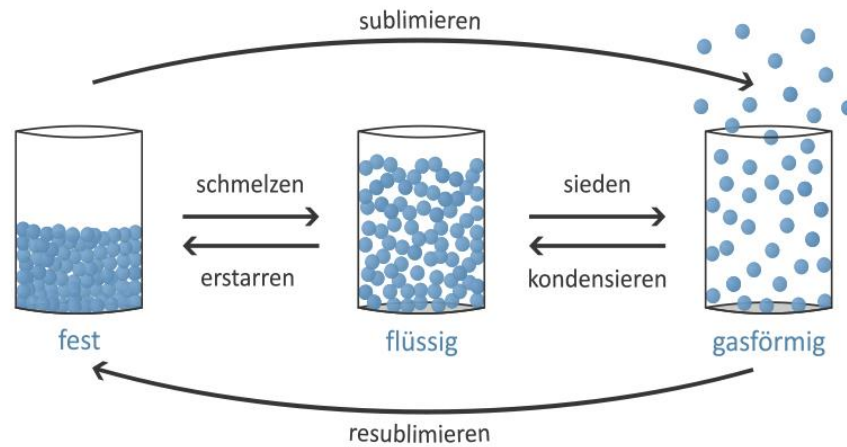


Abbildung 6: Die Phasenübergänge und deren Bezeichnungen

Quelle: <https://www.klassewasser.de/content/language1/html/3650.php>

Schmelzen und Erstarren

Wie bereits beschrieben, bilden die Atome bzw. Moleküle eines Festkörpers ein Kristallgitter. Die kinetische Energie der Teilchen tritt dabei in Form von Schwingungen auf. Führt man dem System Energie hinzu, so schwingen die Teilchen immer heftiger bis letztlich die Kristallstruktur zerstört wird. Für jeden Stoff gibt es eine druckabhängige Temperatur, bei welcher er schmilzt, den sogenannten Schmelzpunkt. Bei Wasser liegt der Schmelzpunkt bei 0°C für einen Druck von $1013,25\text{ mbar}$. Wird der Druck auf das Eis erhöht, so sinkt der Schmelzpunkt. Dies bildet eine Ausnahme, die durch die Anomalie des Wassers (Kapitel 3.2.1) hervorgerufen wird, denn bei den meisten Stoffen steigt der Schmelzpunkt mit zunehmendem Druck. Wenn Eis schmilzt, wird es zu flüssigem Wasser. Während des Schmelzvorgangs bleibt die Temperatur konstant, unter der Annahme, dass auch der Druck gleich bleibt. Die währenddessen hinzugefügte Wärmeenergie Q wird als Schmelzwärme bezeichnet und wird für die Phasenumwandlung benötigt (Abbildung 7).

Das Erstarren ist der umgekehrte Vorgang. Der Schmelzpunkt entspricht umgekehrt auch dem Erstarrungspunkt und auch währenddessen bleibt die Temperatur, analog zum Schmelzvorgang, gleich (Abbildung 7). Die Schmelzwärme ist somit auch die Erstarrungswärme. Der Erstarrungspunkt kann durch das Lösen eines Festkörpers in einer Flüssigkeit hinabgesetzt werden (siehe Experiment [63]). Weiters besteht die Möglichkeit, dass eine Flüssigkeit trotz Erreichens des Erstarrungspunktes nicht fest wird. Dies geschieht, wenn es zu keiner Bildung eines Kristallisationskeimes kommt (Experiment [67]). Wenn flüssiges Wasser erstarrt, so wird es zu Eis (Kuchling, 2011, S. 269 ff.).

Verdampfen und Kondensieren

Wird einer Flüssigkeit soweit Energie hinzugefügt, dass die kinetische Energie der Atome bzw. Moleküle die Kohäsionskräfte überwindet, so geht die Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand über. Dies geschieht ab einer gewissen, druckabhängigen Temperatur, welche als Siedepunkt

bezeichnet wird. Bei Wasser liegt der Siedepunkt bei 100°C unter Normaldruck mit $p_0 = 1013,25 \text{ mbar}$. Während des Siedevorgangs bleibt die Temperatur konstant. Die Energie Q , die währenddessen hinzugefügt wird, heißt Verdunstungswärme (Abbildung 7). Eine Flüssigkeit geht auch unterhalb des Siedepunkts in den gasförmigen Zustand über. Dies wird als Verdunstung bezeichnet (Kapitel 3.2.6). Wenn Wasser verdunstet, so entsteht Wasserdampf. Der umgekehrte Vorgang des Verdampfens ist das Kondensieren. Die Kondensation tritt ab dem sogenannten Kondensationspunkt ein, welcher dem Siedepunkt entspricht. Dabei wird Kondensationswärme freigesetzt, die der Verdampfungswärme entspricht. Somit ändert sich die Temperatur auch bei diesem Phasenübergang nicht (Abbildung 7) (Kuchling, 2011, S. 273 ff.). Dies tritt bei Wasser zum Beispiel in Erscheinung, wenn der Wasserdampf aus der Luft so stark abkühlt, dass er flüssig wird. Diese Erscheinung wird Tau genannt, wobei jedoch zu beachten ist, dass der Taupunkt eigens definiert ist.

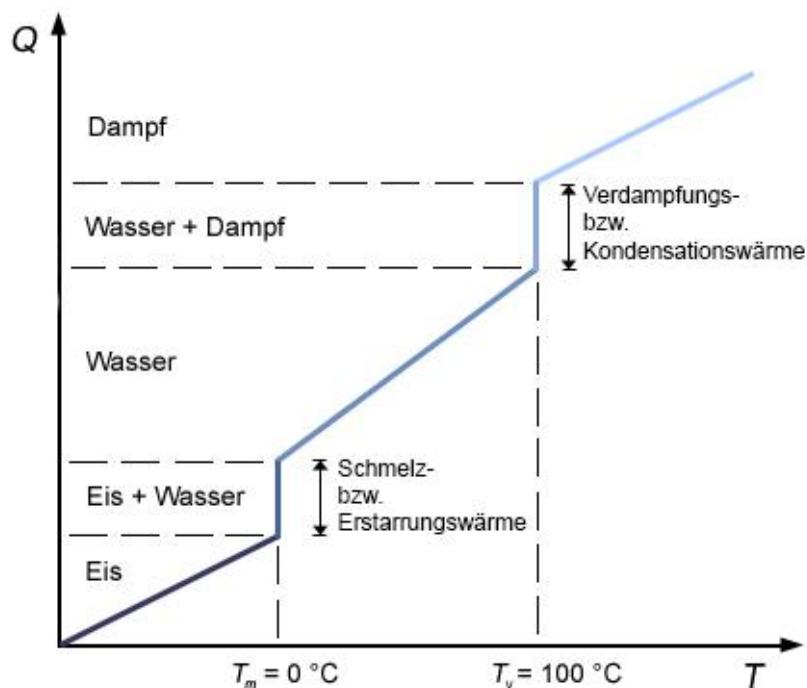


Abbildung 7: Beim Schmelzen bzw. Erstarren sowie beim Verdampfen bzw. Kondensieren ändert sich die Temperatur eines Stoffes (hier bei Wasser) nicht.

Quelle: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/thermodyn/einfuehrung-/begriffe.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/thermodyn/einfuehrung/waermemenge.vscml.html>

Sublimation bzw. Resublimation

Wird der flüssige Zustand ausgelassen, so sublimiert ein Festkörper und wird gasförmig. Die Sublimationswärme entspricht der Summe aus Schmelz- und Verdampfungswärme. Bei der Resublimation geht ein Gas direkt in die feste Phase über. Dies geschieht beispielsweise mit dem Wasserdampf der Luft auf einer extrem kalten Oberfläche (Experiment [63]). Dabei ist die Resublimationswärme gleich der Sublimationswärme (Kuchling, 2011, S. 275).

Das Phasendiagramm

Beim Phasendiagramm (Abbildung 8) werden die zwei Zustandsgrößen Druck p und Temperatur T in Relation zueinander gesetzt. Anhand des Phasendiagramms kann man ablesen, bei welcher Temperatur bzw. bei welchem Druck eine gewisse Phase vorherrscht. Die drei Trennlinien Schmelzkurve, Dampfdruckkurve und Sublimationskurve kennzeichnen jene Bereiche, in denen zwei aneinandergrenzende Phasen im thermodynamischen Gleichgewicht miteinander sind. Am Beispiel der Dampfdruckkurve befinden sich somit die flüssige sowie die gasförmige Phase im Gleichgewicht, d. h. bei jeder vorhandenen Temperatur gehen in einer bestimmten Zeiteinheit gleich viele Atome bzw. Moleküle von der Flüssigkeits-phase in die Gasphase über, wie umgekehrt die Teilchen den gasförmigen Zustand verlassen und in die flüssige Phase übergehen. Dabei bleiben Temperatur und Druck des Systems konstant. Alle drei Kurven laufen in einem Punkt zusammen, dem sogenannten Tripelpunkt. Bei exakt dieser Temperatur sowie diesem Druck befinden sich alle drei Phasen im Gleichgewicht. Bei Wasser liegt der Tripelpunkt bei einem Druck von $p = 6,11 \text{ mbar}$ und einer Temperatur von $T = 0,01^\circ\text{C} = 273,16 \text{ K}$. Dabei befinden sich Eis, Wasser und Dampf im thermodynamischen Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht kann beispielsweise mit einer Tripelpunkt-Wasserzelle erreicht werden (Abbildung 9). Weiters wurde der Tripelpunkt von Wasser für die Definition der Temperatureinheit Kelvin herangezogen. Dabei entspricht ein Kelvin dem 273,16ten Teil des Tripelpunkts von reinem Wasser. Ein weiterer markanter Punkt im Phasendiagramm ist der sogenannte kritische Punkt. Bei diesem Punkt endet die Dampfdruckkurve, bei der die zugehörige Temperatur als kritische Temperatur bezeichnet wird. Ab dieser Temperatur kann das Gas nicht mehr durch Druckerhöhung allein in den flüssigen Zustand übergehen. Bei Wasser liegt die kritische Temperatur bei $T = 374^\circ\text{C}$ bei einem Druck von 220 bar (Kuchling, 2011, S. 277 ff. & 643; Grohamm et al., 2011, S. 55 ff.).

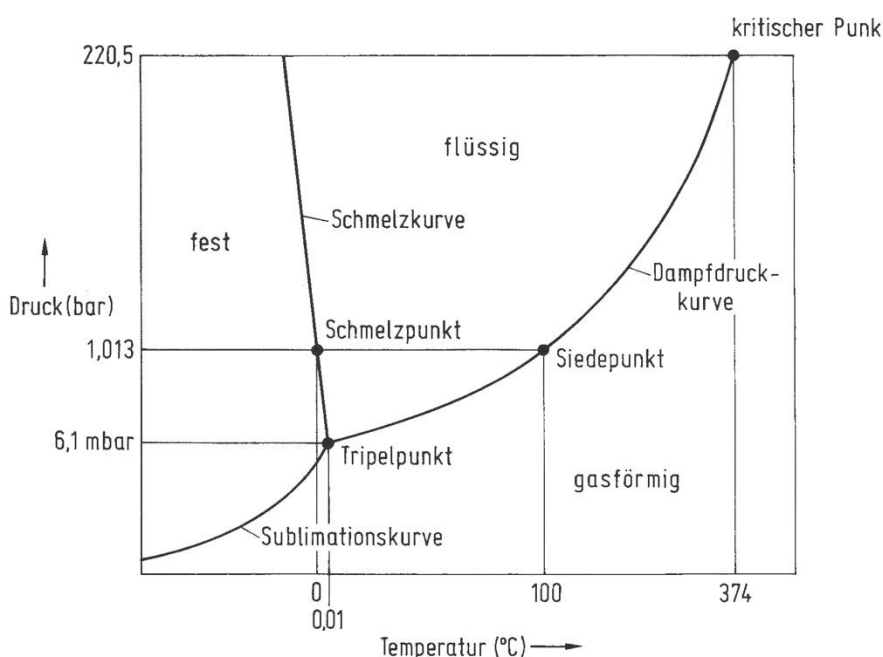


Abbildung 8: Das Phasendiagramm von Wasser. Der Tripelpunkt liegt bei einer Temperatur von $T = 0,01^\circ\text{C}$ und einem Druck von $6,11 \text{ mbar}$

Quelle: https://portal.uni-freiburg.de/fkchemie/lehre/grundvorlesung/uebungen/-stunde6/pdwasser/image_view_fullscreen



Abbildung 9: Tripelpunkt Wasserzelle. Zu erkennen sind die drei Phasen Wasser, Eis und Dampf

Apparatur: TU-Graz

3 EXPERIMENTELLER HAUPTTEIL

Im folgenden Hauptteil der Arbeit werden physikalische Experimente zum Thema Wasser dargestellt. Die insgesamt 93 Experimente sind dabei in folgende Themenbereiche mit dazugehörigen Kapiteln gegliedert:

Mechanik 	Oberflächenspannung, Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen, das Archimedische Prinzip, Gravitation, Strömungen, Drehbewegungen und Scheinkräfte
Wärmelehre 	Anomalie des Wassers, Wärmeübertragung, Wärmeausdehnung von Körpern, Diffusion, Gasgesetze, Phasenübergänge, Wirkung von Siede- und Kondensationskeimen
Optik 	Reflexion, Brechung und Absorption, Farbmischung, Farben in der Astronomie, Linsen, Interferenzfarben
Akustik 	keine weitere Unterteilung aufgrund von Umfang
Elektrik 	Leitfähigkeit, Elektrostatik, Elektrolyse

Abbildung 10: Übersicht der behandelten Themenbereiche sowie der dazugehörigen Unterkapitel

Oben dargestellte Abbildung 10 zeigt die fünf Hauptthemengebiete, welche sich, mit Ausnahme des Themas Akustik, jeweils in weitere Unterkapitel aufteilen. Dabei wird jedes relevante Unterkapitel mit einer theoretischen Einführung begonnen, an welches sich die Experimente anschließen. Grundsätzlich sind alle im nachfolgenden Teil dargestellten Experimente selbst durchgeführt.

Das Layout ist so gestaltet, dass jedem Experiment eine Doppelseite zugewiesen ist. Auf der linken Seite befindet sich dabei zu Beginn eines jeden Experimentes der Titel inkl. Nummerierung. Des Weiteren zeigt die Materialiste alle benötigten Materialien für das jeweilige Experiment. Daneben befinden sich eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung sowie zu beobachtende Ergebnisse. Anschließend werden mit Hilfe von physikalischen Erklärungen die Ergebnisse der Experimente erläutert. Auf der rechten Seite befinden sich Fotos, welche den Versuchsaufbau bzw. die Phänomene einzelner Experimente zeigen. Sämtliche Fotos in dieser Arbeit sind selbst erstellt, sofern dies nicht durch eine Quelle gekennzeichnet ist. Apparate, welche von der Technischen Universität Graz (Institut für Experimentalphysik) verwendet wurden, sind mit einem entsprechenden Hinweis versehen. Grundsätzlich ist bei der Verwendung solcher Apparaturen darauf zu achten, destilliertes Wasser zu verwenden, um Kalkflecken zu vermeiden.

Zusätzlich befindet sich bei ausgewählten Experimenten ein QR-Code auf der linken Seite, womit man durch Einscannen mit dem Handy oder durch einfaches Klicken auf den QR-Code zu einem Online-Videokanal gelangt, auf welchem das entsprechende Video zu finden ist. Rechts ist ein Beispiel QR-Code dargestellt, durch welchen man direkt zu einer Übersicht aller erstellten Videos im Online-Kanal gelangt.



In den folgenden Texten kommt es vor, dass Verlinkungen zwischen einzelnen Kapiteln eingefügt sind. Auch hier gelangt man durch Klicken auf den Text sofort zum jeweiligen Kapitel. Demselben Prinzip folgen Verlinkungen auf andere Experimente, welche durch die Abkürzung „Exp. [xx]“ gekennzeichnet sind, wobei „xx“ die jeweilige Nummerierung des Experimentes darstellt. Zudem sind Formeln mit einer Nummerierung sowie einem Link ausgestattet, um Verweise im Text so klarer zu gestalten. Sämtliche verwendete Symbole in Formeln oder Berechnungen sind dem Kapitel entsprechend in einem Symbolverzeichnis am Ende der Arbeit angeführt. Dem angeschlossen findet man ein Verzeichnis mit aller in dieser Arbeit verwendeten Konstanten.



Grundsätzlich gilt, dass bei sämtlichen Experimenten auf eine geeignete Schutzausrüstung nicht verzichtet werden sollte. Weitere Hinweise dazu sind bspw. im Themenheft „Sicherheit“ der Zeitschrift Unterricht Physik nachzulesen (Volkmer & Willer, 2004). Gefahrenhinweise sind bei besonders anspruchsvollen Experimenten zusätzlich durch ein Gefahrensymbol (siehe links) gekennzeichnet.



Die Diplomarbeit wurde formattechnisch so gestaltet, dass ein doppelseitiges Drucken für die Anordnung der Experimente vorteilhaft ist. Wird die Diplomarbeit im PDF-Format am PC betrachtet, so sind folgende Einstellungen vorzunehmen:



1. Anzeige → Seitenanzeige → Zweiseitenansicht
2. Anzeige → Seitenanzeige → Deckblatt in Zweiseitenansicht einblenden

3.1 Versuche zur Mechanik

3.1.1 Oberflächenspannung

Adhäsion und Kohäsion

Zur Beschreibung der Oberflächenspannung muss man zunächst betrachten, welche Kräfte bei einer Flüssigkeit in einem ruhenden Behälter wirken. Jede Flüssigkeit besteht aus Atomen bzw. Molekülen der gleichen Art, zwischen welchen Anziehungskräfte, die sogenannten Kohäsionskräfte, herrschen. Es gibt diese Anziehungskräfte jedoch nicht nur innerhalb der Flüssigkeit, sondern auch zwischen ihr und anderen Körpern, z. B. einem Behälter. Diese gegenseitigen Anziehungskräfte werden Adhäsionskräfte genannt. Die Kräfte treten zwischen zwei festen Körpern, zwischen einer Flüssigkeit und einem Festkörper sowie zwischen einem Gas und einem Festkörper auf (Kuchling, 2011, S. 176-177).

Oberflächenspannung

Für die Oberflächenspannung sind insbesondere die Kohäsionskräfte von Bedeutung. Betrachtet man ein Molekül im Inneren der Flüssigkeit, so erfährt es anziehende Kräfte durch seine Nachbarmoleküle, die sich gegenseitig aufheben. Das heißt, die resultierende Kraft ist null. An der Grenzfläche zwischen Oberfläche der Flüssigkeit und einem Gas fehlen auf der Seite zum Gas hin die benachbarten Moleküle gleicher Art. Weiters wird die Moleküldichte in der obersten Schicht durch Verdampfen verringert. Somit bleibt eine zur Flüssigkeit gerichtete Kraft bestehen, wodurch eine möglichst kleine Oberfläche angestrebt wird (Abbildung 11). Die kleinste Oberfläche eines bestehenden Volumens ist die Kugel (Abbildung 12). Möchte man der nach innen gerichteten Kraft gegenwirken und so die Oberfläche vergrößern, so muss man Arbeit verrichten. Die Oberflächenspannung σ ist somit das Verhältnis zwischen der Arbeit ΔW , die verrichtet werden muss und der Oberflächenänderung ΔA (Czeslik et al. 2010, S. 196).

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad (2)$$

Die Oberflächenspannung von Wasser ist mit $72,7 \frac{mN}{m}$ bei $20^\circ C$ relativ hoch. Höher ist nur jene von Quecksilber mit $465 \frac{mN}{m}$ bei gleicher Raumtemperatur (Kuchling, 2011, S. 623).

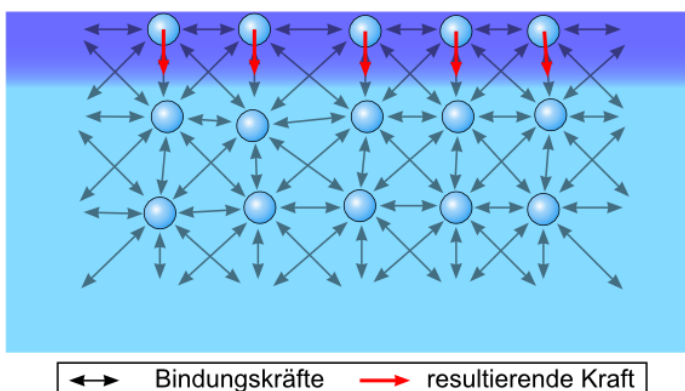


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Kräfte in einer Flüssigkeit

Quelle: <https://lp.uni-goettingen.de/get/bigimage/5374>



Abbildung 12: Tropfenbildung durch Oberflächenspannung

Kapillarität

Befindet sich Flüssigkeit in einem ruhenden Behälter, so wirken die Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen der Flüssigkeit und die Adhäsionskräfte zwischen den Molekülen der Flüssigkeit sowie der Gefäßwand. Ist die wirkende Adhäsionskraft am Rand des Behälters größer als die Kohäsionskraft, so kommt es, dass die Flüssigkeit an der Wand nach oben steigt. In diesem Fall ist die Flüssigkeit benetzend und es wird ein konkaver Meniskus gebildet (Abbildung 13). Sind jedoch die wirkenden Kohäsionskräfte größer, so wird die Flüssigkeit an der Gefäßwand nach unten gezogen. Die Flüssigkeit ist in diesem Fall nicht benetzend und es bildet sich ein konvexer Meniskus (Abbildung 14) (Tipler & Mosca, 2008, S. 387). Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen in einem Glaskeil.



Abbildung 13: Konkaver Meniskus in einem Glaskeil.
Mit Wasser vermengtes Phenol ist benetzend
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 14: Konvexer Meniskus in einem Glaskeil.
Quecksilber ist nicht benetzend
Apparatur: TU-Graz

Taucht man Kapillaren in Flüssigkeiten, so steigt eine benetzende Flüssigkeit im Röhrchen empor, während der Flüssigkeitspegel bei einer nicht benetzenden Flüssigkeit sinken würde. Die Steighöhe bzw. Sinktiefe der Flüssigkeit ist, ausgenommen von den Materialkonstanten, reziprok proportional zum Radius der Kapillare (Meschede, 2010, S. 201-202).



Abbildung 15: Steighöhe einer benetzenden Flüssigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers
Apparatur: TU-Graz

Material

1 PET-Flasche

1 Glasplatte

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experimentes wird eine mit Wasser gefüllte PET-Flasche bündig auf den Rand einer kleinen Glasplatte gestellt. Diese Glasplatte wird wiederum bündig auf die glatte Oberfläche eines Tisches oder ähnliches gelegt. Verschiebt man anschließend die Glasplatte mit draufstehender PET-Flasche über die Kante des Tisches, so wird beides, nachdem der gemeinsame Schwerpunkt der beiden Objekte die Kante des Tisches überwunden hat, hinunterkippen (Abbildung 16). Hier ist Vorsicht aufgrund der Bruch- und Verletzungsgefahr geboten.

Im zweiten Teil des Experiments wird ein wenig Wasser auf die glatte Oberfläche geschüttet. Auf diese wird die Glasplatte gelegt und mit ein paar Kreisbewegungen wird das überschüssige Wasser hinausgedrängt. Nun wird die PET-Flasche wie zuvor positioniert und wieder wird beides über die Kante hinausgeschoben. Wie man in (Abbildung 17) erkennt, lässt sich die Glasplatte mit darauf stehender Flasche viel weiter über den Rand schieben als zuvor. Der gemeinsame Schwerpunkt scheint hier keine Rolle mehr zu spielen.

Physikalische Erklärung

Verantwortlich für die scheinbar klebende Wirkung sind die Adhäsions- und Kohäsionskräfte. Dabei sorgen die Adhäsionskräfte für eine Haftung der Wassermoleküle an den Molekülen der glatten Oberflächen. Die Kohäsionskräfte wiederum sind dafür verantwortlich, dass der Wasserfilm zwischen den beiden Oberflächen, aufgrund der Anziehung der Wassermoleküle untereinander, nicht reißt. Verschiebt man die Glasplatte mit darauf stehender Wasserflasche soweit über die Kante, dass die Haftwirkung nicht mehr ausreicht, so fällt die Flasche. Dabei löst sich das Wasser weder von der Glasplatte noch von der Holzplatte. Stattdessen reißt der Wasserfilm, da Wasser eine benetzende Flüssigkeit ist und die Adhäsionskräfte somit den Kohäsionskräften überlegen sind.



Abbildung 16: Kein Wasser unter der Glasplatte



Abbildung 17: Wasser unter der Glasplatte wirkt „klebend“

Material

1 Trinkglas (klein)

1 Münze

(10 Groschen)

Spülmittel

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Ein Trinkglas wird zur Gänze mit Wasser gefüllt. Nun wird ein zehn Groschen Stück auf die Oberfläche des Wassers gelegt. Hierbei ist es hilfreich, die Münze am Rand des Glases abzustützen und so auf die Wasseroberfläche zu „schieben“. Nachdem die Münze schwimmt (Abbildung 20), werden dem Wasser noch ein bis zwei Tropfen Spülmittel hinzugefügt. Man kann nun beobachten, dass die Münze untergeht und das Wasser überläuft (Abbildung 21).

Physikalische Erklärung

Die Münze besteht aus Aluminium, welches eine Dichte von $\rho = 2702 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ hat. Somit hat die Münze eine deutlich höhere Dichte als Wasser und dürfte laut dem Archimedischen Prinzip (Kapitel 3.1.3) nicht schwimmen. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, hat jede Flüssigkeit das Bestreben ihre Oberfläche minimal zu halten. Durch das Eintauchen der Münze wird die Oberfläche des Wassers vergrößert, wodurch Arbeit verrichtet werden muss. Ist das Verhältnis dieser Arbeit zur entstandenen Flächendifferenz kleiner als die Oberflächenspannung des Wassers, so wird die Münze von ihr getragen (Formel (2)). Beim Spülmittel handelt es sich um sogenannte Tenside. Deren Moleküle bestehen aus einem hydrophoben (=wasserabweisenden) und einem hydrophilen (=wasserliebenden) Teil. Werden diese dem Wasser beigemischt, so reichern sich die Tenside zuerst an der Oberfläche an. Dabei ordnen sich diese so an, dass der hydrophile Teil zum Wasser und der hydrophobe Teil zur Luft ragt (Abbildung 18). Der wasserliebende Teil des Moleküls hat eine stärkere anziehende Wirkung auf die umliegenden Wassermoleküle als die angrenzenden Luftmoleküle. Dadurch wird die resultierende, nach innen gerichtete Kraft, kleiner und somit die Oberflächenspannung reduziert (Abbildung 19). Dies hat zur Folge, dass das Geldstück untergeht (Jentsch, 1990, S. 242-243).

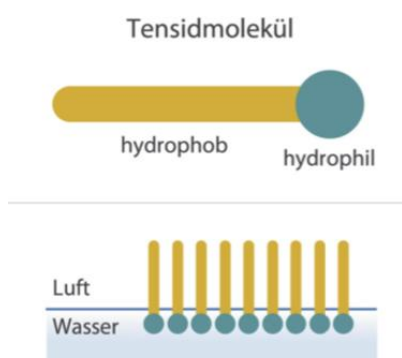


Abbildung 18: Anordnung von Tensiden an der Wasseroberfläche

Quelle: https://www.ubz-stmk.at/fileadmin/ubz/upload/Downloads/wasser/Wasser_US_2017_Experimentieren_mit_der_Oberflaechenspannung.pdf

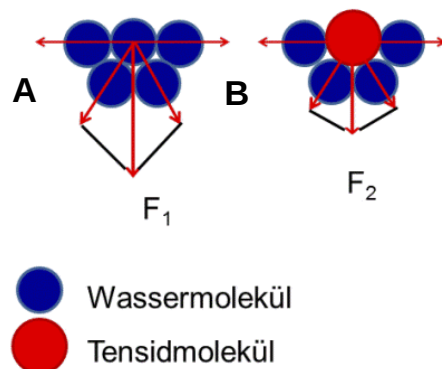


Abbildung 19: Kräfteverteilung ohne Tensid (A). Kräfteverteilung mit Tensid (B)

Quelle: <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/tenside/tenside.htm>



Abbildung 20: 10 Groschen schwimmen aufgrund der Oberflächenspannung am Wasser



Abbildung 21: Oberflächenspannung wird durch Spülmittel herabgesetzt

Material

1 PET-Flasche

Stecknadel

Feuerzeug

Teelicht

Wasserkrug

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zur Vorbereitung des Experiments wird die Stecknadel mit Hilfe des brennenden Teelichts erhitzt. Hier ist Vorsicht geboten, sodass man sich nicht verbrennt, da Metall ein guter Wärmeleiter ist. Die erhitzte Stecknadel sticht man in die PET-Flasche und brennt mit Kreisbewegungen ein kleines Loch (ca. 2 mm) hinein. Dies sollte wenige Zentimeter oberhalb des Flaschenbodens geschehen. Diesen Vorgang wiederholt man, bis man drei gleich große, sich auf derselben Höhe befindende Löcher hat. Man sollte darauf achten, dass die Löcher nicht zu groß, schön gleichmäßig rund und frei von Kunststoffresten sind. Der Abstand zwischen den Löchern sollte ca. einen Millimeter

betragen. Darauf folgend befüllt man die Flasche mit Wasser. Aus den Löchern treten nun drei separate Wasserstrahlen aus (Abbildung 22). Diese kann man durch Darüberstreichen mit einem Finger miteinander „verknotten“ (Abbildung 23). Klopft man etwas kräftiger auf die Flaschenöffnung, so teilt sich der Wasserstrahl wieder auf.

Physikalische Erklärung

Anfangs sind die Wasserstrahlen getrennt, da ihre Austrittslöcher zu weit voneinander entfernt sind um sich gegenseitig zu beeinflussen. Durch das Darüberstreichen berühren sich die Wasserstrahlen gegenseitig und werden fortan von der Kohäsion zusammengehalten. Dadurch wird die Oberfläche der Wasserstrahlen reduziert und somit auch die Energie des Systems (Kapitel 3.1.1). Dem Energiegewinn durch die Reduzierung der Oberflächenspannung steht jedoch die benötigte Energie für das Ablenken der seitlichen Wasserstrahlen entgegen. Die Kraft, die hierbei aufgebracht werden muss, steigt mit der Höhe des Wasserspiegels (Kapitel 3.1.2). Ab einer gewissen Höhe des Wasserstands ist die benötigte Energie für das Ablenken des Wasserstrahls größer als durch die Einsparung der Oberflächenspannung gewonnen werden kann. Ist der Wasserstand über dieser kritischen Höhe, so bleiben die Wasserstrahlen separiert. Sind die Wasserstrahlen miteinander verbunden, so kann man sie durch ein kurzes Klopfen voneinander trennen. Dabei wird ein Impuls übertragen, wodurch die Geschwindigkeit der Strahlen kurzzeitig erhöht wird. Durch die höhere Geschwindigkeit benötigt das Ablenken, analog zu einem höheren Wasserstand, mehr Energie als durch die Oberflächenspannung eingespart wird.

Anmerkung: Alle drei Wasserstrahlen treffen in derselben Entfernung am Boden auf (Exp. [15]).



Abbildung 22: Die Wasserstrahlen treten separat aus



Abbildung 23: Aufgrund der Oberflächenspannung verknoten sich die Wasserstrahlen miteinander

Material

1 Aquarium
(mittel bis groß)

Bärlappsporen

Wasser



Variante 2

1 Glasschüssel

(groß)

Zimt

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Aquarium wird mit Wasser gefüllt. Die Bärlappsporen werden gleichmäßig auf der Wasseroberfläche verteilt. Danach taucht man eine trockene Hand, mittig vom Aquarium, ins Wasser. Man sieht, wie die Hand von einer gelbglänzenden Schicht ummantelt wird (Abbildung 24). Zieht man die Hand wieder aus dem Wasser, so ist diese vollkommen trocken und etwas staubig von den Bärlappsporen.

Da Bärlappsporen vergleichsweise teuer sind, kann man das Experiment auch mit Zimt durchführen. Dabei kann es jedoch passieren, dass die Finger stellenweise nass werden.

Physikalische Erklärung

Bärlappsporen oder auch Lycopodium genannt, bestehen zu 50 % aus fettem Öl (Frerichs et al. 1927, S. 103). Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, handelt es sich bei Wassermolekülen um Dipole. Im Gegensatz dazu sind Öle unpolar und können daher nur schwach mit dem Wasser wechselwirken (Schmidt & Dietrich, 2014, S. 62). Aus diesem Grund sind die Kohäsionskräfte der Wassermoleküle stärker als die Adhäsionskräfte zwischen Lycopodium und Wasser. Somit kommt es zu keiner Benetzung der Bärlappsporen durch Wasser. Beim Eintauchen der Hand gerät diese zuerst mit dem Lycopodium in Berührung und wird davon ummantelt. Da es zu keiner Benetzung der Sporen kommen kann und Wasser das Bestreben hat, seine Oberfläche minimal zu halten, bildet sich außerhalb der Bärlappsporen eine Grenzschicht. Die Hand bleibt somit trocken (Korthaase, 2013, S. 29). Ähnlich verhält es sich bei Zimt.

Anmerkung: Durch Verwendung von kaltem Wasser wirkt das Phänomen eindrucksvoller, da durch den Temperaturunterschied ein Gefühl von Nässe entsteht, obwohl die Hand trocken bleibt.



Abbildung 24: Trockene Hand im Wasser durch Bärlappsporen



Abbildung 25: Trockene Hand im Wasser durch Zimt

Material

1 Glasgefäß (groß)

1 Tischtennisball

Wasserkrug

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn wird das Glasgefäß in etwa bis zur Hälfte mit Wasser befüllt. Anschließend wird mit einer möglichst ruhigen Hand der Tischtennisball in der Mitte der Wasseroberfläche platziert. Lässt man den Ball nun los, so erkennt man, wie er sich langsam auf den Rand des Glasgefäßes zubewegt. Umso näher er der Glaswand kommt umso stärker beschleunigt er. Einmal an der Seite angekommen, ändert der Ball seine gefundene Ruheposition erst durch aktive Änderung wieder (Abbildung 26). Dieser Ablauf ist mit dem gegebenen Versuchsaufbau beliebig oft wiederholbar.

Ein ähnliches Phänomen ist auch bei einem etwas abgeänderten Versuchsaufbau beobachtbar. Hierzu wird zuerst der Ball aus dem Gefäß genommen. Daraufhin wird das Behältnis soweit mit Wasser befüllt, dass sich der Wasserspiegel etwas über den Rand des Gefäßes wölbt. Danach wird der Tischtennisball am Rand der Wölbung vorsichtig positioniert und losgelassen. Der Ball strebt nun, im Gegensatz zum ersten Fall, das Zentrum der Wasseroberfläche an (Abbildung 27).

Physikalische Erklärung

Aufgrund der Adhäsions- und Kohäsionskräfte bildet sich in einem nicht vollen Wasserglas ein konkaver Meniskus (Kapitel 3.1.1). Da sich der Ball zum Rand des Glases hinbewegt, scheint es als würde sich dieser aufwärtsbewegen. Dasselbe paradoxe Verhalten tritt auf, wenn der Ball beim vollgefüllten Glas im Zentrum des konvexen Meniskus seine Ruhelage findet. Ähnlich wie bei der Glaswand sorgen die Adhäsionskräfte dafür, dass der Ball vom Wasser benetzt wird, wodurch sich die Oberfläche des Wassers vergrößert. Weiters befindet sich der Ball etwas tiefer im Wasser, als es dem Auftrieb (Kapitel 3.1.3) entsprechen würde. Somit hat der Ball das Bestreben weiter aufzusteigen. Gleichzeitig ist das Wasser bemüht, den Zustand der geringsten Energie einzunehmen und versucht die Oberfläche erneut zu minimieren. Dadurch stehen die auftreibende Kraft des Balls und die rücktreibende Kraft der Oberflächenspannung in einer Art Gleichgewicht. Mit steigender Nähe zu einem konkaven Meniskus wird die rückstellende Oberflächenkraft jedoch immer weiter in Richtung aufsteigender Kraft abgelenkt und der Ball erfährt zusätzliche Kraft nach oben. In der jeweiligen Ruhelage passt sich der Meniskus des Balls dem Glas bestmöglich an und die Oberfläche ist minimal (Schlichting, 2006, S. 2-4).

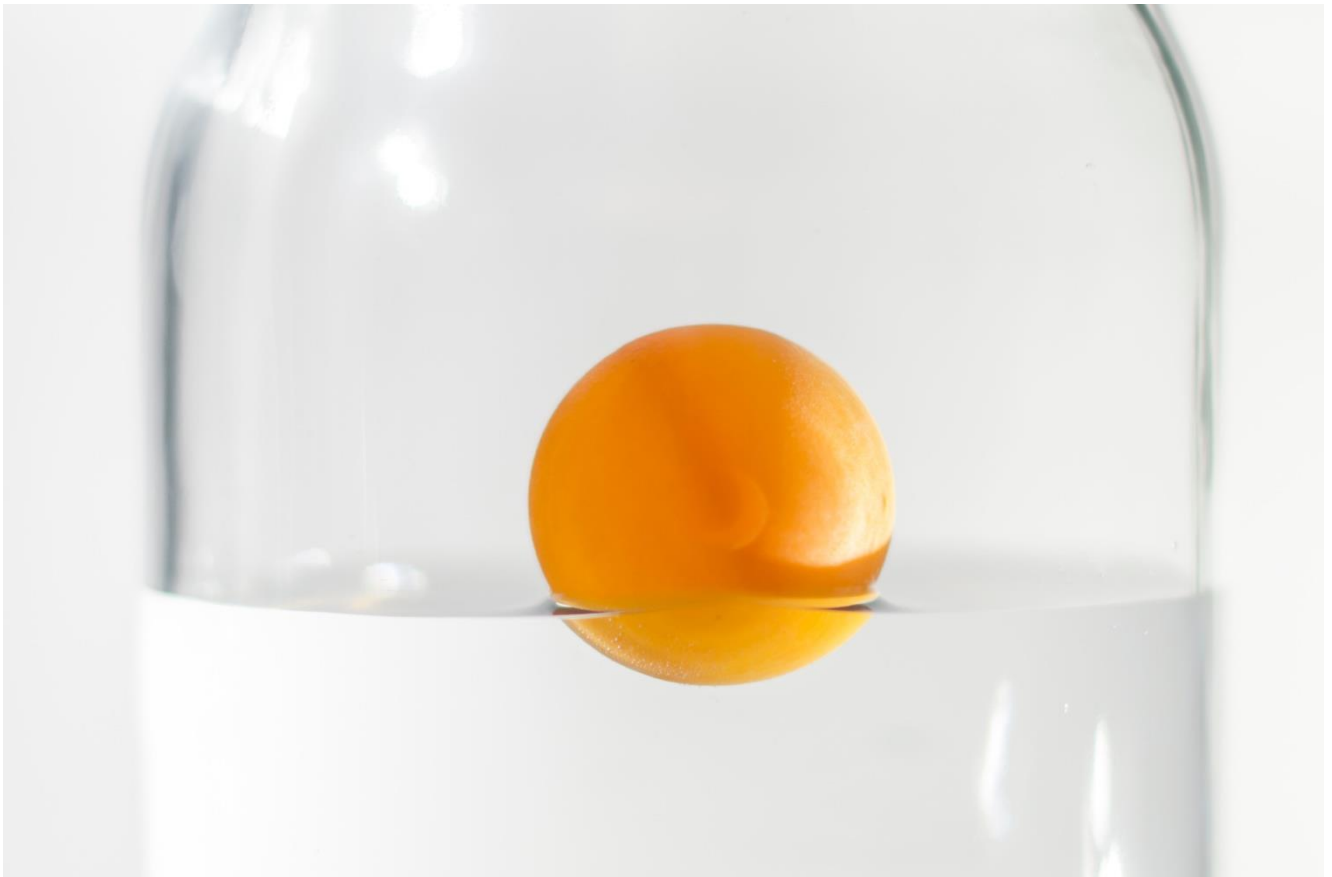


Abbildung 26: Tischtennisball bewegt sich bei halbvollem Inhalt von der Mitte zum Gefäßrand und nimmt Ruheposition ein



Abbildung 27: Tischtennisball bewegt sich bei vollgefülltem Gefäß vom Rand hin zur Mitte und verbleibt dort

Material

1 Kaffeeuntersetzer

1 Tafelkreide

1 Tintenpatrone

1 Filzstift

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Im Kaffeeuntersetzer werden die Tinte und etwas Wasser miteinander vermengt. Mittig wird die Kreide, senkrecht ins Tinten- und Wassergemisch gestellt (Abbildung 28). Wartet man eine Zeit lang, so kann man beobachten, wie die Farbe nach und nach weiter nach oben steigt (Abbildung 29).

Mit diesem Setup kann man auch eine Chromatographie durchführen. Dafür wird die Kreide in bloßes Wasser gestellt. Mit einem Permanentmarker wird ein Strich ca. 0,5 cm über dem Wasserpegel auf die Kreide gemalt. Nach einiger Zeit hat es auch hier die Farbe nach oben gezogen. Diese wurde jedoch in ihre Bestandteile zerlegt.

Physikalische Erklärung

Kreide ist sehr porös und hat somit viele Hohlräume, die wie feine Kapillaren wirken (Johannesson, 1900, S. 47). Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, wird eine Flüssigkeit in Haarröhrchen nach oben gezogen, wenn die Adhäsionskräfte zwischen den Molekülen der Flüssigkeit und den Molekülen des Materials der Kapillaren größer ist als die Kohäsionskräfte zwischen den Flüssigkeitsmolekülen. Dies trifft auf das Verhalten zwischen Kreide und Wasser zu und somit wird das Wasser nach oben gezogen.

Bei einer Chromatographie durchläuft eine mobile Phase eine stationäre Phase. Bei diesem Experiment handelt es sich bei der mobilen Phase um Wasser und bei der stationären Phase um Kreide, welche aus Calciumcarbonat CaCO_3 besteht. Im Wasser ist Tinte gelöst, so wird die Farbe nach oben getragen, jedoch nimmt die Intensität ab. Hat man die Kreide mit einem wasserlöslichen Stift bemalt, so spaltet sich dessen Farbe in ihre Bestandteile auf. Verantwortlich für das Hinaufwandern des Wassers sind die Kapillarkräfte. Für die Farbtrennung und die Intensitätsverringern sind Adsorptionskräfte verantwortlich. Aus diesem Grund handelt es sich hierbei um Adsorptionschromatographie (Förster, 2004, S. 87). Bei der Adsorption ziehen sich die Moleküle der Farbstoffe und die der Kreide aufgrund der „Van der Waals-Kräfte“ an. Dabei muss die Polarität des Farbstoffes jedoch höher sein, als die von Wasser (Kraus et al. 1996, S. 9). Da die Farbe eines Filzstiftes aus mehreren Bestandteilen mit unterschiedlicher Polarität besteht, kommt es somit zur Aufspaltung der Farben inklusive Intensitätsabnahme. Dabei bleiben die Farben mit stärkerer Polarität weiter unten an dem ebenfalls polaren Calciumcarbonat hängen.

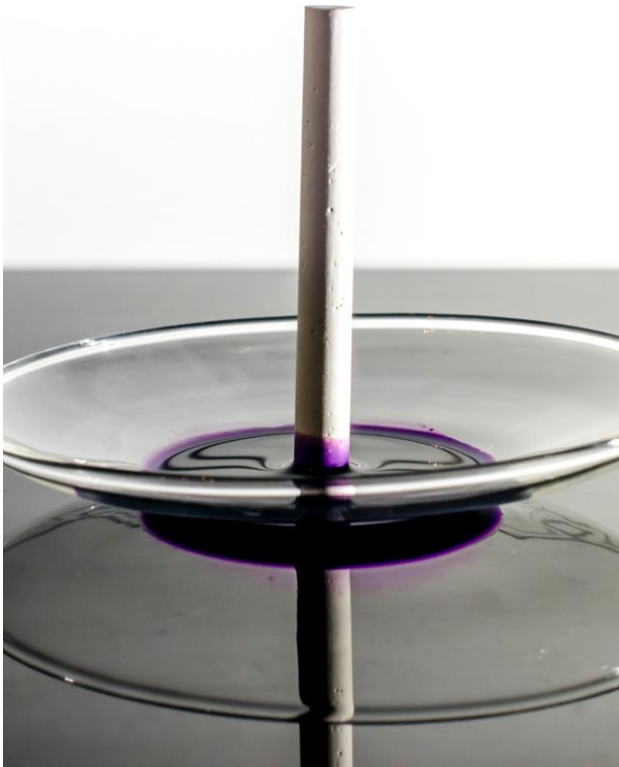


Abbildung 28: Farbe steigt an der weißen Kreide empor

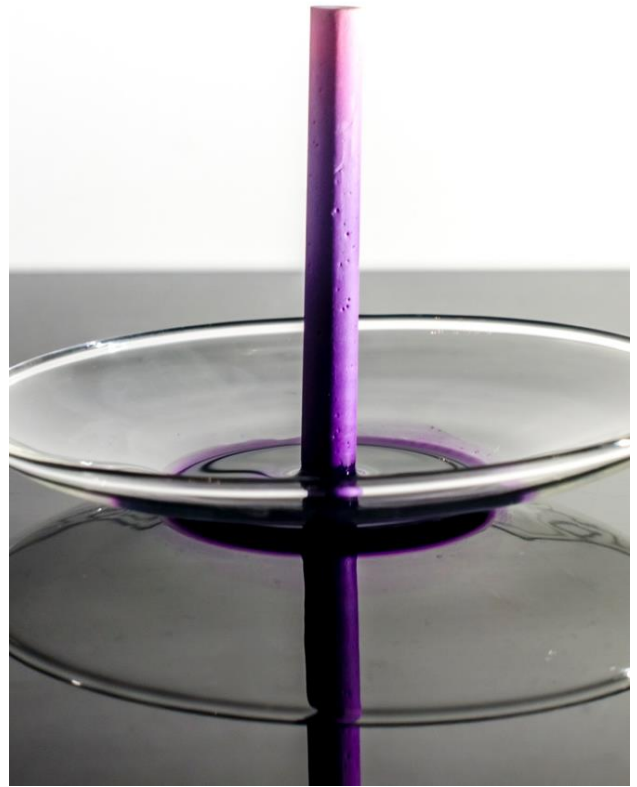


Abbildung 29: Völlig eingefärbte Kreide aufgrund Kapillarwirkung

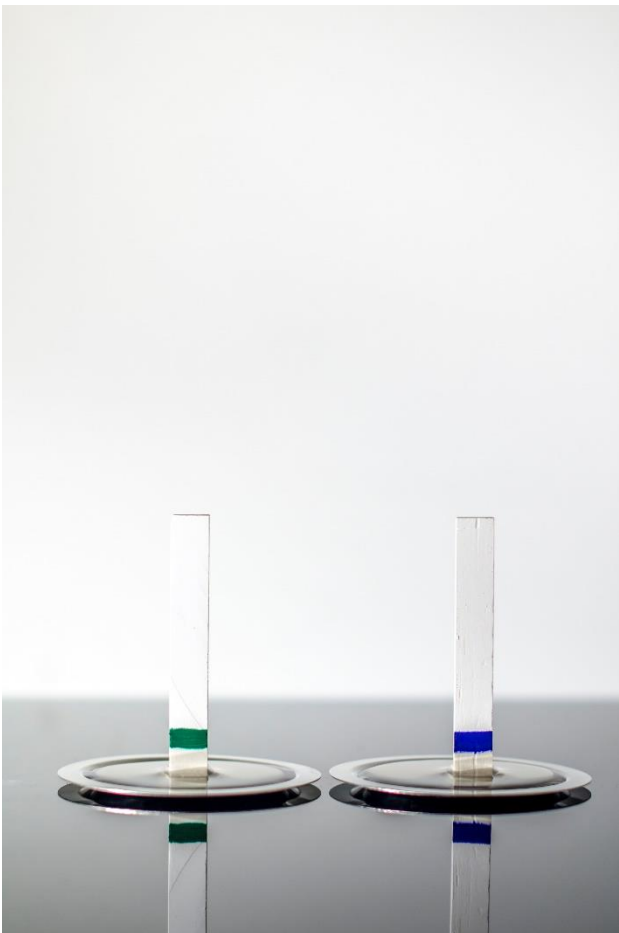


Abbildung 30: Filzstift-Strich auf Kreide

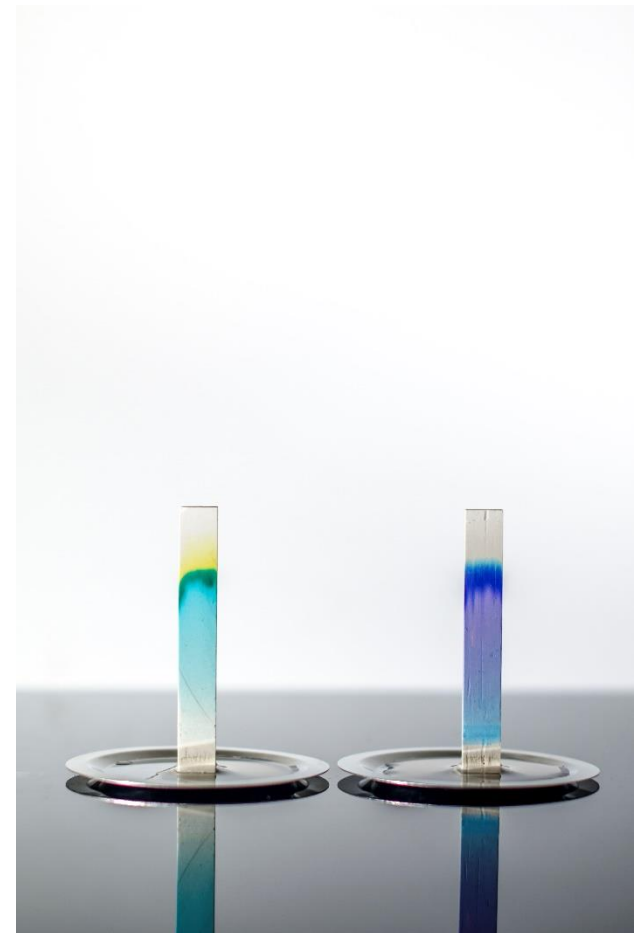


Abbildung 31: Einzelne Farbbestandteile der jeweiligen Filzstifte

Material

Diverse Drahtschlingen
 1 Metallring zur Messung
 der Oberflächenspannung
 1 Lenardscher Bügel
 1 Lenardscher Bügel
 (Variation)
 Becherglas
 Petrischale
 Seifenblasenflüssigkeit
 Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Seifenblasenflüssigkeit wird mit etwas Wasser im Becherglas vermengt. In dieses werden die diversen Drahtschlingen getaucht. Dabei bildet sich bei jeder dieser Rahmen eine Seifenlamelle, deren Form jedoch nicht einfach nur die Seitenfläche der Körper bespannt. Vielmehr werden dadurch neue Oberflächen gebildet (Abbildung 32 bis Abbildung 36). Wie das Beispiel in Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigt, können bei einem gleichen Drahtgestell unterschiedliche Flächen auftreten.

Anschließend füllt man ein wenig vom Seifenblasen-Wasser-Gemisch in die Petrischale. Taucht man nun den Metallring zur Messung der Oberflächenspannung horizontal in die Flüssigkeit und zieht diesen anschließend wieder heraus, so kann man sehen, wie sich zu Beginn ein Zylinder bildet. Dessen Form ändert sich jedoch umso weiter man den Ring nach oben zieht (Abbildung 37). Zu guter Letzt taucht man den Lenardschen Bügel und dessen Variation in die Seifenlauge. Den Lenardschen Bügel taucht man so ein, dass dessen Bügel komplett ausgefahren ist (Abbildung 38). Hat sich eine Seifenhaut gebildet und lässt man die Schnur locker, so merkt man, wie es den Bügel nach innen zieht (Abbildung 39). Die Variation des Lenardschen Bügels taucht man ein, indem man den Faden lockerlässt (Abbildung 40). Hat sich dann eine Seifenlamelle gebildet so spannt man die Schnur und es bildet sich eine Form wie in Abbildung 41.

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erläutert, sind Flüssigkeiten bestrebt ihre Oberfläche zu minimieren. Dadurch werden nicht die Seitenflächen der Drahtkörper bespannt, sondern es bilden sich in ihnen neue, kleinere Oberflächen. Beim sechsseitigen Würfel können sich zwei verschiedene Minimalflächen bilden. Einerseits bildet sich in der Mitte des Würfels eine kleine Fläche, die zu beiden Seiten hin die kleinere Fläche eines Pyramidenstumpfes darstellt. Taucht man den Würfel erneut ein und versucht eine vorhandene Luftblase im Becherglas einzufangen, so entsteht im inneren des Drahtwürfels eine Seifenblase in Form eines Würfels.

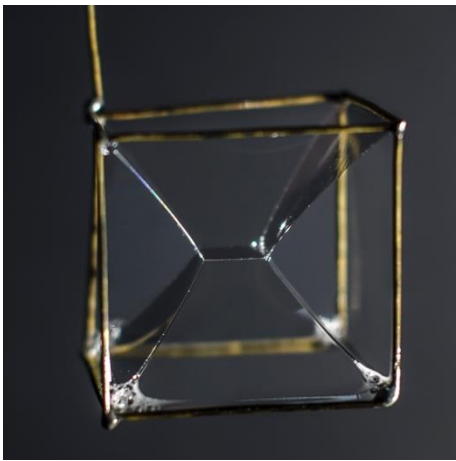


Abbildung 32: Minimalfläche bei einem Drahtwürfel – Variante 1

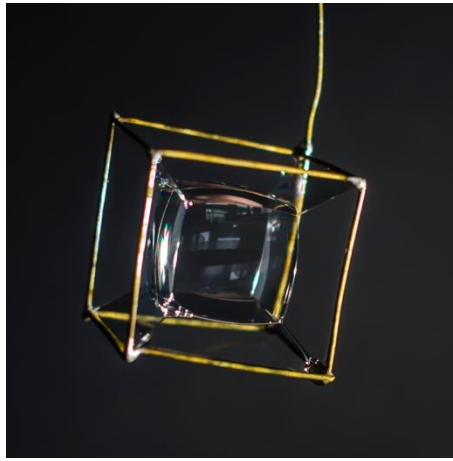


Abbildung 33: Minimalfläche bei einem Drahtwürfel – Variante 2

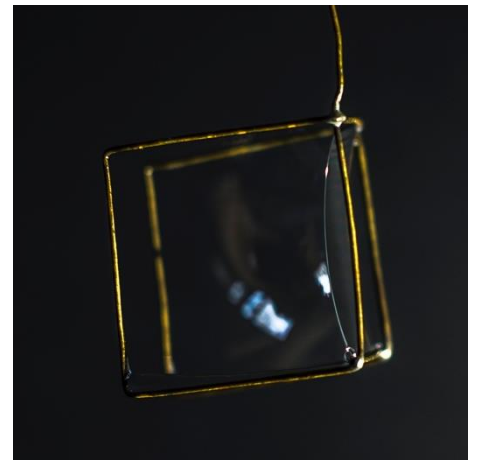


Abbildung 34: Minimalfläche bei einem drei-seitigem Würfel



Abbildung 35: Minimalfläche bei einem Tetraeder



Abbildung 36: Minimalfläche bei einer Bogenform

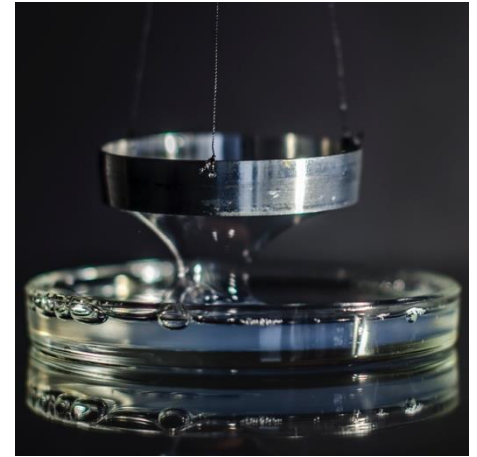


Abbildung 37: Minimalfläche durch einen Metallring

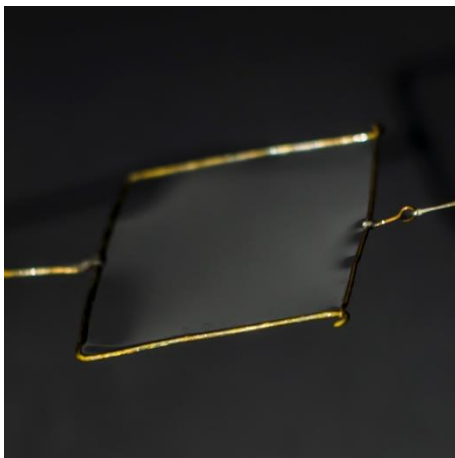


Abbildung 38: Lenardscher Bügel ausgezogen

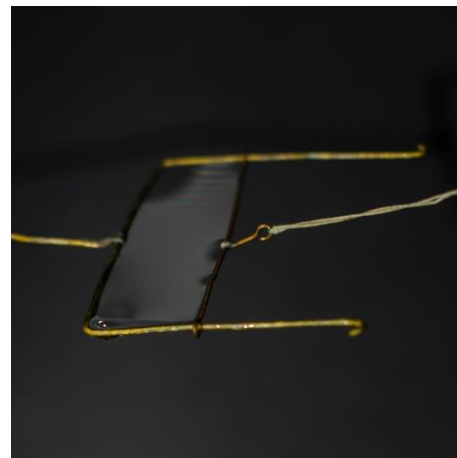


Abbildung 39: Lenardscher Bügel zusammengezogen

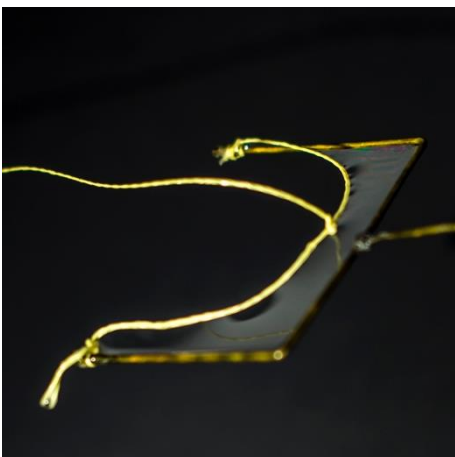


Abbildung 40: Variation des Lenardschen Bügels - Schnur zusammengezogen
Apparaturen: TU-Graz

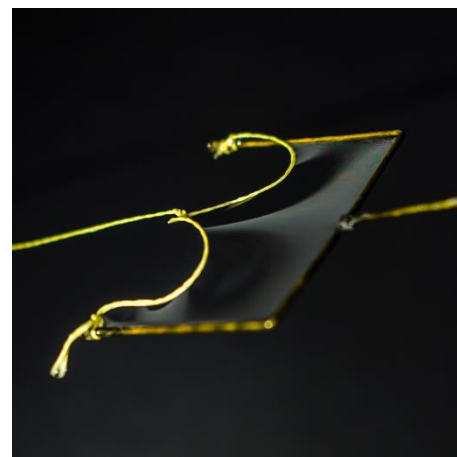


Abbildung 41: Variation des Lenardschen Bügels - Schnur ausgezogen

Die Eckpunkte des kleinen Würfels sind mit jenen des Drahtwürfels durch eine Seifenkante verbunden. Somit besteht diese Fläche aus zwölf Trapezen sowie der sechs Seitenflächen des kleinen Würfels. Beim Tetraeder verhält es sich ähnlich. Es bildet sich auch hier keine Seifenhaut an den Oberflächen. Stattdessen führt von jedem seiner Eckpunkte eine Seifenkante zum Zentrum. Das Zentrum des Tetraeders ist daher ein gemeinsamer Eckpunkt von sechs gleichschenkeligen Dreiecken. Ebenso wie beim Würfel kann man auch hier eine Luftblase einfangen und es bildet sich analog ein kleiner Tetraeder. Die Wahrscheinlichkeit, dass solch ein Körper im Inneren entsteht, liegt bei ca. 1:3.

Im Folgenden wird mathematisch gezeigt, dass die entstehende Minimalfläche tatsächlich kleiner ist, als die ausgefüllte Oberfläche des Tetraeders. Dazu wird angenommen, dass jede Kante eine Gerade und jede Fläche eine Ebene ist. Zu Beginn schreibt man den Tetraeder in einen Würfel mit der Seitenlänge $a = 1$ ein. Dies bringt den Vorteil, dass die Seitenlängen des Tetraeders der Diagonalen d der Würfelflächen entsprechen und somit auch der Basis der gleichschenkeligen Dreiecke, aus welchen die Minimalfläche besteht (Abbildung 42). Die Länge der Basis entspricht somit $c = \sqrt{2}$. Die Schenkellängen b der Dreiecke entsprechen der halben Raumdiagonale D des Würfels, somit gilt:

$$b = \frac{D}{2} = \frac{\sqrt{d^2 + a^2}}{2} = \frac{\sqrt{(a \cdot \sqrt{2})^2 + a^2}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3)$$

Mit Hilfe der Seitenlängen und des Satzes von Pythagoras kann man die Höhe h der Dreiecke bestimmen:

$$h^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \Leftrightarrow h = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2} \Leftrightarrow h = \sqrt{\frac{3}{4} - \frac{2}{4}} \Leftrightarrow h = \frac{1}{2} \quad (4)$$

Dadurch kann die Fläche $A_{\text{Dreieckklein}}$ der Dreiecke bestimmt werden:

$$A_{\text{Dreieckklein}} = \frac{1}{2}hc = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}}{4} \quad (5)$$

Da die Minimalfläche A_{Minimal} aus sechs solchen Dreiecken besteht, wird die Dreiecksfläche nur noch mit sechs multipliziert und man erhält:

$$A_{\text{Minimal}} = 6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{4} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \approx 2,121 \quad (6)$$

Für den Vergleich mit der Oberfläche des Tetraeders muss man zunächst die Flächen der vier gleichseitigen Dreiecke, aus welchen dieser besteht, berechnen. Die Seitenlänge s des Tetraeders entspricht wie anfangs bereits beschrieben: $s = \sqrt{2}$. Die Höhe H der Dreiecke lässt sich nun ebenfalls mit dem Satz des Pythagoras bestimmen:

$$H^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = (\sqrt{2})^2 \Leftrightarrow H = \sqrt{2 - \frac{2}{4}} \Leftrightarrow H = \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

Mit Hilfe dieser lässt sich analog zu den kleinen Dreiecken die Fläche $A_{Dreieckgroß}$ berechnen:

$$A_{Dreieckgroß} = \frac{1}{2} \cdot H \cdot s = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

Zum Schluss muss man diese Dreiecksfläche mit vier Multiplizieren und erhält die Oberfläche $A_{Tetraeder}$ des Tetraeders:

$$A_{Tetraeder} = 4 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 3,464 \quad (9)$$

Somit macht die Minimalfläche $A_{Minimal}$ nur 61,23 % der Oberfläche $A_{Tetraeder}$ aus.

Bei dem dreiseitigen Würfel kann man erkennen, dass die gebildete Oberfläche konkav ist. Der Drahtbügel in Abbildung 36 erzeugte als Minimalfläche eine Sattelfläche. Mit Hilfe des Metallrings sowie des Lenardschen Bügels kann man die Oberflächenspannung der Seifenlamelle bestimmen. Bei Letzterem muss man eine Kraft aufwenden, um den Bügel um eine gewisse Länge Δs zu verschieben. Dabei wird eine Arbeit verrichtet:

$$\Delta W = F \cdot \Delta s \quad (10)$$

Dadurch wird die Fläche der Seifenhaut verändert. Diese befindet sich auf beiden Seiten des Bügels, von daher rührt der Faktor 2:

$$\Delta A = 2 \cdot \Delta s \cdot l \quad (11)$$

Setzt man nun in Formel (2) ein, so erhält man:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} = \frac{F \cdot \Delta s}{2 \cdot \Delta s \cdot l} \Leftrightarrow \sigma = \frac{F}{2 \cdot l} \quad (12)$$

Dabei ist, wie in Abbildung 43 ersichtlich, l die Länge des Lenardschen Bügels (Meschede, 2010, S198).

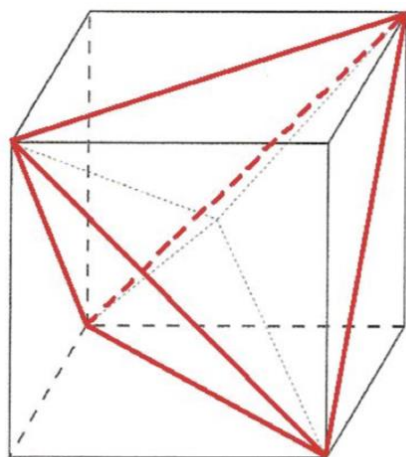


Abbildung 42: Tetraeder in Würfel eingeschrieben

Quelle: <https://mug.didaktik-graz.at/Files/Mathematikum/Seifenhauttisch.pdf>

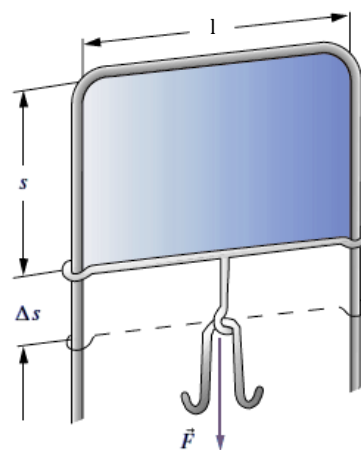


Abbildung 43: Lenardscher Bügel

Quelle: adaptiert von: Meschede, 2010, S. 198

Material

2 Glasrohre
(rechtwinkelig-gebogen
mit Trichteröffnung)

1 Schlauch

Stativ mit Klemme

Seifenblasenflüssigkeit

Petrischale

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Seifenblasenflüssigkeit wird in der Petrischale mit etwas Wasser vermengt. Bei einem der rechtwinkelig-gebogenen Glasrohre wird der Schlauch an der Trichteröffnung abgewandten Seite angebracht. Nun taucht man jeweils die Trichteröffnung der beiden Glasrohre (im Bild das untere Ende der Glasrohre) in das Seifenblasen-Wasser-Gemisch und bläst durch die andere Öffnung des Glasrohrs bzw. durch den Schlauch. Bei beiden Trichteröffnungen bildet sich eine Seifenblase. Schnell und mit ein bisschen Geschick verbindet man auch das zweite Glasrohr mit dem Schlauch. Die zwei Seifenblasen bilden nun ein miteinander

verbundenes System. Dieses hängt man in die Klemme des Stativs. Haben die Seifenblasen eine unterschiedliche Größe (Abbildung 44) so bläst die kleinere die größere auf (Abbildung 45). Sind die Seifenblasen jedoch gleich groß, so bleiben beide bestehen bis sie nach einer Weile platzen (siehe Video).

Physikalische Erklärung

Eine Seifenblase ist stabil, wenn sich die Kraft der Oberflächenspannung F_o sowie die durch den im Inneren der Seifenblase herrschenden Überdruck Δp verursachte Druckkraft F_p ausgleichen. Dabei ist die Kraft der Oberflächenspannung $F_o = \frac{dW}{dr}$ nach innen und die Druckkraft $F_p = \Delta p \cdot A$ nach außen gerichtet. Mit Hilfe von Formel (2) lässt sich F_o darstellen durch:

$$F_o = \frac{dW}{dr} = \frac{\sigma \cdot dA}{dr} = \sigma \frac{d}{dr} (2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2) = 16 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r \quad (13)$$

Setzt man bei der Druckkraft die Innenfläche der Seifenblase ein, so folgt:

$$F_p = \Delta p \cdot A = \Delta p \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (14)$$

Nun setzt man die beiden Kräfte gleich:

$$F_p = F_o \Leftrightarrow \Delta p \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 16 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r \Leftrightarrow \Delta p \cdot r = 4 \cdot \sigma \Leftrightarrow \Delta p = \frac{4 \cdot \sigma}{r} \quad (15)$$

Man sieht hiermit, dass der Innendruck der Seifenblase mit wachsendem Radius r kleiner wird. Dadurch wird die große Seifenblase auf Kosten der kleinen aufgeblasen (Demtröder, 2006, S. 181-182; Westphal & Westphal, 1970, S. 130).



Abbildung 44: Zwei Seifenblasen bilden ein verbundenes System
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 45: Aufblasen der großen Seifenblase auf Kosten der kleineren
Apparatur: TU-Graz

3.1.2 Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen

Hydrostatischer Druck in Flüssigkeiten

Bei Flüssigkeiten handelt es sich um Materie, welche sich im flüssigen Aggregatzustand befindet. Die Moleküle können sich in einer Flüssigkeit gegenseitig verschieben, jedoch gibt es zwischen ihnen keinen Freiraum. Dementsprechend lässt sich die Form einer Flüssigkeit leicht verändern, allerdings ist sie nahezu inkompressibel. Aufgrund dieser Beweglichkeit ist der Druck in einer Flüssigkeit konstant, wenn man die Schwerkraft außer Acht lässt. Unterliegt ein Fluid in einem Gefäß dem Einfluss des Schwerfelds der Erde, so verursacht die Gewichtskraft des Fluids einen Druck auf den Boden des Behälters (Demtröder, 2006, S. 177-187). Im Allgemeinen beschreibt man den Druck p durch:

$$p = \frac{F}{A} \quad (16)$$

Dabei beschreibt F eine Kraft, die auf die Fläche A drückt. Möchte man nun den durch die Flüssigkeitssäule mit der Höhe h verursachten Druck auf dem Boden des Behälters mit der Fläche A bestimmen, so setzt man die Gewichtskraft F_G der Flüssigkeit ein:

$$F_G = m \cdot g = V_{\text{Flüssigkeit}} \cdot \rho_{\text{Flüssigkeit}} \cdot g = h \cdot A \cdot \rho_{\text{Flüssigkeit}} \cdot g \quad (17)$$

Dabei ist m die Masse der Flüssigkeit, $\rho_{\text{Flüssigkeit}}$ ihre Dichte und g die Schwerebeschleunigung. Setzt man nun in die Gleichung für den Druck ein (Formel (16)), so erhält man die Formel für den hydrostatischen Druck (Kommer et al. 2015, S. 168):

$$p = \frac{F_G}{A} = \frac{h \cdot A \cdot \rho_{\text{Flüssigkeit}} \cdot g}{A} = h \cdot \rho_{\text{Flüssigkeit}} \cdot g \quad (18)$$



Abbildung 46: Kommunizierende Röhren
Apparatur: TU-Graz

Wie man anhand von Formel (18) erkennt, ist der Hydrostatische Druck einer Flüssigkeit unabhängig von der Grundfläche und nimmt linear mit der Tiefe zu (Abbildung 49). Somit ist der Druck einer Flüssigkeit in einem Gefäß unabhängig von der Form und hängt nur von der Füllhöhe ab. Dieses Phänomen wird das hydrostatische Paradoxon (Exp. [14]) genannt und lässt sich mit Hilfe von kommunizierenden Röhren darstellen (Abbildung 46). Bei diesem Gefäß sind die einzelnen Röhren miteinander verbunden. Füllt man Flüssigkeit ein, so stellt sich in jedem der Rohre ein gleich hoher Flüssigkeitspegel ein, da unabhängig vom Querschnitt, der gleiche Druck herrscht (Tipler & Mosca, 2008, S. 376-377).

Luft

Die Erdatmosphäre, welche uns umgibt, besteht aus einem Gasgemisch, dessen stoffliche Zusammensetzung bis zu einer Höhe von ca. 100 km beibehalten wird. Dies gilt jedoch insbesondere nur für trockene Luft, denn der Wasserdampfgehalt kann stark variieren. Weiters ist dieses Gasgemisch geruchs- und geschmacklos. Trockene Luft setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft (Klose, 2008, S. 11)

Hauptbestandteile	Chemisches	Molmasse	Volumenanteil
Gas	Symbol	($10^{-3} \text{ kgmol}^{-1}$)	(in %)
Stickstoff	N ₂	28,013	78,08
Sauerstoff	O ₂	31,999	20,95
Argon	Ar	39,948	0,93
Kohlendioxid	CO ₂	44,010	0,038
Spurengase	Ne, He, Kr, H ₂ , N ₂ O, Xe	unterschiedlich	<0,01

Geht man davon aus, dass trockene Luft einen Volumenanteil von 100 % hat, so lässt sich die Molmasse mit Hilfe von Tabelle 1 berechnen (Malberg, 2007, S. 5-6; Klose, 2008, S. 10-11):

$$28,013 \cdot 0,7808 + 31,999 \cdot 0,2095 + 39,948 \cdot 0,0093 + 44,010 \cdot 0,0038 = 28,96458 \quad (19)$$

Somit hat trockene Luft eine Molmasse von $M = 28,965 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$. Mit Hilfe der Formel

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (20)$$

und der Annahme, dass es sich bei Luft um ein ideales Gas handelt, berechnet sich die Dichte ρ von Luft auf einen Wert von $\rho = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ im Normalzustand. Dabei wird der Normalzustand definiert mit einem Luftdruck von $p = 1013 \text{ hPa}$ und einer Temperatur von $T = 0^\circ\text{C}$. Weiters ist $R = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ die allgemeine Gaskonstante (Malberg, 2007, S. 8; Kommer et al. 2015, S.169 & 258).

Luftdruck

Beim Luftdruck handelt es sich ebenfalls um einen hydrostatischen Druck. Ähnlich wie bei Flüssigkeiten gibt es einen Zusammenhang zwischen Druck und der vertikalen Ausdehnung des Gases. Dieser ist jedoch um einiges komplexer, da ein Gas aufgrund der molekularen Beschaffenheit (Kapitel 2.2.2) komprimierbar ist. Dies bewirkt, dass die Dichte der Luft mit zunehmender Tiefe steigt, da die Gewichtskraft wächst. Um den Zusammenhang zwischen Druck und Höhe der Luft darzustellen, betrachtet man ein rechteckiges Volumenelement der Luft mit der Dichte ρ , welches sich in der Höhe h befindet. Zudem wird das Volumenelement beschrieben durch die Grundfläche A , die infinitesimal kleine Höhe dh und der Masse dm

(Abbildung 47). Dieses Luftpaket befindet sich in Ruhe, d. h. die Summe aller wirkenden Kräfte muss null sein. Die einzige nach oben wirkende Kraft ist die durch den Atmosphärendruck p verursachte Druckkraft $F_u = A \cdot p$ auf die Unterseite des Rechtecks. Nach unten wirken währenddessen die Gewichtskraft $F_G = \rho \cdot dh \cdot A \cdot g$, sowie die Druckkraft F_o auf die obere Seite des Luftvolumens. Der Atmosphärendruck erhöht sich mit der Höhenänderung dh jedoch um dp und somit ist $F_o = A \cdot (dp + p)$. Setzt man die drei Kräfte aufgrund des Gleichgewichts null, so erhält man:

$$F_u - F_G - F_o = 0 \Leftrightarrow A \cdot p - \rho \cdot dh \cdot A \cdot g - A \cdot (dp + p) = 0 \quad (21)$$

Durch Vereinfachung sowie Umformung der Gleichung erhält man folgende Differentialgleichung mit zwei Variablen p und ρ :

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh \quad (22)$$

Aufgrund des Gesetzes von Boyle-Mariotte (Kapitel 3.2.5) kann eine der Variablen eliminiert werden durch:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} \Leftrightarrow \rho = p \cdot \frac{\rho_0}{p_0} \quad (23)$$

Setzt man nun ρ aus Formel (23) in Formel (22) ein und trennt die Variablen, so erhält man:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot dh \quad (24)$$

Im nächsten Schritt integriert man von $h = 0$ bis $h = h_E$. In Höhe h_E ist der Druck $p = p_E$:

$$\int_{p_0}^{p_E} \frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot \int_0^{h_E} dh \quad (25)$$

Durch die Integration erhält man:

$$\ln \frac{p_E}{p_0} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h_E \quad (26)$$

Formt man letztendlich auf p_E um und setzt anstelle von p_E und h_E die Größen p und h ein, so erhält man die Barometrische Höhenformel:

$$p = p_0 \cdot e^{-\left(\frac{\rho_0}{p_0}\right) \cdot g \cdot h} \quad (27)$$

Formel (27) lässt sich noch durch Definition der sogenannten Skalenhöhe H vereinfachen, welche die Höhe beschreibt, bis zu welcher die Luftsäule reichen würde, wenn die Dichte der Luft mit steigender Höhe nicht abnehmen würde. Dabei handelt es sich um die umgeformte Formel (18) für den hydrostatischen Druck:

$$H = \frac{p_0}{g \cdot \rho_0} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 1,293 \frac{kg}{m^3}} \approx 8000 m \quad (28)$$

Dies bedeutet, dass die Atmosphäre nur bis 8000 m reichen würde und der Gipfel des Mount-Everest würde schon daraus emporragen. Setzt man nun die Skalenhöhe H in die barometrische Höhenformel, so erhält man:

$$p = p_0 e^{-\frac{h}{H}} \quad (29)$$

Bei Formel (29) würde bei der Skalenhöhe die Atmosphäre noch nicht zu Ende sein, sondern lediglich um den Faktor $\frac{1}{e}$ abgenommen haben. Der Luftdruck nimmt mit der Höhe exponentiell ab (Abbildung 48).

Es gilt dennoch zu beachten, dass es sich bei Formel (29) lediglich um eine gute Näherung handelt. Mit dem Höhenanstieg nimmt die Temperatur im Normalfall ab. Diese Temperaturdifferenzen wurden in dieser Berechnung jedoch nicht berücksichtigt (Tipler & Mosca, 2008, S. 379; Meschede, 2010, S. 106-107).

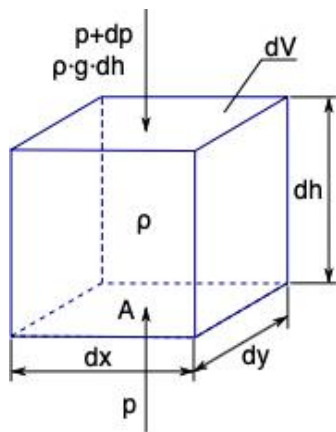


Abbildung 47: Rechteckiges Volumenelement der Luft

Quelle: https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/-Barometrische_Hoehenformel

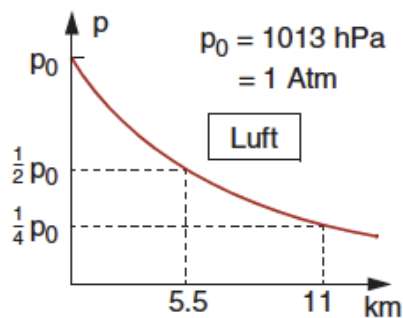


Abbildung 48: Exponentieller Druckverlauf von Luft mit steigender Höhe

Quelle: Demtröder, 2006, S. 201

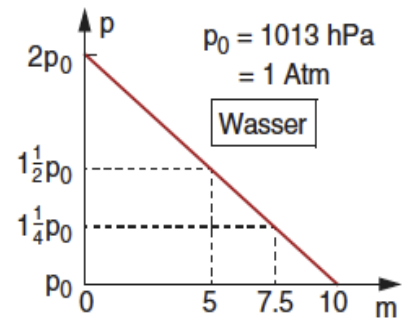


Abbildung 49: Linearer Druckverlauf von Wasser mit steigender Höhe. Der Druck beginnt bei ca. 2 bar da zum Wasserdruck noch 1 bar Luftdruck hinzukommt

Quelle: Demtröder, 2006, S.201

Anmerkung: Der Druck bei Fluiden ändert sich mit der Höhe aufgrund der Gewichtskraft. Da sich die Moleküle in einer Flüssigkeit in jede Richtung und in einem Gas komplett frei bewegen können, üben diese Stöße auf umliegende Flächen aus. Dadurch wirkt auf diese ein Impuls und somit auch eine Kraft. Durch die freie Beweglichkeit der Teilchen wirkt der daraus resultierende Druck in alle Richtungen (Kulisch, 2015, S. 60-61).

Material

1 Druckausbreitungsgerät

Becherglas

Destilliertes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Kolben wird aus dem Druckausbreitungsgerät genommen und anschließend wird dessen Kolbendichtung befeuchtet. Ist der Kolben wieder eingeführt, so taucht man das Druckausbreitungsgerät in ein mit destilliertem Wasser befülltes Becherglas. Durch ständiges Pumpen des Kolbens wird das Druckausbreitungsgerät mit Wasser vollgefüllt und der Kolben wird zum Schluss nach oben gezogen. Anschließend legt man das Gerät so auf eine Arbeitsfläche, dass die Wasserstrahlen horizontal austreten können.

Drückt man den Kolben nun in das Innere des Gerätes, so tritt aus jeder Öffnung ein gleich langer Wasserstrahl in die entsprechende Richtung aus (Abbildung 50).

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, sind Flüssigkeiten nahezu inkompressibel. Die Kompressibilität lässt sich berechnen durch:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (30)$$

Die Einheit der Kompressibilität ist, wie man anhand der Formel erkennen kann, reziprok zur Einheit des Drucks. Die Kompressibilität von Wasser ist mit $\kappa = 5 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$ sehr gering. Aufgrund der niedrigen Kompressibilität lässt sich diese vernachlässigen (Meschede, 2010, S. 102). Drückt man nun mit dem Kolben auf das Wasser, so wird der Druck aufgrund der Verschiebbarkeit der Moleküle mit gleicher Stärke fortgepflanzt, d. h. der Druck nimmt in der gesamten Flüssigkeit gleichmäßig zu. Diesen Vorgang bezeichnet man als das Pascal'sche Prinzip (Giancoli, 2010, S. 457). Da sich weiters alle Austrittslöcher auf derselben Höhe befinden und der Druck gleichmäßig zunimmt, spritzt das Wasser aus allen Öffnungen gleich weit.



Abbildung 50: Pascal'sches Prinzip mit Hilfe eines Druckausbreitungsgeräts
Apparatur: TU-Graz

Material

1 Dosierspritze (20 ml)

1 Dosierspritze (5 ml)

1 Infusionsbesteck

Trinkglas (klein)

Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Das Trinkglas wird mit Wasser befüllt. In dieses wird die große Dosierspritze gehalten und durch Zurückziehen des Kolbens mit Wasser vollgefüllt. Bei dem Infusionsbesteck wird ein Stück Schlauch (ca. 20 cm) abgeschnitten und auf der Düse der großen Spritze befestigt. Nun wird durch Drücken des Kolbens der Schlauch mit Wasser befüllt. Auf diesen wird im Anschluss die kleine Spritze auf dieselbe Weise befestigt. Drückt man nun den Kolben der großen Spritze, so gelangt Wasser in die kleinere und ihr Kolben wird angehoben (Abbildung 51). Drückt man nun umgekehrt

den Kolben der kleinen Spritze, so bewegt sich das Wasser wieder zurück (Abbildung 52). Für das Drücken des kleineren Kolbens wird dabei viel weniger Kraft benötigt als in die umgekehrte Richtung.

Physikalische Erklärung

Wie bereits bei Exp. [9] erklärt, wirkt der von außen zugefügte Druck durch einen Kolben auf eine eingespernte Flüssigkeit überall gleich stark. Dies beruht auf der zu vernachlässigenden Inkompressibilität des Wassers und der Beweglichkeit der Moleküle. Wird nun der Kolben der kleinen Spritze mit der Fläche A_1 um den Weg s_1 mit Hilfe der Kraft F_1 verschoben, so wird Wasser mit dem Volumen $V = A_1 \cdot s_1$ durch den Druck $p = \frac{F_1}{A_1}$ in die große Spritze befördert. Dort bewirkt das verschobene Wasservolumen, dass der Kolben um $s_2 = \frac{V}{A_2}$ nach oben gedrückt wird. Somit erfährt der Kolben eine Kraft von $F_2 = p \cdot A_2$. Setzt man nun für den Druck $p = \frac{F_1}{A_1}$ ein, so erhält man (Harten, 2014, S. 85):

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (31)$$

Mit Hilfe dieser Formel kann man den Kräfteunterschied für das Bewegen der Kolben der Dosierspritzen berechnen. Das Volumen der Spritzen berechnet sich durch $V = A \cdot h$. Da das Volumen mit 20 ml bzw. 5 ml angegeben ist, kann man, wenn man die Höhe mit einem Lineal bestimmt, die Flächen der Kolben errechnen. Bei dieser Durchführung wurden für $A_1 = 1,25 \text{ cm}^2$ und für $A_2 = 3,18 \text{ cm}^2$ berechnet. Drückt man den kleinen Kolben mit einer Kraft von $F_1 = 1 \text{ N}$, so braucht man für das Zurückdrücken des großen Kolbens eine Kraft von $F_2 = \frac{1}{1,25} \cdot 3,18 = 2,5 \text{ N}$, also das Zweieinhalbfache.



Abbildung 51: Wasser wird durch Drücken der großen Spritze mit hohem Kraftaufwand in die kleinere befördert

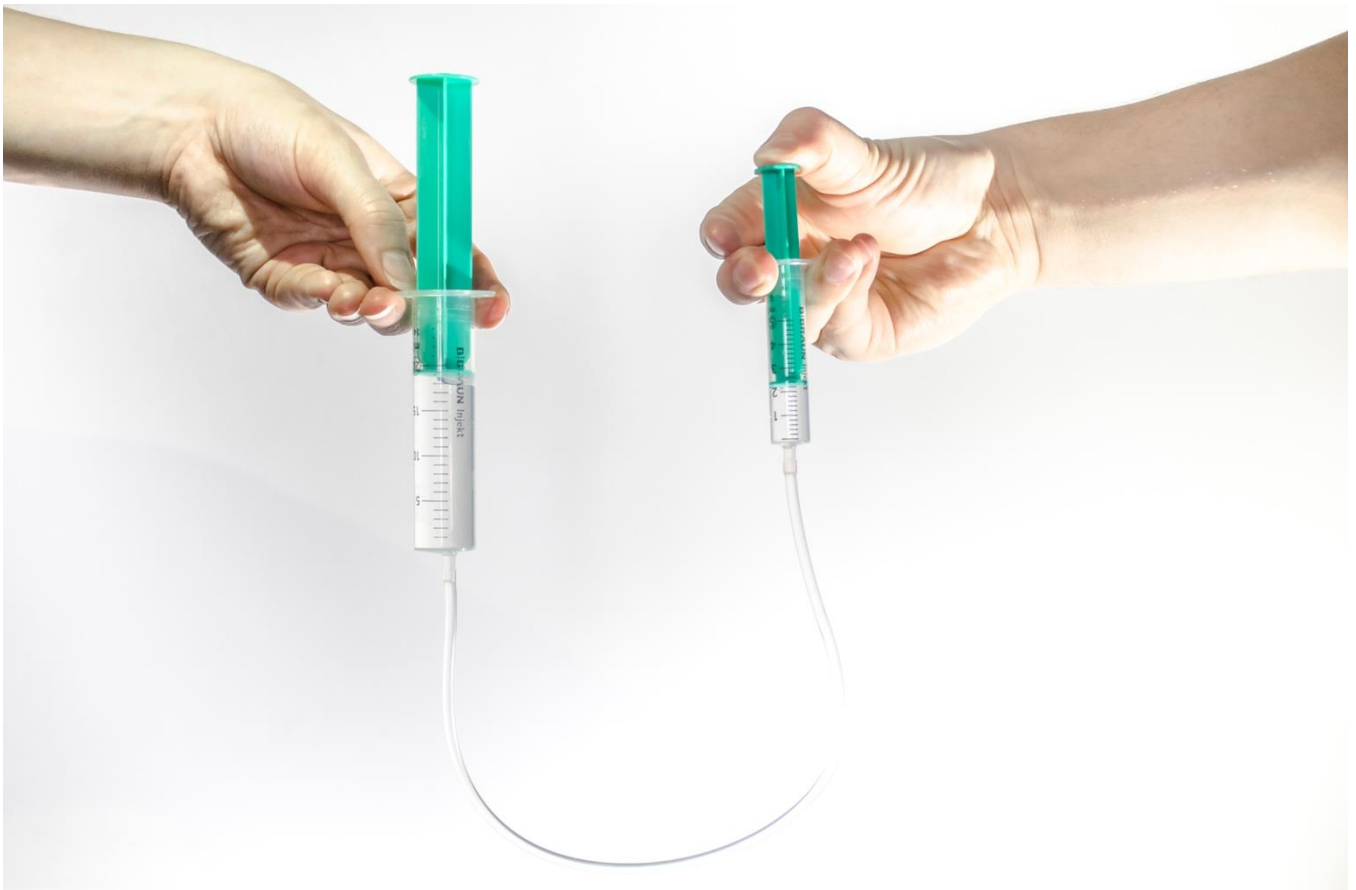


Abbildung 52: Wasser wird durch Drücken der kleinen Spritze mit geringem Kraftaufwand in die größere befördert

Material

1 Weinglas

1 Glasgefäß (groß)

1 Teelicht

Feuerzeug

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zur Vorbereitung des Versuchs wird das Glasgefäß in etwa bis zur Hälfte mit Wasser befüllt. Nun legt man ein Teelicht mit ruhiger Hand auf die Wasseroberfläche, zündet dieses an und stülpt das Weinglas über das Teelicht. Anschließend drückt man das Weinglas gerade nach unten.

Man kann beobachten, dass sich das Weinglas nur ein wenig mit Wasser füllt und die Kerze eine Zeit lang weiterbrennt (Abbildung 54). Nach Erlöschen der Kerze füllt sich das Glas ein wenig, jedoch nicht vollständig mit Wasser.

Physikalische Erklärung

Durch das gerade Eintauchen des Weinglases wird die Luft eingesperrt. Dies rührt daher, dass Luft mit $\rho = 1,293 \frac{kg}{m^3}$ eine geringere Dichte hat als Wasser mit $\rho = 998,2 \frac{kg}{m^3}$ und somit nach oben ausweichen will (Kapitel 3.1.3) (Kuchling, 2011, S. 616). Würde man das Glas unter Wasser neigen, so könnte man beobachten, wie die Luft nach oben steigt und sich das Glas mit Wasser füllt. Da wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben Luft nicht nichts ist, wird der Raum im Glas von dieser besetzt und es kann kein Wasser eintreten. Nach demselben Prinzip wurden in der Vergangenheit Taucherglocken gebaut (Abbildung 53). Verfügt diese über keine Sauerstoffzufuhr, so war der Sauerstoff früher oder später durch das Atmen aufgebraucht. Analog erlischt die Kerze nach einer Weile aufgrund von Sauerstoffmangel. Die Tatsache, dass der Wasserstand im Glas steigt, hat einerseits damit zu tun, dass die Luft komprimiert wird und dem Wasser somit etwas Platz überlässt. Andererseits hat es mit dem Erlöschen der Kerze zu tun, dies wird jedoch in Experiment [55] näher erläutert.



Abbildung 53: Taucherglocke

Quelle: <https://digitaltmuseum.se-/021017097366/en-kopia-av-en-dykarklocka-fran-1600-talet-provas/media?slide=0>



Abbildung 54: Tauchende Kerze

Material

1 Glasflasche
1 Trichter
1 Tintenpatrone
1 Strohhalm
Wasserkrug
Knetmasse
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experimentes wird die übliche Verwendung eines Trichters demonstriert. Dazu wird mit Tinte eingefärbtes Wasser, welches der besseren Sichtbarkeit dient, mit Hilfe eines Trichters in eine Flasche hineingeschüttet (Abbildung 55).

Anschließend wird diese wieder geleert und der Trichter erneut auf die Flasche gesetzt. Der Flaschenhals wird so mit Knetmasse ummantelt, dass die Verbindung zwischen Flaschenöffnung und Trichter luftdicht verschlossen ist. Füllt man nun wiederum das eingefärbte Wasser über den Trichter in die Flasche, so fließt nur anfangs ein wenig Wasser durch.

Das restliche Wasser sammelt sich im Trichter an und kann nicht mehr nach unten hin abfließen (Abbildung 56). Steckt man nun einen Strohhalm durch die Tülle des Trichters, sodass eine Öffnung in die Flasche ragt und die andere oberhalb des Wasserpegels ist, so fließt wieder Wasser in die Flasche. Verschließt man die obere Öffnung des Strohhalms mit einem Finger, so stoppt der Wasserfluss erneut.

Physikalische Erklärung

Trichter sind stets so konstruiert, dass sie nur an kleinen Auflagenflächen einen Kontakt zur Flasche bilden. Dadurch ist zwischen der Außenseite des Trichters und dem Flaschenhals ein Raum geschaffen, durch welchen stets ein Luftaustausch möglich ist. Füllt man nun Wasser über den Trichter in die Flasche, so verdrängt das einfließende Wasser die Luft. Da die Dichte von Luft mit $\rho = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ geringer ist als jene von Wasser mit $\rho = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ wird sie nach oben gedrückt und kann durch die Öffnung entweichen (Kuchling, 2011, S. 616). Wird der Raum zwischen Außenseite des Trichters und dem Flaschenhals mit Knetmasse verstopft, so kann keine Luft mehr entweichen. Da die Flasche jedoch voll ist, nämlich gefüllt mit Luft, ist schlichtweg kein Platz mehr für das Wasser. Dadurch fließt kein Wasser in den Trichter und dieser erscheint verstopft. Durch das Hineinstecken des Strohhalms wird wieder ein Luftaustausch ermöglicht und das Wasser kann in die Flasche fließen.

Man kann eventuell beobachten, dass beim „verstopften“ Trichter ein paar Luftblasen von selbst nach oben steigen und somit Wasser nach unten tropft, wenn dieser befüllt ist. Dies geschieht dann, wenn der Durchmesser der Tülle so groß ist, dass die Oberflächenspannung zu schwach ist, um Luftblasen am Emporsteigen zu hindern (Hilscher et al., 2010, S. 414).



Abbildung 55: Scheinbar verstopfter Trichter – kein Wasserfluss



Abbildung 56: Luftaustausch durch Strohhalm wieder gegeben – Wasserfluss aufrecht

Material

2 PET-Flaschen (1,5 l)

1 Verbindungsstück

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Verbindungsstück, welches in diesem Experiment verwendet wird, ist ein Hohlzylinder, der nur in der Mittelebene über eine lochförmige Verengung verfügt. Auf beiden Seiten dieser Verengung hat das Verbindungsstück ein Gewinde für PET-Flaschen. Auf eine Seite wird eine der beiden Flaschen geschraubt. Die zweite Flasche wird mit Wasser vollgefüllt und anschließend auf der anderen Seite befestigt. Stellt man die Flaschen anschließend so auf, dass

die leere unter der vollen Flasche steht, so fließt trotz des Loches in der Mitte des Verbindungsstücks kein Wasser nach unten (Abbildung 57). Erst wenn man das ganze System in Rotation versetzt, beginnt Wasser nach unten zu fließen und es entsteht ein Wassertornado (Abbildung 58). Wenn man die Flaschen etwas neigt, so bekommt der Wirbelsturm einen Knick (Abbildung 59). Ist die Neigung jedoch zu groß, so reißt der Tornado ab und der Wasserfluss ist gestoppt. Durch erneutes Rotieren der Flaschen kann man das Abfließen des Wassers wieder in Gang setzen. Das Wasser fließt so lange ab, bis die obere Flasche leer ist (Abbildung 60).

Physikalische Erklärung

Das Wasser kann im Ruhezustand nicht von der oberen in die untere Flasche fließen, da kein Luftaustausch stattfindet (Exp. [12]). Versetzt man die Flasche in Rotation so wird das am Flaschenrand anliegende Wasser aufgrund der Kohäsionskräfte in Bewegung gebracht. Durch Reibung der Wassermoleküle untereinander wird ebenso das Innere der Flüssigkeit bewegt. Aufgrund der Zentrifugalkraft wird das beschleunigte Wasser an die Flaschenwand gedrückt und es entsteht eine Parabel (Exp. [40]) (Hilscher et al., 2010, S. 414). Diese bildet die Basis für den Tornado. Durch das Rotieren der Flasche steigen Luftblasen auf, da die Oberflächenspannung bei der Öffnung des Zwischenstücks dies nicht mehr verhindern kann. Die Luftblasen verbinden sich mit der Parabel und bilden somit einen Luftkanal. Durch die entstandene Luftscheule kann die Luft nach oben strömen und die untere Flasche wird mit Wasser befüllt. Das Wasser fließt aufgrund der Fliehkraft an der Flaschenwand entlang.



Abbildung 57: Durch Verbindungsstück verbundene Flaschen – kein Wasser fließt



Abbildung 58: Durch Drehbewegung entsteht ein Tornado – Wasser fließt nach unten



Abbildung 59: Durch Kippen der Flasche erhält der Tornado einen Knick



Abbildung 60: Beinahe vollständig durch Rotation entleerte Flasche

Material

1 Bodendruckapparat
4 verschieden geformte
Gefäßaufsätze aus Glas
Becherglas
Destilliertes Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn wird der Bodendruckapparat so kalibriert, dass der Zeiger auf den untersten Strich der Skala deutet. Dies geschieht durch Verschiebung der Skala, welche mit Hilfe der Feststellschrauben fixiert wird. Als nächstes wird eine beliebige Höhe gewählt und diese durch den Zeiger für die Füllstandhöhe fixiert. Nachdem überprüft wurde, dass die Klemme des Schlauches geschlossen ist, werden die unterschiedlichen Glasaufsätze eingesetzt und jeweils bis zum festgelegten Füllstand mit destilliertem Wasser befüllt. Dies geschieht mit Hilfe des Becherglases. Vergleicht man den Ausschlag des Zeigers, so erkennt man, dass der Bodendruck beim Zylinderrohr (Abbildung 61), Winkelrohr (Abbildung 62), Trichterrohr (Abbildung 63) sowie beim abgesetzten Rohr (Abbildung 64) gleich ist. Dieses Phänomen ist als hydrostatisches Paradoxon bekannt. Zum Entleeren der Glasaufsätze löst man die Klemme des Schlauches und lässt das Wasser ins Becherglas abfließen.

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erklärt, ist der hydrostatische Druck, welcher auf den Boden des Bodendruckapparats wirkt, nur abhängig von der Füllhöhe des Wassers, und nicht von der Form des Gefäßes. Dies ist in der Formel für den hydrostatischen Druck klar ersichtlich:

$$p = h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g + p_0 \quad (32)$$

Da der Wasserstand in allen Behältern gleich hoch ist und die anderen Variablen ident sind, kann der Druck in keinem der Gefäße ein anderer sein. p_0 steht für den Atmosphärendruck, welcher ebenso auf die Wasseroberfläche drückt.

Wichtig ist jedoch, dass sich die Masse des Wassers in den unterschiedlichen Behältern unterscheidet und sich die befüllten Aufsätze somit vom Gewicht unterscheiden.

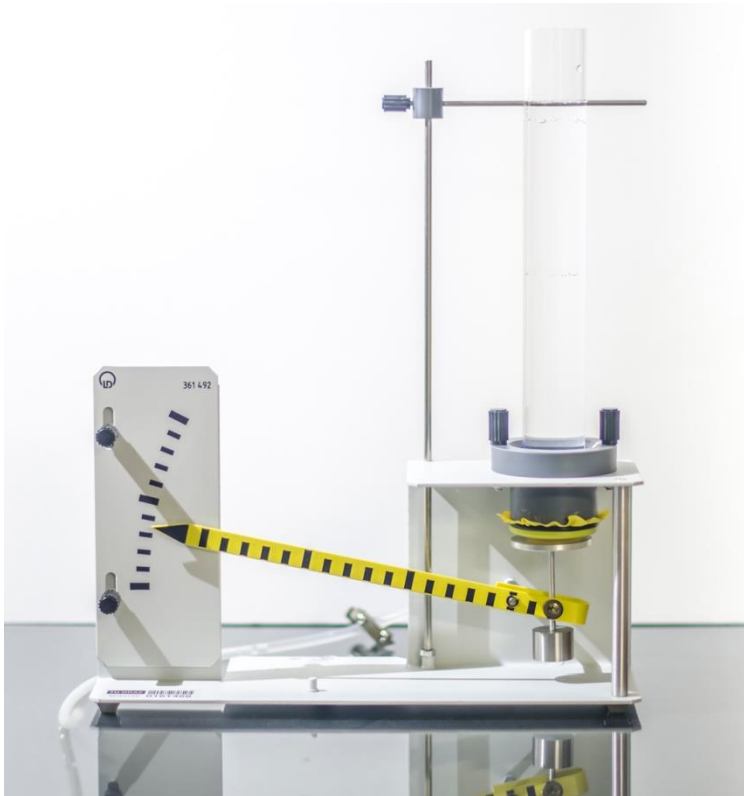


Abbildung 61: Bodendruck in einem Zylinderrohr
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 62: Bodendruck in einem Winkelrohr
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 63: Bodendruck in einem Trichterrohr
Apparatur: TU-Graz

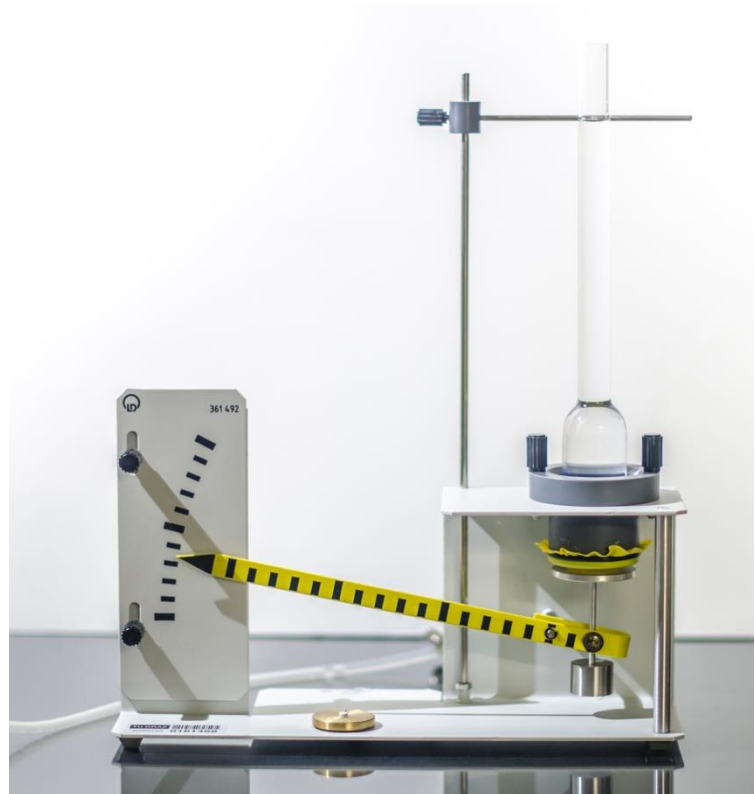


Abbildung 64: Bodendruck in einem Abgesetzten Rohr
Apparatur: TU-Graz

Material

1 PET-Flasche (1,5 l)
Flambierbrenner
Kreuzschraubenzieher
Auffangbehälter
Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Der Schraubenzieher wird mit Hilfe des Flambierbrenners erhitzt. Mit dem heißen Schraubenzieher wird ca. 7 cm über dem Flaschenboden der leeren PET-Flasche ein Loch eingeschmolzen. Im Abstand von ca. 4 cm in vertikaler Richtung nach oben, wird dieser Schritt zweimal wiederholt, sodass die Flasche zum Schluss drei übereinanderliegende Löcher hat. Die Flasche wird aufgestellt und mit Wasser vollgefüllt. Dabei wird beachtet, dass das austretende Wasser in den Auffangbehälter fließt. Man kann beobachten, dass die drei austretenden Wasserstrahlen unter-

schiedlich weit fließen. Dabei legt der oberste Strahl den kürzesten und der unterste Strahl den längsten horizontalen Weg zurück (Abbildung 65).

Anmerkung: Schraubt man den Deckel auf die Flasche, so fließt das Wasser nur aus den unteren beiden Löchern. Hält man das oberste Loch zusätzlich zu, so fließt nur noch der unterste Wasserstrahl. Wird letztlich auch noch das mittlere Loch abgedeckt so fließt kein Wasser mehr (Exp. [18]). Lässt man die Flasche fallen, so fließt aus keinem der Löcher Wasser (Exp. [30]).

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erklärt, nimmt der Druck von Flüssigkeiten mit steigender Tiefe zu. Somit wirkt auf Höhe der Löcher der Druck $p = h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g + p_0$. Dabei ist p_0 der Atmosphärendruck. Durch Modifizieren der Bernoulli Gleichung (Formel (77)), indem man den statischen Druck null setzt (Kapitel 3.1.5), erhält man die höhenabhängige Formel für die Austrittsgeschwindigkeit, welche als Torricellis Ausflussformel bezeichnet wird (Tipler & Mosca, 2008, S. 390):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (33)$$

Man erkennt, dass die Geschwindigkeit v mit dem Abstand zum Wasserpegel h zunimmt. Mit dieser Geschwindigkeit legt der Wasserstrahl einen horizontalen Weg $s = v \cdot t$ zurück. Diesen legt er so lange zurück, bis er am Boden ankommt und dabei den Höhenunterschied y zurücklegt. Die Fallzeit lässt sich aus der Formel für den freien Fall berechnen: $t = \sqrt{\frac{2 \cdot y}{g}}$. Setzt man nun die Fallzeit sowie die Austrittsgeschwindigkeit in die Formel für den Weg ein, so erhält man für diesen $s = 2 \cdot \sqrt{y \cdot h}$. Durch die Berechnung lässt sich zeigen, dass der unterste Wasserstrahl den weitesten horizontalen Weg zurücklegt (Hilscher et al., 2010, S. 289-290).



Abbildung 65: Druckunterschiede in einer Flasche

Material

1 U-Rohr-Manometer

2 Schläuche

Phenol

Becherglas

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die zwei Schläuche werden jeweils an den Enden der zwei Schenkel des U-Rohr-Manometers befestigt. Man füllt das Phenol in ein Becherglas und taucht in dieses eines der beiden Schlauchenden. Am anderen Schlauchende saugt man so lange, bis sich etwas Phenol im Manometer angesammelt hat. Zwischen den beiden Schenkeln herrscht ein Gleichgewicht (Abbildung 66), das Becherglas kann zur Seite gestellt werden. Pustet man in einen der beiden Schläuche, so verschiebt sich das Phenol von diesem weg und der Pegel im anderen Schenkel steigt (Abbildung 67). Stoppt man die Luftzufuhr, so stellt sich wieder ein Gleichgewicht zwischen den beiden Schenkeln des Manometers ein.



Anmerkung: Hierbei ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass Phenol in unverdünnter Form giftig und ätzend ist. Beim Ansaugen muss somit beachtet werden, dass das Phenol nicht bis zum Mund gelangt. Es empfiehlt sich daher anstatt Phenol, mit Tinte eingefärbtes Wasser zu verwenden.

Physikalische Erklärung

Das U-Rohr-Manometer beruht auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren (Kapitel 3.1.2). Aus diesem Grund sind die Pegel in beiden Schenkeln gleich hoch, da der Druck am tiefsten Punkt zu beiden Seiten gleich groß ist. Mathematisch lässt sich dies ausdrücken durch $p_{links} = p_{rechts}$. Durch Hineinblasen in den linken Schenkel erhöht sich der Luftdruck über dessen Luftsäule um den Druck p_b . Die Flüssigkeit wird in den rechten Schenkel gedrückt und es entsteht ein Höhenunterschied Δh zwischen den beiden Flüssigkeitspegeln. Dabei sinkt der Pegel links um $\frac{\Delta h}{2}$, während er rechts um $\frac{\Delta h}{2}$ steigt. Mit Hilfe des Höhenunterschieds Δh lässt sich die Druckerhöhung berechnen:

$$p_b + p_{links_{neu}} = p_{rechts_{neu}} \quad (34)$$

Setzt man nun für $p_{links_{neu}}$ und $p_{rechts_{neu}}$ die Formel (18) ein, so erhält man:

$$p_b + \rho_{Flüssigkeit} \cdot g \cdot h_{links} = \rho_{Flüssigkeit} \cdot g \cdot h_{rechts} \quad (35)$$

Dabei sind h_{links} und h_{rechts} die entsprechenden Höhen der Flüssigkeitssäulen, gemessen vom tiefsten Punkt des Manometers. Mit $\Delta h = h_{rechts} - h_{links}$ erhält man durch einfache Umformungen eine Formel, mit der sich der hinzugefügte Druck p_b bestimmen lässt:

$$p_b = \rho_{Flüssigkeit} \cdot g \cdot \Delta h \quad (36)$$

Der atmosphärische Druck wirkt beidseitig und kann somit vernachlässigt werden.

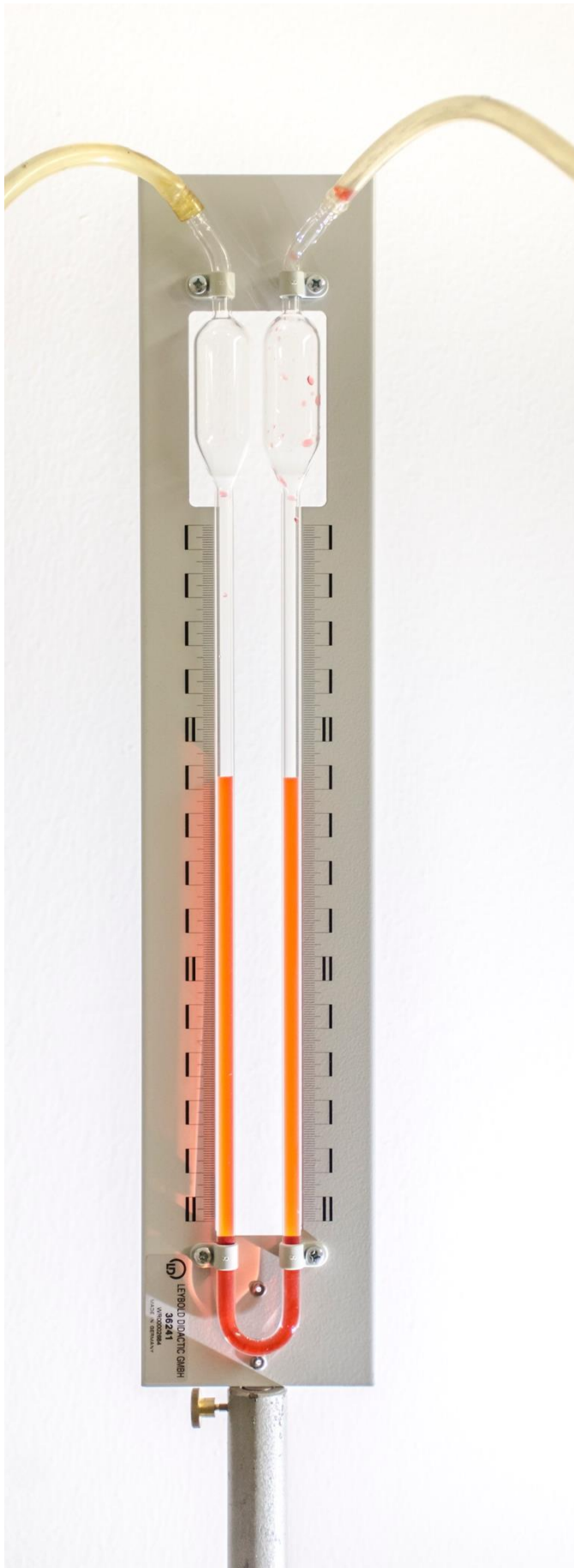


Abbildung 66: Gleich hoher Flüssigkeitspegel in beiden Schenkeln des U-Rohr-Manometers

Apparatur: TU-Graz

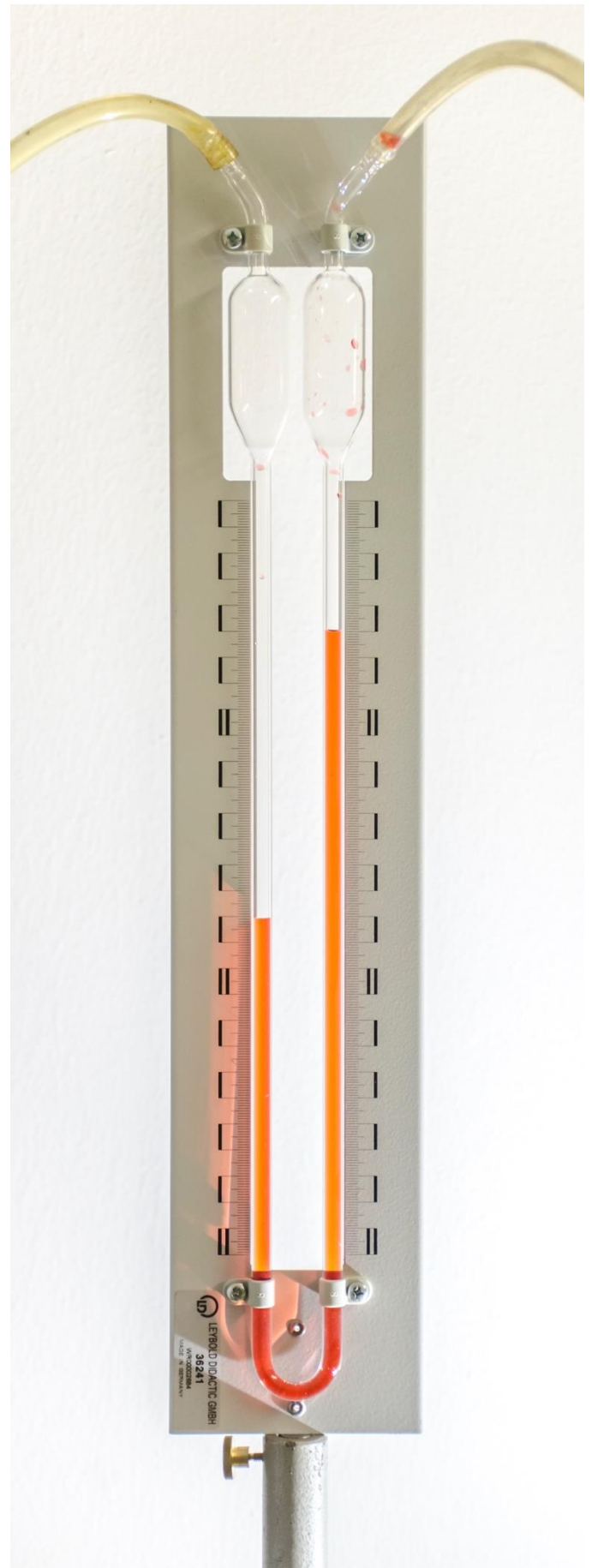


Abbildung 67: Höhendifferenz im U-Rohr-Manometer aufgrund von Druckunterschied

Apparatur: TU-Graz

Material

1 Druckdose mit U-Rohr-
Manometer

1 Glasgefäß (tief) mit
Muffe zur Befestigung

Dosierspritze

Phenol

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Glasgefäß wird ca. zu dreiviertel mit Wasser gefüllt. Die Druckdose mit U-Rohr-Manometer wird am Glasgefäß mit Hilfe der Muffe befestigt, sodass die Druckdose über dem Wasser steht. Zur weiteren Vorbereitung wird Phenol mit Hilfe einer Dosierspritze über die Trichteröffnung in das U-Rohr-Manometer gefüllt. Der Flüssigkeitsstand des Phenols sollte zu Beginn in beiden Schenkeln gleich hoch sein (Abbildung 68). Lässt man die Druckdose langsam in das Wasser hinabsteigen, so sieht man, dass es den Phenolpegel im U-Rohr-Manometer mit zunehmender Tiefe nach rechts verschiebt (Abbildung 69). Ändert man die horizontale Ausrichtung der Druckdose, so bleibt die Aus-

lenkung des Phenols jedoch gleich. Zieht man die Druckdose wieder nach oben, so korrigiert sich der Phenolpegel wieder nach links, bis er letztendlich, wenn die Druckdose über Wasser steht, wieder ausgeglichen ist.

Physikalische Erklärung

Auf der Druckdose befindet sich eine Gummimembran, welche sich durch Druck von außen nach innen wölbt. Das dabei verdrängte Luftvolumen erhöht den Druck auf der druckdosen-zugewandten Seite des Manometers, was wiederum eine Verschiebung des Phenolpegels zur Folge hat (Exp. [16]). Wird die Druckdose in das Wasser getaucht, so erhöht sich der Druck auf die Membran, umso tiefer diese sinkt. Dies lässt sich mit Hilfe des hydrostatischen Drucks p erklären:

$$p = h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \quad (37)$$

Wie in Formel (37) ersichtlich, nimmt der Druck linear mit steigender Tiefe zu. Aufgrund der Allseitigkeit des Drucks ändert sich der Phenolspiegel bei horizontaler Auslenkung der Druckdose nicht (Kapitel 3.1.2).



Abbildung 68: Druckdose mit U-Rohr Manometer über dem Wasser

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 69: Druckdose mit U-Rohr Manometer bei steigendem Druck im Wasser

Apparatur: TU-Graz

Material

1 PET-Flasche
1 Tintenpatrone
Flambierbrenner
Kreuzschraubenzieher
Auffangbehälter
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Mit Hilfe des Flambierbrenners wird der Schraubenzieher erhitzt. Im untersten Drittel der PET-Flasche wird mit diesem ein Loch hineingeschmolzen. Anschließend wird die Flasche aufrecht hingestellt und mit eingefärbtem Wasser befüllt. In Innenräumen sollte dabei beachtet werden, dass die Flasche so positioniert wird, sodass der austretende Wasserstrahl in einen Auffangbehälter fließt. Das Wasser fließt nun so lange aus dem Loch, bis der Wasserpegel die Höhe des Lochs unterschritten hat (Abbildung 70). Dabei nimmt die horizontale Entfernung des austretenden Wasserstrahls mit sinkendem Wasserstand ab (Exp. [15]).

Füllt man die Flasche erneut mit dem eingefärbten Wasser und verschließt diese, so kann man beobachten, dass kein Wasser austritt (Abbildung 71).

Physikalische Erklärung

Ist die Flasche geöffnet, so tritt Wasser aus dem unteren Loch aus, da das ausfließende Wasservolumen durch Luft ersetzt wird. Es findet somit ein Austausch zwischen Luft- und Wassermolekülen statt. Verschließt man nun die Flasche mit dem Deckel, so fließt kein Wasser mehr, da keine Luft nachströmen kann. Würde das Wasser dennoch fließen, so würde ein Unterdruck entstehen. Da keine weiteren Löcher zur Verfügung stehen, fließt kein Wasser mehr, da das Loch zu klein ist um für einen Wasser- sowie Luftaustausch zur Verfügung zu stehen. Betrachtet man außerdem den Druckunterschied zwischen dem Inneren der Flasche sowie dem von außen wirkenden Luftdruck, so kann man beobachten:

$$p_{\text{innen}} > p_{\text{außen}} \Leftrightarrow h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g + p_0 > p_0 \Leftrightarrow h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g > 0 \quad (38)$$

Da der Höhenunterschied zwischen dem Wasserpegel und dem Loch so gering ist, kann man für den Luftdruck denselben Wert annehmen. Man erkennt anhand der Formel, dass es das Wasser aufgrund des hydrostatischen Drucks nach außen drückt. Verschließt man den Deckel, so tritt folgender Fall ein:

$$p_{\text{innen}} < p_{\text{außen}} \Leftrightarrow h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g < p_0 \quad (39)$$

Somit müsste der hydrostatische Druck den Luftdruck überwinden. Dafür wäre eine Wassersäule von ca. 10 m notwendig (Formel (42)).



Abbildung 70: Wasser fließt aus Loch in offener Flasche



Abbildung 71: Durch Verschließen der Flasche fließt kein Wasser aus dem Loch

Material

- 1 Trinkglas (klein)
- 1 laminiertes Papier
- Wasser



Variante 2

- 1 Messzylinder
- 1 Blatt Papier
- Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Ein gewöhnliches Trinkglas wird mit Wasser gefüllt. Die exakte Menge spielt für dieses Experiment keine große Rolle. Das Glas sollte jedoch mehr als zur Hälfte gefüllt sein, da dies den Effekt anschaulicher darstellt. Anschließend legt man ein Stück laminiertes Papier (Postkarte, Bierdeckel oder Ähnliches) auf das Glas. Mit einer Hand wird nun das Glas aufgehoben, mit der anderen drückt man so auf das laminierte Papier, dass man das gefüllte Glas auf den Kopf drehen kann, ohne dass der Deckel verrutscht. Hat man das Ganze schließlich um 180° gedreht, so kann man das Stück laminierte Papier loslassen. Es haftet von allein am Glas

(Abbildung 72). Auch durch leichtes Schütteln lässt sich der Deckel nicht von dem Glas lösen (siehe Video – Variante 1). In Variante zwei funktioniert das komplette Setup ident, jedoch wird anstatt eines Trinkglases ein länglicher Messzylinder verwendet. Das Ergebnis ist auch hier das gleiche (Abbildung 73).

Physikalische Erklärung

Auf das Stück laminierte Papier wirkt einerseits der innere Druck p_{innen} im Glas sowie der Druck $p_{außen}$ von außen. Der innere Druck wird im Wesentlichen durch das Wasser, d. h. den hydrostatischen Druck verursacht. Die eventuell kleine Luftschicht kann vernachlässigt werden. Von außen drückt der Luftdruck p_0 :

$$p_{innen} \leq p_{außen} \Leftrightarrow h \cdot \rho_{Wasser} \cdot g \leq p_0 \quad (40)$$

Formt man diese Formel auf die Höhe h um, so erhält man die Höhe der Wassersäule, bis zu welcher das Experiment funktionieren würde:

$$h \leq \frac{p_0}{\rho_{Wasser} \cdot g} \quad (41)$$

Setzt man nun für Luftdruck $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$, den Druck auf Meeresniveau und für die Dichte von Wasser $\rho_{Wasser} = 999,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ein, jene Werte für Normalzustand (Kuchling, 2011, S. 620 & 629), so erhält man:

$$h \leq \frac{101325}{999,8 \cdot 9,81} = 10,33 \text{ m} \quad (42)$$

Die Wassersäule im Glas dürfte somit bis zu 10,33 m hoch sein.



Abbildung 72: Lamiertes Papier bleibt an umgedrehtem Glas haften



Abbildung 73: Blatt Papier bleibt an umgedrehtem Messzylinder haften

Material

1 Trinkglas (klein)

1 PET-Flasche

1 Stecknadel

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Trinkglas wird zu etwa dreiviertel mit Wasser befüllt und hingestellt. Die Flasche füllt man voll, wobei die Wassermenge etwas abweichen kann. Nun dichtet man die Flaschenöffnung mit zwei Fingern ab und dreht diese auf den Kopf. Die verkehrte Flasche setzt man mit ruhiger Hand so auf das Glas, dass möglichst wenig Wasser austritt und sich die Flasche kaum verformt. Gelingt dies, so sollte das ganze System im Gleichgewicht sein (Abbildung 74). Man kann die Flasche sogar so anheben, dass nur noch die

Flaschenöffnung die Wasseroberfläche berührt und es tritt dennoch kein Wasser aus. Setzt man die Flasche wieder am Glas ab und sticht mit einer Nadel in den Flaschenboden, so beginnt sich das Glas zu füllen und anschließend überzulaufen (Abbildung 75).

Physikalische Erklärung

Dieses Experiment ist dem Quecksilberbarometer von Evangelista Torricelli (1608-1647) nachempfunden. Beim Original wurde anstelle von Wasser Quecksilber verwendet. Eine mit Quecksilber gefüllte Röhre wurde, mit der Öffnung nach unten, senkrecht in ein Quecksilberbad getaucht. Das Ende oberhalb der Quecksilbersäule war evakuiert und somit bis auf den Quecksilberdampf leer. Dabei war das Quecksilberbad dem Atmosphärendruck p_0 ausgesetzt, während das Quecksilber im Rohr nur dem Schweredruck $p_0 = h \cdot \rho_{\text{Quecksilber}} \cdot g$ ausgesetzt war. Formt man diese Formel auf h um, so erhält man jene Höhe, bei der sich ein Gleichgewicht einstellt. Setzt man die Werte für den Normalzustand ein, d. h. $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$ und $\rho_{\text{Quecksilber}} = 13,595 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, so erhält man:

$$h = \frac{p_0}{\rho_{\text{Wasser}} \cdot g} = \frac{101325}{13595 \cdot 9,81} = 0,76 \text{ m} \quad (43)$$

Dies hatte zur Folge, dass ab einem Quecksilberstand im Rohr von mehr als 76 cm der Schweredruck das überschüssige Quecksilber in das Quecksilberbad drückte und der Pegel sich bei 76 cm einstellte. Aus diesem Grund wurde der Druck früher in mmHg angegeben und die Einheit wurde Torr genannt, zu Ehren von Torricelli. Im Normalzustand entspricht der Druck somit 760 mmHg bzw. 760 Torr (Tipler & Mosca, 2008, S. 378).

Da Wasser leichter als Quecksilber ist, kann eine Wassersäule von bis zu 10,33 m getragen werden (Formel (42)). Sticht man nun mit der Nadel ein Loch in die Flasche, so wirkt im Inneren zusätzlich zum Schweredruck der Luftdruck und das Glas geht über, da außerhalb der Flasche nur der Luftdruck wirkt.



Abbildung 74: Umgedrehte Wasserflasche in einem Glas gefüllt mit Wasser – Wasserstand bleibt unverändert



Abbildung 75: Durch Nadelstich in Flaschenboden fließt Wasser aus und bringt das Glas zum Überlaufen

Material

1 Pythagoreischer
Trinkbecher
2 Streichhölzer
Tinte
Becherglas
Aquarium
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

In das Aquarium werden zwei Streichhölzer gelegt, auf welchen der Pythagoreische Trinkbecher platziert wird. Dadurch wird ein kleiner Abstand zwischen dem Boden und dem Becher gewährleistet. Im Anschluss wird Wasser mit Tinte in einem Becherglas vermengt. Das eingefärbte Wasser wird nun in den Becher gefüllt, jedoch nur soweit, dass die Mittelsäule noch mit ca. einem Zentimeter herausragt (Abbildung 76). Nichts passiert. Füllt man anschließend weiter Wasser in den Trinkbecher, sodass der

Wasserstand das Glasröhrchen in der Mittelsäule überragt, so beginnt das Wasser auszurinnen (Abbildung 77), bis der Becher komplett geleert ist (siehe Video).

Physikalische Erklärung

Der Pythagoreische Trinkbecher soll von Pythagoras (ca. 570 – 500 v. Chr.) entwickelt worden sein, um seinen Mitmenschen Bescheidenheit zu lehren. Der Becher hat im Grunde die Form eines Weinglases. Die Ausnahme bildet ein siphonartiger Aufbau im Zentrum, dessen Ausfluss im Fuß des Weinglases endet. Konkret ist der Ausfluss aus einem Glasröhrchen konstruiert, über welches ein etwas höherer Zylinder gesetzt wurde. Die einzige Öffnung des Zylinders ist ein Loch knapp über dem Boden des Bechers. Füllt man nun Wasser in den Becher, so sammelt sich das Wasser sowohl im Gefäß, als auch in der Mittelsäule zwischen dem Zylinder und dem Glasrohr an. Dabei ist der Wasserstand überall gleich hoch, da es sich hierbei um das Prinzip der kommunizierenden Röhren handelt. Dies kann so lange fortgesetzt werden, bis der Wasserstand den höchsten Punkt des Glasröhrchens nicht überschreitet. Geschieht dies, so ist der Zylinder zur Gänze mit Wasser befüllt und das Wasser kann im Rohr abfließen. Dies geschieht so lange, bis der Becher vollständig geleert ist. Außerhalb des Lochs wirken der Luftdruck, welcher auf die Wasseroberfläche drückt sowie der hydrostatische Druck, während innerhalb nur der hydrostatische Druck wirkt. Da die Wassersäule im Inneren 10,33 m überschreiten müsste (Formel (42)), um gegen den Luftdruck anzukommen, wird so lange Wasser in den Zylinder gedrückt, bis das Glas leer ist (ChemoLine, 2019).

Anmerkung: Dieses Experiment würde ebenso mit Quecksilber funktionieren, da es sich ebenfalls um eine Flüssigkeit handelt. Würde man das Glas jedoch so mit Quecksilber befüllen, dass das Loch gerade bedeckt ist und anschließend Wasser einfüllen, so würde der Becher nicht überlaufen, da das Wasser aufgrund des hohen Dichteunterschieds nicht den notwendigen Schweredruck aufbringen könnte.



Abbildung 76: Pythagoreischer Trinkbecher – Wasser bleibt im Glas

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 77: Pythagoreischer Trinkbecher – Wasserpegel übersteigt Glasröhrchen in Mitte und fließt aus

Apparatur: TU-Graz

Material

4 gleiche Glasgefäße,
eines mit Deckel
2 Strohhalm ohne Knick
Kreuzschraubenzieher
Heißklebepistole
Hammer
Magazine
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Mit einem Kreuzschraubenzieher und einem Hammer stanzt man zwei, möglichst weit voneinander entfernte Löcher in den Deckel. Zum Schutz des Untergrundes kann der Deckel auf ein paar Magazine oder Zeitungen gelegt werden. Der Durchmesser der Löcher sollte dem der Strohhalm entsprechen. Die Strohhalm werden nun so durch den Deckel gesteckt und mit der Heißklebepistole fixiert, dass bei einem der über den Deckel ragende Teil nur knapp länger ist als der Innenteil. Beim anderen Strohhalm soll in etwa nur 1 cm über die Deckelinnenseite hinausragen. Im Anschluss

wird ein Glas komplett mit Wasser befüllt, ein anderes etwa 2 cm hoch und die zwei übriggebliebenen bleiben leer. Auf ein umgedrehtes, leeres Glas wird das volle und daneben, mit der Öffnung nach oben, ein leeres Glas gestellt. Zu guter Letzt wird auf das knapp befüllte Glas der Deckel mit den Strohhalmen geschraubt und kopfüber so auf die Konstruktion gestellt, dass der längere, nach untenstehende Strohhalm in das leere, aufrechtstehende Glas ragt. Der kürzere taucht dabei in das Wasser des vollgefüllten Glases. Nun kann man im obersten Behälter eine Fontäne im Inneren begutachten (Abbildung 78). Das Wasser bewegt sich dabei vom linken Strohhalm in das oberste Glas und fließt anschließend durch den zweiten Strohhalm ab in das rechte, untere Glas. Dieser Kreislauf bleibt solange bestehen, bis der Wasserpegel im linken Glas die untere Öffnung des Strohhalmes erreicht hat. Ab diesem Zeitpunkt läuft keine Fontäne mehr aus dem Strohhalm, es fließt lediglich das restliche Wasser aus dem obersten Glas durch den rechten Strohhalm nach unten ab.

Physikalische Erklärung

Im obersten Glas herrscht anfangs der Druck p_G . Fließt durch den rechten Strohhalm das Wasser hinaus, so reduziert sich der Druck p_G und es entsteht ein Unterdruck. Auf das Wasser im anfangs vollen Glas wirkt der Atmosphärendruck p_0 und Wasser wird nach oben gedrückt. Statisch herrscht am unteren Ende des rechten Strohhalmes in der Fläche A_2 der Druck $p_{str_r} = p_G + \rho_{Wasser} \cdot g \cdot h_1$. Auf Höhe des Wasserpegels in Fläche A_1 herrscht im linken Strohhalm der Druck $p_{str_l} = p_G + \rho_{Wasser} \cdot g \cdot h_2$. Solange das Wasser fließt, gilt: $p_{str_r} > p_0$ und $p_{str_l} < p_0$. Der Druckunterschied im linken Strohhalm bewirkt eine Kraft, welche das Wasser nach oben beschleunigt, während der Druckunterschied im rechten Strohhalm eine Kraft mit daraus resultierender Beschleunigung nach unten verursacht. Es fließt gleich viel Wasser hinaus wie hinein, somit bleibt der Druck p_G währenddessen konstant, da stets ein Ausgleich herrscht (Hilscher et al., 2010, S. 294).



Abbildung 78: Fließende Fontäne im Heronsbrunnen

3.1.3 Das Archimedische Prinzip

Herleitung des Archimedischen Prinzips

Betrachtet man einen Körper in einem Fluid, so erfährt dieser eine nach oben gerichtete Kraft. Diese wirkt entgegen der Gewichtskraft F_G und wird Auftriebskraft F_A genannt. Die Auftriebskraft ist unabhängig von Form und Zusammensetzung des Körpers. Einzig die Dichte des Fluids ist ausschlaggebend, denn sie tritt als Folge des hydrostatischen Drucks auf. Betrachtet man zur einfacheren Berechnung einen Würfel im Fluid (Abbildung 79), so wirken senkrecht auf dessen Oberfläche Kräfte. Die horizontalen Kräfte heben sich auf und für den Auftrieb von Bedeutung sind nur die resultierenden vertikalen Kräfte. Dabei wirkt die Kraft F_1 von oben nach unten, sowie die Kraft F_2 von unten nach oben, wobei die Kraft von unten als die größere angenommen wird. Für die Auftriebskraft F_A bedeutet dies:

$$F_A = F_2 - F_1 \quad (44)$$

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erwähnt, herrschen in unterschiedlichen Tiefen unterschiedliche Drücke. Sei dabei p_{oben} jener Druck, der auf die obere Fläche des Würfels wirkt, während der Druck p_{unten} auf die untere Fläche des Würfels drückt. Mit Hilfe der Formel $p = \frac{F}{A}$ berechnet sich die Auftriebskraft wie folgt:

$$F_A = p_{unten} \cdot A - p_{oben} \cdot A \quad (45)$$

Für den Druck setzt man die Formel für den hydrostatischen Druck (Formel (18)) ein und erhält:

$$F_A = \rho_{Fluid} \cdot g \cdot h_2 \cdot A - \rho_{Fluid} \cdot g \cdot h_1 \cdot A = A \cdot g \cdot \rho_{Fluid} (h_2 - h_1) \quad (46)$$

Dabei ist h_2 der Abstand zwischen der Wasseroberfläche und der Unterkante des Würfels und h_1 die entsprechende Entfernung zur oberen Würfelkante. Somit erkennt man, dass die Differenz dieser beiden Wege, der Höhe h des Würfels entspricht. Damit ergibt sich für die Auftriebskraft:

$$F_A = A \cdot g \cdot \rho_{Fluid} \cdot h \quad (47)$$

Die Grundfläche A mit der Höhe h multipliziert, entspricht dem Volumen V des Würfels und somit ist:

$$F_A = V \cdot \rho_{Fluid} \cdot g \quad (48)$$

Da sich die Masse m mit der Formel $m = V \cdot \rho_{Fluid}$ berechnen lässt, hat dies zur Folge, dass die Auftriebskraft dem Gewicht des verdrängten Fluids entspricht. Diese Beobachtung ist unter dem Archimedischen Prinzip bekannt (Tipler & Mosca, 2008, S. 380; Meschede, 2010, S. 104).

Welche Position ein Körper in einer Flüssigkeit einnimmt, ist von dessen Gewichtskraft F_G , sowie der Größe der Auftriebskraft F_A abhängig. Es existieren dabei drei Möglichkeiten:

- $F_G < F_A$: Der Körper schwimmt auf der Oberfläche. Dabei ragt ein Teil des Körpers aus dem Wasser. Die Gewichtskraft entspricht der verdrängten Flüssigkeit, der Auftriebskraft.
- $F_G = F_A$: Sind die beiden Kräfte im Gleichgewicht, so befindet sich der Körper zur Gänze unter Wasser und bleibt auf einer Höhe. Der Körper schwebt.
- $F_G > F_A$: Der Körper sinkt zu Boden (Kuchling, 2011, S. 154).

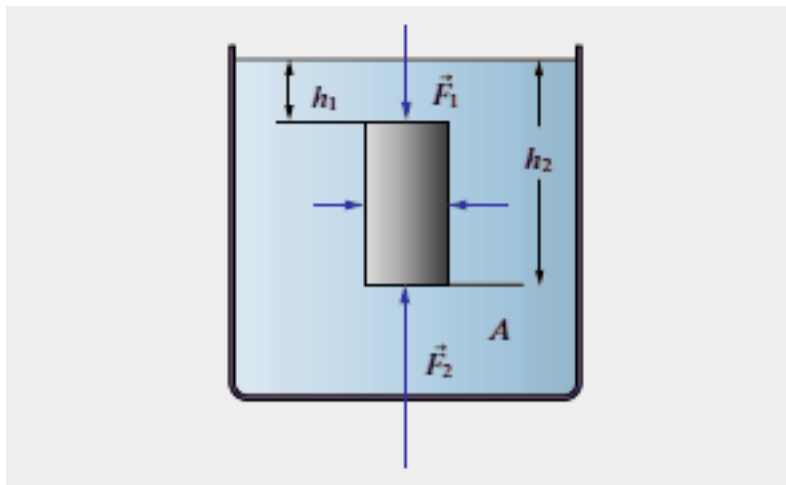


Abbildung 79: Skizze für die Herleitung des Archimedischen Prinzips.
Quelle: Meschede, 2010, S. 104

Die Krone von König Hieron

Der Sage nach, gab König Hieron einem Schmied den Auftrag eine Krone aus einem Klumpen Gold zu formen. Obwohl die Krone letztlich das gleiche Gewicht hatte wie der Goldklumpen, unterstellte der König dem Schmied betrug. Daher gab der König Archimedes von Syrakus (287-212 v. Chr.) den Auftrag, den Sachverhalt zu überprüfen. Diesem kam der entscheidende Einfall während eines Bades. Archimedes setzte sich in eine volle Badewanne, welche dabei überlief. Er kam auf die ausschlaggebende Idee, wie er seinen Auftrag erfüllen konnte. Dabei lief er vor lauter Begeisterung nackt auf die Straße und rief dabei: „Heureka“, was so viel bedeutet wie: „Ich hab's gefunden“.

Die Krone sowie der Goldklumpen hatten die gleiche Masse. Als er diese auf eine Balkenwaage hing, war die Waage somit im Gleichgewicht. Als er die hängenden Objekte jedoch in Wasser tauchte, so war der Auftrieb der Krone höher. Folglich hatte diese ein größeres Volumen und somit eine geringere Dichte und war daher nicht aus reinem Gold. Der Schmied war des Betrugs überführt (Harten, 2014, S. 89; Kistner, 1919, S. 13 & 124).

Material

1 Mohrsche Waage

1 Tauchgewicht

1 Glasgefäß (mittel)

Gewichte

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Mohrsche Waage wird zuallererst mit Hilfe der Stellschrauben horizontal ausgerichtet. Im vorderen Bereich der Balkenwaage, jener mit den neun Einkerbungen, wird ein Tauchgewicht in die dafür vorgesehene Öse eingehängt.

Die Waage sollte nun, aufgrund des Eichgewichtes am anderen Balkenarm austariert sein. Dies erkennt man daran, dass sich die zwei Spitzen der Abgleichsanzeige auf gleicher

Höhe befinden. Im darauffolgenden Schritt wird unter das Tauchgewicht ein Glasgefäß gestellt, welches mit einer beliebigen Flüssigkeit gefüllt ist. Durch das Eintauchen in die Flüssigkeit, drückt es das Tauchgewicht nach oben. Nun wird mit Hilfe von Gewichten, welche in die Kerben gehängt werden, die Waage erneut austariert. Die Gewichte, sowie die Abstände der Kerben sind so kalibriert, dass man die Dichte der Flüssigkeit direkt an der Waage ablesen kann (Stuart & Klages, 2006, S. 48).

Alternativ: Zur Veranschaulichung des Auftriebs, ohne Bestimmung der Dichte der Flüssigkeit, kann man die Waage bewusst mit einem zusätzlichen Massestück aus dem Gleichgewicht bringen (Abbildung 80). Anschließend stellt man ein Glas Wasser unter das Tauchgewicht, sodass dieses einen Auftrieb erfährt (Abbildung 81).

Physikalische Erklärung

Wird ein Körper in eine Flüssigkeit getaucht, so erfährt er die Auftriebskraft F_A , welche dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit entspricht, d. h.: $F_A = V \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot g$ (Formel (48)). Ist die Waage austariert, so erfährt der längere Hebel beim Eintauchen in eine Flüssigkeit die entsprechende Auftriebskraft. Dadurch wird der Lastarm nach oben gedrückt. Die Kalibrierung zum vereinfachten Ablesen der Dichte wird dadurch erreicht, dass der längere Hebel in zehn gleich große Teile eingeteilt ist. Das schwerste Gewicht hat eine Masse von $m_1 = 5 \text{ g}$, die weiteren jeweils ein Zehntel des Vorherigen, d. h. $0,5 \text{ g}$; $0,05 \text{ g}$ usw. Der Senkkörper hat ein Volumen von 5 cm^3 . Kann man die Waage wieder austarieren indem man z. B. die schwerste Masse m_1 in die Mitte des Lastarms hängt, so ergibt sich aufgrund des Hebelgesetzes folgendes Gleichgewicht, bei welchem sich g weg kürzt (Westphal, 1938, S. 30):

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot g \Leftrightarrow V \cdot \rho_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \Leftrightarrow 5 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \quad (49)$$

Durch die geschickte Wahl der Gewichte sowie des Volumens kürzt sich die Zahl fünf auf beiden Seiten weg. Wird nun auf ρ_{ges} umgeformt, so erkennt man, dass die Dichte direkt an der Waage in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ abgelesen werden kann, da: $\rho_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.



Abbildung 80: Mohrsche Waage
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 81: Dichtebestimmung mit Hilfe der Mohrschen Waage
Apparatur: TU-Graz

Material

- 1 Glasgefäß (mittel)
- 1 Überraschungseikapsel (groß)
- 3 Kupfermünzen
- Folienstift
- Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment wird ein Glasgefäß mit Wasser gefüllt. Parallel dazu wird eine Überraschungseikapsel oder eine ähnlich schwimmende Halbschale mit drei Kupfermünzen oder handelsüblichen Münzen gefüllt. Die Kapsel bzw. die Münzen repräsentieren in diesem Experiment das Boot bzw. den Stein. Die Kapsel, gefüllt mit den Münzen, wird in das Wasser gelegt. Das Gewicht sollte so gewählt werden, dass die Halbschale schwimmt, ohne

dass Wasser eintritt. Anschließend wird der Wasserpegel mit einem Folienstift markiert (Abbildung 82). Leert man nun die Kapsel, indem man die Münzen in das Wasser kippt und setzt sie dann wieder am Wasser ab, so erkennt man, dass der Wasserspiegel gesunken ist (Abbildung 83).

Physikalische Erklärung

Befinden sich die Kupfermünzen im Wasser, so verdrängen sie gleich viel Wasser, wie es ihrem Volumen entspricht. Befinden sich die Münzen jedoch in der Kapsel, so verdrängen sie gleich viel Wasser, wie es ihrer Masse entspricht.

Bei gegebenem Beispiel treffen folgende Daten auf je eine Münze zu:

- Der Radius r beträgt ca. 16 mm .
- Die Höhe h beträgt ca. 2 mm .
- Die Masse m beträgt 15 g .

Das Volumen V einer Kupfermünze berechnet sich durch:

$$V = r^2 \pi h = 0,016^2 \cdot \pi \cdot 0,002 \Leftrightarrow V = 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (50)$$

Drei Kupfermünzen verdrängen somit ein Wasservolumen V_{Wasser_1} von:

$$V_{\text{Wasser}_1} = 3 \cdot 1,61 \cdot 10^{-6} = 4,83 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (51)$$

Wird die Münze stattdessen in die Kapsel gelegt, so werden dadurch $3 \cdot 15 \text{ g}$ Wasser verdrängt. Bei Raumtemperatur hat Wasser eine Dichte von $\rho_{\text{Wasser}} = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und daher lässt sich das dadurch verdrängte Wasservolumen V_{Wasser_2} berechnen:

$$V_{\text{Wasser}_2} = \frac{m}{\rho} = \frac{45 \cdot 10^{-3}}{998,2} \Leftrightarrow V_{\text{Wasser}_2} = 4,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (52)$$

Befinden sich die Münzen in der Kapsel, so verdrängen sie um $V_{\text{Wasser}_2} - V_{\text{Wasser}_1} = 4,51 \cdot 10^{-5} - 4,83 \cdot 10^{-6} = 4,03 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ mehr Wasser. Dies entspricht $40,3 \text{ ml}$.



Abbildung 82: Wasserpegel bei mit Münzen gefüllter Kapsel



Abbildung 83: Niedrigerer Wasserpegel bei leerer Kapsel und Münzen im Wasser

Material

1 Trinkglas (klein)

1 Eiskwürfel

Kaltes Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

In das Trinkglas wird ein Eiskwürfel (Form spielt keine große Rolle, er sollte nur recht groß sein) hineingelegt.

Anschließend wird das Glas so lange mit kaltem Wasser befüllt, bis es randvoll ist. Man erkennt sofort, dass das Eis

schwimmt. Des Weiteren kann man hier beobachten, dass sich ein Großteil des Eises unter Wasser befindet (Abbildung 84). Lässt man das Glas mit dem schwimmenden Eiskwürfel so lange im Raum stehen, bis das Eis komplett geschmolzen ist, so sieht man, dass sich der Wasserstand des Trinkglases nicht geändert hat (Abbildung 85).

Physikalische Erklärung

In dieser Durchführung hatte die Eiskugel einen Radius r von $2,5\text{ cm}$. Mit Hilfe der Dichte von Eis ($\rho_{\text{Eis}} = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) lässt sich die Masse m_{Eis} des Eises bestimmen durch:

$$\begin{aligned} m_{\text{Eis}} &= V_{\text{Eis}} \cdot \rho_{\text{Eis}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{Eis}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 0,025^3 \cdot 917 \\ &= 6,545 \cdot 10^{-5} \cdot 917 \Leftrightarrow m_{\text{Eis}} = 0,06\text{ kg} \end{aligned} \quad (53)$$

Nun kann man berechnen, wieviel Prozent des Eises unter Wasser ($\rho_{\text{Wasser}} = 999,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei 0°C) liegen, indem man die Auftriebskraft F_A des Wassers mit der Gewichtskraft F_G des Eiskwürfels gleichsetzt (Kuchling, 2011, S. 614 & 628):

$$F_G = F_A \Leftrightarrow V_{\text{Eis}} \cdot \rho_{\text{Eis}} \cdot g = V_{\text{Wasser}_v} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \Leftrightarrow \frac{V_{\text{Wasser}_v}}{V_{\text{Eis}}} = \frac{\rho_{\text{Eis}}}{\rho_{\text{Wasser}}} = \frac{917}{999,8} = 0,917 \quad (54)$$

Somit befinden sich 91,7 % des Eises unter Wasser. Weiters lässt sich mit obiger Gleichung das Volumen des verdrängten Wassers V_{Wasser_v} berechnen:

$$\begin{aligned} F_G = F_A \Leftrightarrow V_{\text{Eis}} \cdot \rho_{\text{Eis}} \cdot g &= V_{\text{Wasser}_v} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \Leftrightarrow V_{\text{Wasser}_v} = \frac{\rho_{\text{Eis}}}{\rho_{\text{Wasser}}} \cdot V_{\text{Eis}} \\ &= \frac{917}{999,8} \cdot 6,545 \cdot 10^{-5} \Leftrightarrow V_{\text{Wasser}_v} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (55)$$

Berechnet man nun das Volumen $V_{\text{Eis}_{\text{ges}}}$ des geschmolzenen Eises, so erkennt man, dass dieses äquivalent zum Volumen V_{Wasser_v} des verdrängten Wassers ist:

$$V_{\text{Eis}_{\text{ges}}} = \frac{m_{\text{Eis}}}{\rho_{\text{Wasser}}} = \frac{0,06}{999,8} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (56)$$

Dies bedeutet, dass die Masse des verdrängten Wassers m_{Wasser_v} gleich der Masse des Eises m_{Eis} ist. Somit bleibt der Wasserspiegel vor und nach dem Schmelzen gleich. Das durch den Schmelzvorgang hinzukommende Wasser wird durch die geringe Verdrängung aufgrund des niedrigeren Gewichts ausgeglichen.



Abbildung 84: Wasserstand mit Eiswürfel im Wasser



Abbildung 85: Wasserstand bei geschmolzenem Eiswürfel

Material

1 Trichter (durchsichtig)

1 Tischtennisball

Wasser

Auffangbehälter



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Trichter wird über einem Auffangbehälter für überschüssiges Wasser gehalten. In den leeren Trichter legt man den Tischtennisball. Nun schüttet man Wasser in den Trichter. Entgegen den Erwartungen, dass der Tischtennisball nach oben schwimmt, bleibt dieser an der tiefsten Stelle des Trichters liegen. Der Trichter wird beinahe vollständig vom Ball abgedichtet, lediglich ein paar Tropfen fließen hinaus. (Abbildung 86). Dichtet man jedoch den Abfluss des Trichters mit einem Finger ab, so springt der Ball

förmlich nach oben und schwimmt anschließend (Abbildung 87). Macht man den Abfluss wieder frei, so kann das Wasser so lange entweichen, bis der Ball wieder die tiefste mögliche Stelle erreicht hat. Das restliche Wasser bleibt unterhalb des Balles im Abfluss stehen.

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erwähnt, nimmt der hydrostatische Druck mit zunehmender Tiefe zu. Befindet sich ein Körper unter Wasser, so wirkt auf dessen Oberseite ein entsprechender Druck nach unten. Die Unterseite dieses Objektes befindet sich jedoch tiefer im Wasser und erfährt dort einen etwas größeren Druck nach oben. Dieser zusätzliche Druck von unten sorgt für die sogenannte Auftriebskraft F_A . In diesem Experiment befindet sich der Ball zu Beginn am Boden des Trichters. Beim Einfüllen sammelt sich zwar Wasser im Trichter an und überdeckt den Ball, jedoch fließt stetig etwas Wasser durch die Trichtertülle ab. Somit befindet sich unterhalb des Tischtennisballs kein Wasser und es kann dadurch kein hydrostatischer Druck von unten wirken. Der Ball bleibt am Boden. Verdeckt man schließlich den Abfluss des Trichters mit einem Finger, so kann kein Wasser mehr abfließen und es sammelt sich unterhalb des Balles Wasser an. Es wirkt ein hydrostatischer Druck von unten und der Ball wird durch die resultierende Auftriebskraft nach oben gedrückt. Letztlich nimmt der Ball, aufgrund seiner geringen Gewichtskraft, eine schwimmende Position ein. Öffnet man die Trichteröffnung wieder, so kann das Wasser solange abfließen, bis der Tischtennisball die Öffnung erneut blockiert. Diesmal verhindert er jedoch, dass der Atmosphärendruck auf das Wasser unterhalb des Balls wirkt, wodurch eine kleine Wassersäule in der Tülle erhalten bleibt.



Abbildung 86: Offene Trichtertülle – Tischtennisball bleibt haften



Abbildung 87: Abgedichtete Trichtertülle – Tischtennisball bewegt sich nach oben

Material

1 Trinkglas (klein)

1 Tintenpatrone

Sonnenblumenöl

Kürbiskernöl

Spülmittel

Salz



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experiments wird ein wenig Öl in ein mit Wasser gefülltes Trinkglas geschüttet. Der Ölstrahl taucht unter Wasser ein, wo sich zunächst das Öl in Kugelformen anordnet. Dieses treibt dann in Richtung Oberfläche, wo sich eine homogene Ölschicht einstellt. Tropft man nun auf die Ölschicht ein paar Tropfen Tinte, so sinken diese ein und bilden ebenfalls Kugeln (Abbildung 90). Die Kugeln wandern durch die Ölschicht hindurch und bilden am unteren Ende

der Schicht einen Tropfen. Dieser bleibt eine Weile erhalten, bis er bricht und die Tinte auf den Boden des Glases sinkt (Abbildung 91). Schüttet man anstelle von Tinte etwas Salz auf das Öl, so sinkt dieses, mit Öl ummantelt, zu Boden. Nach kurzer Zeit steigen immer wieder Öltropfen nach oben (Abbildung 92). Zu guter Letzt nimmt man ein leeres Trinkglas und füllt in dieses eine ca. 2 cm hohe Schicht Spülmittel. Anschließend lässt man langsam Wasser am Innenrand des Glases hineinfließen, bis sich über dem Spülmittel eine ebenso dicke Wasserschicht gebildet hat. Zum Schluss fügt man auf dieselbe Weise noch die gleiche Menge Öl hinzu. Man kann nun drei heterogene Schichten begutachten, welche sich auch nach einiger Zeit nicht durchmischen (Abbildung 93).

Physikalische Erklärung

Während Wasser polar ist (Kapitel 2.2.1), sind Öle unpolar (Hüttermann, 2011, S. 35). Aus diesem Grund sind die Kohäsionskräfte der jeweiligen Moleküle untereinander größer als die Adhäsionskräfte zwischen den zwei Substanzen und daher vermischen sich Wasser und Öl nicht, d. h. Wasser ist lipophob (Noller, 1960, S. 196). Da die Oberflächenspannung der Flüssigkeiten stets bestrebt ist, ihre Oberfläche minimal zu halten, ordnet sich das Öl kugelförmig an. Diese Kugeln schwimmen an die Oberfläche, da Öl eine geringere Dichte als Wasser hat. Wird im Anschluss Tinte in das Glas getropft, so bewegt sich dieses kugelförmig durch die Ölschicht, da Tinte ein Wasser-Farbstoff-Gemisch ist und somit eine leicht höhere Dichte als Wasser hat. Die Tintenkugel bleibt an der Öl-Wasser-Grenze länger bestehen, da das Wasser aufgrund der lipophoben Eigenschaft an der Grenzschicht eine Oberfläche bildet und der Tropfen die Oberflächenspannung überwinden muss, bevor er zu Boden sinkt (Lück, 2016, S. 21-22 & 84). Schüttet man das Salz in das Glas, so sinkt es zu Boden, da es eine höhere Dichte als Öl und Wasser besitzt. Dabei wird etwas Öl mit nach unten gezogen. Am Boden trennen sich Öl und Salz wieder und das Öl schwimmt nach oben. Bei Zugabe von Spülmittel bildet dieses, aufgrund der hohen Dichte, die unterste Schicht.



Abbildung 88: Sonnenblumenöl in Wasser



Abbildung 89: Kürbiskernöl in Wasser



Abbildung 90: Kugelförmige Tinte im Öl



Abbildung 91: Die schwere Tinte



Abbildung 92: Lavalampe aus Öl und Salz



Abbildung 93: Heterogene Schichten

Material

1 PET-Flasche (1,5 l)

1 kartesischer
Taucher

Wasser



Variante 2

1 PET-Flasche

1 Zitrusfrucht

Sparschäler

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die PET-Flasche wird mit Wasser vollgefüllt. In diese kommt der kartesische Taucher und die Flasche wird anschließend wieder geschlossen. Der Taucher schwimmt (Abbildung 94), drückt man die PET-Flasche jedoch etwas fester zusammen, so sinkt er (Abbildung 95). Lässt man die Flasche wieder los, so taucht der Körper wieder nach oben. Drückt man nicht mit konstanter Kraft, sondern wechselt recht schnell zwischen drücken und loslassen, so fängt der Taucher an sich zu drehen (siehe Video – Variante 1).

Hat man keinen kartesischen Taucher zur Hand, so kann mit einem Sparschäler ein Stück der Schale einer Zitrusfrucht herabgeschnitten und dieses stattdessen verwendet werden (Abbildung 96 und Abbildung 97). Der restliche Ablauf ist ident zur vorherigen Variante. Nach einigen Durchläufen steigt die Schale jedoch nicht mehr nach oben.

Physikalische Erklärung

Der kartesische Taucher ist ein hohler Schwimmkörper mit eingeschlossener Luftblase. Weiters hat der Taucher seitlich kleine Öffnungen, welche mit der Luftkammer verbunden sind. Legt man den Taucher nun in eine volle Wasserflasche, welche anschließend geschlossen wird, so schwimmt er, da seine Gewichtskraft F_G zunächst kleiner ist als die Auftriebskraft F_A (Kapitel 3.1.3). Drückt man die Flasche anschließend zusammen, so wird der Druck aufgrund der Inkompressibilität von Wasser bis zum Taucher fortgepflanzt (Exp. [9]). Durch die kleinen Löcher kann im Normalzustand kein Wasser eintreten, da der Hohlraum mit Luft gefüllt ist (siehe Exp. [11]). Durch den zusätzlichen Druck wird die Luft komprimiert und es kann Wasser eintreten. Aufgrund des geringeren Luftvolumens im Taucher, wird weniger Wasser verdrängt und somit sinkt die Auftriebskraft F_A . Übersteigt die Gewichtskraft F_G die Auftriebskraft F_A so sinkt der Taucher. Lässt man die Flasche wieder los, so sinkt der gesamte Druck in der Flasche und die Luft im Taucher kann sich wieder ausdehnen. Dabei strömt das Wasser aus den seitlichen Löchern des kartesischen Tauchers, was zu einer kleinen Drehbewegung führt. Da sich wieder weniger Wasser im Taucher befindet, dehnt sich die Luft wieder aus und er steigt nach oben (Neumann, 2013, S. 38). In der Zitruschale befinden sich Lufteinschlüsse, welche beim Druck von außen komprimiert werden. Dadurch kann Wasser in die Schale eindringen und sie sinkt analog zum kartesischen Taucher. Dabei können jedoch Luftblasen entweichen.



Abbildung 94: Kartesischer Taucher schwimmt



Abbildung 95: Kartesischer Taucher sinkt durch Außendruck



Abbildung 96: Limette als Kartesischer Taucher schwimmt



Abbildung 97: Limette als Kartesischer Taucher sinkt

3.1.4 Gravitation

Bei der Gravitation handelt es sich um eine massenabhängige, gegenseitige Anziehung von Körpern. Auf der Erde beobachtet man die Gravitation zwischen Erdoberfläche und Körpern, der sogenannten Schwer- oder Gewichtskraft.

Das Gravitationsgesetz

Die gegenseitige Anziehungskraft von zwei Körpern lässt sich mit Hilfe des Newton'schen Gravitationsgesetzes bestimmen:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (57)$$

Dabei ist F die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern mit den Massen m_1 und m_2 und dem Abstand r zueinander. Weiters ist $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$ die Gravitationskonstante (Kuchling, 2011, S. 140 & 141). Mit dem Gravitationsgesetz hatte Isaac Newton (1642-1727) erstmals eine Erklärung für die Bewegung der Planeten, Doppelgalaxien usw. Jegliche Massenbestimmungen astronomischer Körper beruhen auf diesem Gesetz (Kistner, 1919, S. 124; Struve et al., 1967, S. 46).

Wie in Formel (57) ersichtlich, nimmt die Gravitationskraft mit dem Quadrat des Abstandes vom Erdmittelpunkt ab.

Die Schwerebeschleunigung der Erde

Ein Körper mit der Masse m , welcher sich im freien Fall befindet, unterliegt dem zweiten Newton'schen Gesetz, der Grundgleichung der Mechanik:

$$F_G = m \cdot g \quad (58)$$

Zwischen einem Körper auf der Erde mit der Masse m und der Erde selbst mit der Masse m_{Erde} wirkt die Gravitationskraft:

$$F_G = G \cdot \frac{m \cdot m_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}^2} \quad (59)$$

Betrachtet man die Erde als Kugel, so ist ihr mittlerer Radius $r_{\text{Erde}} = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$. Die Masse m_{Erde} der Erde beträgt $5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Setzt man die Gleichungen für die Gewichtskraft und die Gravitationskraft gleich, so erhält man:

$$m \cdot g = G \cdot \frac{m \cdot m_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}^2} \quad (60)$$

Da sich die Masse m auf beiden Seiten befindet, kann diese weggekürzt werden und man kann durch Einsetzen der Werte die Schwerebeschleunigung der Erde berechnen:

$$g = G \cdot \frac{m_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,97 \cdot 10^{24}}{6,37 \cdot 10^6^2} \approx 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (61)$$

Durch das Wegkürzen der Massen erkennt man, dass die Masse eines fallenden Gegenstands keinen Einfluss auf die Fallbeschleunigung hat, d. h.: Alle Körper fallen auf der Erdoberfläche gleich schnell, unabhängig von ihrer Masse (Tipler & Mosca, 2008, S. 136 & 137; Kuchling, 2011, S.141 & 142). Eine Ausnahme dabei bilden Körper, welche so leicht sind, dass ihr Luftwiderstand eine Rolle spielt.

Betrachtet man die Formel $g = G \cdot \frac{m_{Erde}}{r_{Erde}^2}$ genauer und ersetzt r_{Erde} durch r , so fällt auf, dass die Schwerebeschleunigung im Intervall $0 < r \leq r_{Erde}$ linear zunimmt, während sie im Intervall $r_{Erde} < r < \infty$ mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt (Abbildung 98).

Wie bereits zuvor erwähnt, wird in der Berechnung für die Schwerebeschleunigung g die Form der Erde als Kugel angenommen und somit ergibt dies einen mittleren Wert für die Schwerebeschleunigung g von $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$. Da die Schwerebeschleunigung abhängig von der Entfernung zum Erdmittelpunkt ist, sowie der Tatsache, dass die Massenverteilung auf der Erde recht inhomogen ist, kommt es zu einer örtlich abhängigen Erdbeschleunigung. Die ortsabhängige Gravitation wird in einer Gravitationskarte überspitzt dargestellt. Die dabei entstehende Form der Erde wird auch als Geoid bezeichnet (Abbildung 99) (Clauser, 2018, S. 239 ff.).

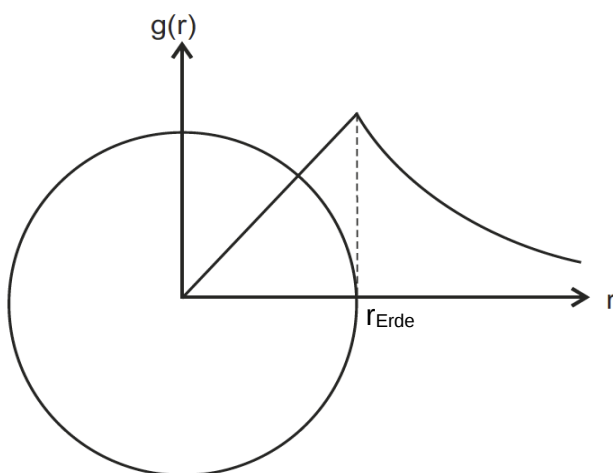


Abbildung 98: Schwerebeschleunigung in Abhängigkeit von r

Quelle: Clauser, 2018, S. 239

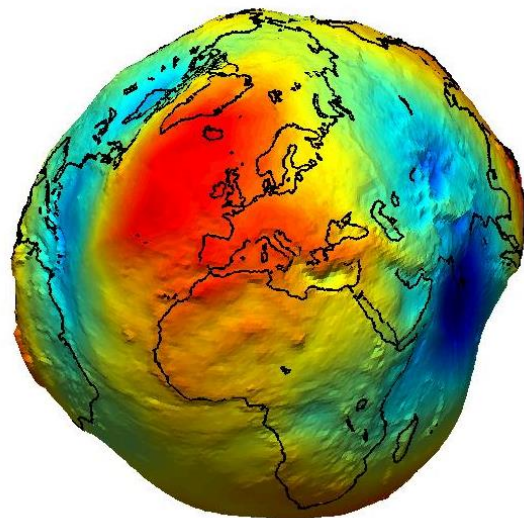


Abbildung 99: Gravitationskarte der Erde. Darstellung als Geoid

Quelle: http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2004/10/the_earth_s_gravity_field_geoid_as_it_will_be_seen_by_goce/10002199-2-eng-GB/The_Earth_s_gravity_field_geoid_as_it_will_be_seen_by_GOCE.jpg

Bei Abbildung 99 stellen die blau bis grün gekennzeichneten Flächen Gebiete mit niedriger Gravitation dar, während die gelblich bis roten Flächen auf eine hohe Gravitation hinweisen.

Material

2 PET-Flaschen

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die beiden exakt gleichen PET-Flaschen werden mit Wasser befüllt, die eine bis zur Hälfte, die andere vollständig. Anschließend lässt man die beiden Flaschen von der gleichen Höhe fallen (Abbildung 100) und beobachtet deren vertikalen Fall. Wie man in Abbildung 101 erkennt, fallen beide Flaschen gleich schnell und erreichen somit gleichzeitig den Boden.

Physikalische Erklärung

Bei der vertikalen Bewegung nach unten handelt es sich um einen Fall mit Luftwiderstand. Durch den Luftwiderstand wird die Beschleunigung des Körpers reduziert, wodurch er langsamer zu Boden fällt. Für dieses Experiment spielt der Luftwiderstand jedoch keine Rolle, da er für beide Flaschen ident ist.

Setzt man nun wie bereits in Kapitel 3.1.4 gezeigt, die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ sowie die Gravitationskraft $F_G = G \cdot \frac{m \cdot m_{Erde}}{r_{Erde}^2}$ gleich, so erkennt man, dass die Schwerebeschleunigung unabhängig von der Masse ist:

$$g = G \cdot \frac{m_{Erde}}{r_{Erde}^2} \quad (62)$$

Somit fallen beide Flaschen gleich schnell zu Boden, unabhängig von ihrer Masse.

Anmerkung: Den Einfluss des Luftwiderstands kann man sehr gut mit einem Blatt Papier und einem Ball zeigen. Lässt man beide Objekte fallen, so landet das Papier deutlich später auf dem Boden. Führt man das Experiment jedoch erneut durch, wobei man zuerst das Papier zerknüllt und lässt dann beides fallen, so kommen Ball und Papierkugel gleichzeitig am Boden an.



Abbildung 100: Zwei idente PET-Flaschen; eine halb, die andere vollständig gefüllt mit Wasser



Abbildung 101: Freier Fall beider Flaschen ist ident

Material

1 PET-Flasche
1 Tintenpatrone
Flambierbrenner
Kreuzschraubenzieher
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Kreuzschraubenzieher wird mit Hilfe des Flambierbrenners erhitzt. Mit diesem wird im unteren Drittel der Flasche ein Loch hineingebrannt. Für bessere Sichtbarkeit wird Tinte mit Wasser vermengt und dieses anschließend in die Flasche gefüllt. Die Flüssigkeit beginnt sofort aus dem Loch zu fließen (Abbildung 102) und würde so lange weiterfließen, bis der Wasserpegel unter dem Loch stünde. Lässt man die Flasche jedoch fallen, so tritt während des Falls kein Wasser aus (Abbildung 103).

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Exp. [18] erklärt, wirkt außerhalb der Flasche der Atmosphärendruck p_0 . Im Inneren der Flasche wirkt auf Höhe des Loches zusätzlich zum Luftdruck der hydrostatische Druck der darüber liegenden Wassersäule:

$$p_{\text{innen}} > p_{\text{außen}} \Leftrightarrow p_0 + \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h > p_0 \quad (63)$$

Somit unterscheidet sich der innere Druck lediglich um den hydrostatischen Druck vom äußeren Druck. Die vom hydrostatischen Druck p erzeugte Kraft F lässt sich darstellen durch $F = p \cdot A$. Lässt man die Flasche fallen, so wirkt auf das Wasser die Gewichtskraft $F_G = m_{\text{Wasser}} \cdot g$. Setzt man die beiden Kräfte gleich, so lässt sich mit $m_{\text{Wasser}} = A \cdot h \cdot \rho_{\text{Wasser}}$ Folgendes feststellen:

$$F = F_G \Leftrightarrow p \cdot A = m_{\text{Wasser}} \cdot g \Leftrightarrow \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h \cdot A = A \cdot h \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \Leftrightarrow 0 = 0 \quad (64)$$

Im freien Fall wirkt keine Gewichtskraft. Dadurch kann die Wassersäule keinen zusätzlichen hydrostatischen Druck ausüben. Somit sind Innendruck p_{innen} und Außendruck $p_{\text{außen}}$ äquivalent und es tritt kein Wasser aus.



Abbildung 102: Wasser tritt aus dem Loch aus



Abbildung 103: Im freien Fall tritt kein Wasser aus Loch aus

Material

1 Tischtennisball

1 Trinkbecher aus
Kunststoff

Meterstab

Klebeband

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experiments wird der Meterstab zur Gänze ausgeklappt und möglichst senkrecht gehalten. Lässt man anschließend den Tischtennisball von einer bestimmten Höhe auf den Boden fallen, so springt dieser nach dem Aufprall wieder nach oben. Die maximale Höhe, welche der Ball beim Sprung nach oben erreicht, wird notiert (Abbildung 104). Im nächsten Schritt wird der Kunststoffbecher ca. zu einem Drittel mit Wasser befüllt und der Tischtennisball in diesen hineingelegt. Den befüllten Becher lässt man nun aus der gleichen Höhe, wie zuvor den Tischtennisball, fallen.

Hierbei ist darauf zu achten, dass der Becher senkrecht fallen gelassen wird. Im Idealfall bleibt der Becher hierbei am Boden stehen. Nach dem Aufprall am Boden wird der Ball förmlich aus dem Becher katapultiert (Abbildung 105). Vergleicht man hier die höchste Position des Sprungs mit jener von vorher, so erkennt man einen deutlichen Unterschied. Bei dargestellter Durchführung erreichte der Ball im mit Wasser gefüllten Trinkbecher mit mehr als 112 cm ca. die doppelte Höhe als zuvor ohne Becher. Der ursprünglich erreichte Wert betrug ca. 56 cm .

Anmerkung

Um eine gerade Flugbahn des Tischtennisballs zu erlangen, empfiehlt es sich, das Wasser im Becher vor dem Loslassen kurz in Rotation zu versetzen, da sich der Tischtennisball dadurch von dem Rand des Bechers löst und in der Mitte gehalten wird.

Physikalische Erklärung

Lässt man den befüllten Becher fallen, so erreichen der Becher, das Wasser und der Tischtennisball aufgrund der Schwerebeschleunigung die gleiche Geschwindigkeit. Da sich der Becher an unterster Stelle befindet, kommt dieser als erstes am Boden an, gefolgt vom Wasser. Dabei wird das Wasser nach unten gedrückt und es baut sich ein großer Druck auf. Der Druck verursacht eine nach oben gerichtete Kompressionswelle. Währenddessen befindet sich der Ball noch im Fall, somit kollidieren er und die Wasserwelle. Da das nach oben beschleunigte Wasser eine viel größere Masse hat als der Tischtennisball wird die kinetische Energie des Wassers auf den Ball übertragen. Dadurch bekommt er einen großen Impulsübertrag und somit eine hohe Geschwindigkeit (Cool Science, 2019).

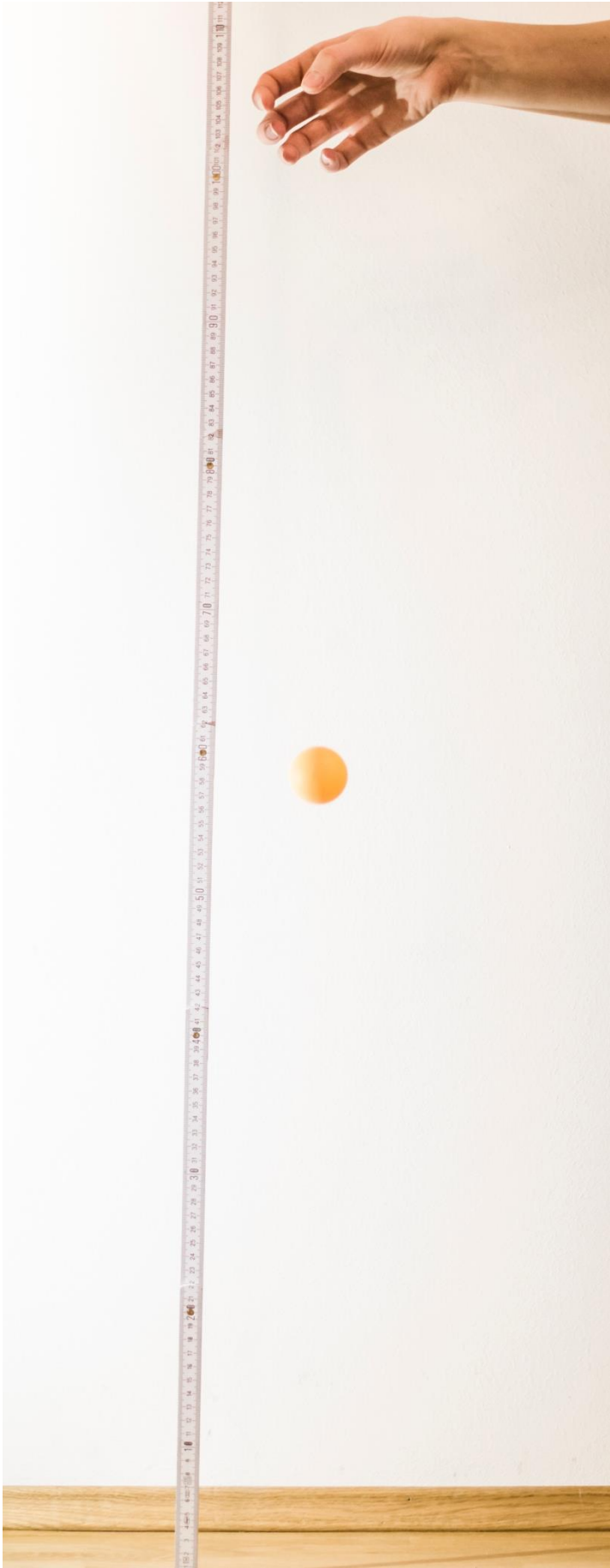


Abbildung 104: Sprunghöhe ohne Becher



Abbildung 105: Sprunghöhe mit Becher

3.1.5 Strömungen

Als Strömung wird die makroskopische Bewegung eines Fluids bezeichnet. Beispiele für solche Bewegungen sind jene in einem Fluss bzw. Rohr. Liegt die Geschwindigkeit eines strömenden Gases unter der Schallgeschwindigkeit, so unterliegen diese denselben Gesetzen wie strömende Flüssigkeiten. Den Raum, den eine Strömung einnimmt, bezeichnet man als Strömungsfeld. In diesem haben die Teilchen eine Geschwindigkeit, welche stets in Größe und Richtung bestimmt ist (Kuchling, 2011, S. 161; Kommer et al. 2015, S. 180).

Strömungen in Rohren

Durch einen betrachteten Rohrquerschnitt bewegt sich ein entsprechendes Volumen V in einer gewissen Zeitdauer t . Dies wird als Volumenstrom $\dot{V}$ in Flussrichtung bezeichnet:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \quad (65)$$

Das Volumen lässt sich darstellen als $V = ds \cdot A$. Weiters ist $\frac{ds}{dt}$ die Geschwindigkeit v . Der Volumenstrom lässt sich darstellen als (Kuchling, 2011, S. 162; Kommer et al. 2015, S. 180):

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{ds}{dt} \cdot A = v \cdot A \quad (66)$$

Flüssigkeiten sind, wie in Kapitel 2.2.2 bereits erwähnt, nahezu inkompressibel. Daher folgt aus Formel (66), dass in einer bestimmten Zeit das gleiche Volumen der Flüssigkeit durch jeden Querschnitt eines Rohres fließen muss. Betrachtet man im Folgenden einen Rohrquerschnitt mit einer Verengung (Abbildung 106), so kennzeichnet die links schraffierte Fläche ein Flüssigkeitsvolumen dV_1 welches in der Zeit Δt die Querschnittsfläche A_1 mit der Geschwindigkeit v_1 durchfließt. In derselben Zeit Δt durchfließt das Flüssigkeitsvolumen dV_2 die Querschnittsfläche A_2 mit der Geschwindigkeit v_2 . Aufgrund der Inkompressibilität von Flüssigkeiten folgt:

$$dV_1 = dV_2 \Leftrightarrow A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \quad (67)$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \text{ bzw. } A \cdot v = \text{konstant} \quad (68)$$

Die Gleichung (68) wird als Kontinuitätsgleichung bzw. Durchflussgleichung bezeichnet. Für Gase müsste im gleichen Querschnitt die Dichteänderung berücksichtigt werden. Die Gleichung würde somit wie folgt aussehen (Kuchling, 2011, S. 163; Tipler & Mosca, 2008, S. 388):

$$A_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2 \quad (69)$$

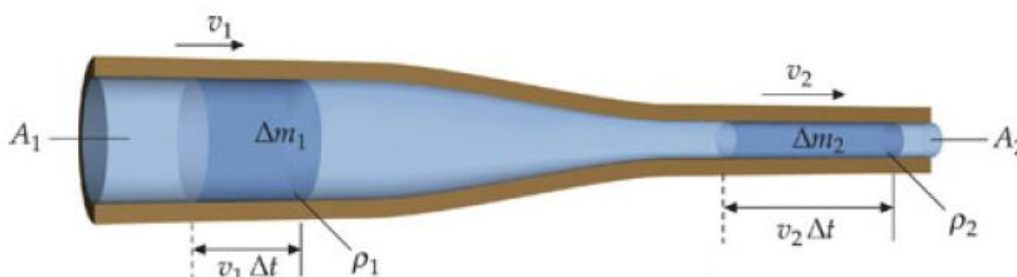


Abbildung 106: Fluidfluss durch eine Rohrverengung. Dabei ist die Masse $m = \rho \cdot V$
Quelle: Tipler & Mosca, 2008, S. 388

Bernoulli-Gleichung

Betrachtet man nun eine infinitesimale, inkompressible und nicht viskosen Fluidmenge in Form eines Rechtecks (Abbildung 107) in einer laminaren Strömung, so lässt sich damit die Bernoulli-Gleichung herleiten. Das dabei betrachtete Fluidrechteck erreicht einen Bereich mit niedrigerem Druck als zuvor.

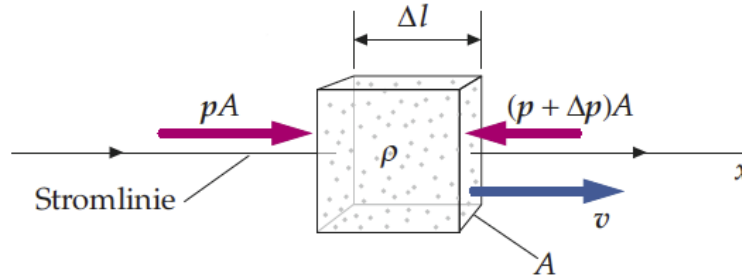


Abbildung 107: Infinitesimale Fluidmenge, welche sich auf einen Bereich mit geringem Druck zubewegt

Quelle: Tipler & Mosca, 2008, S. 389

Das Fluidpaket hat die Grundfläche A , senkrecht zur Strömungsrichtung, eine Länge Δl , eine Dichte ρ und eine Masse m . Dadurch ergibt sich für das Rechteck ein Volumen von $V = A \cdot \Delta l$ und eine Masse von $m = \rho \cdot V$. Nun wendet man die Grundgleichung der Mechanik, das zweite Newton'sche Axiom, bei welchem a für die Beschleunigung steht, auf die Fluidmenge an:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (70)$$

Dabei entsteht die Kraft F durch die Druckdifferenz, welche vor sowie nach dem Rechteck, vorherrscht. Von hinten, in Stromrichtung drückt der Druck p , während der Druck $p + \Delta p$ von vorne dagegendrückt. Somit lässt sich die Kraft darstellen durch:

$$F = p \cdot A - (p + \Delta p) \cdot A = -A \cdot \Delta p \quad (71)$$

Den Druckunterschied kann man als Differenzial darstellen, da es sich beim betrachteten Fluid um ein infinitesimales Volumen handelt:

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{dp}{dx} \Leftrightarrow \Delta p = \frac{dp}{dx} \cdot \Delta l \quad (72)$$

Setzt man nun den Druckunterschied bei der Kraft und anschließend die Masse sowie die Kraft in die Grundgleichung der Mechanik ein, so erhält man:

$$-A \cdot \frac{dp}{dx} \cdot \Delta l = \rho \cdot A \cdot \Delta l \cdot \frac{dv}{dt} \Leftrightarrow -dp = \rho \cdot \frac{dv}{dt} \cdot dx \quad (73)$$

Bei $\frac{dx}{dt}$ handelt es sich um die Geschwindigkeit v , somit gilt:

$$dp = -\rho \cdot v \cdot dv \quad (74)$$

Nun lassen sich beide Seiten integrieren und man erhält:

$$\begin{aligned} \int_{p_1}^{p_2} dp &= -\rho \cdot \int_{v_1}^{v_2} v \, dv \Leftrightarrow p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \\ &\Leftrightarrow p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 = p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 \end{aligned} \quad (75)$$

Dies gilt für eine Strömung, welche sich stets auf der gleichen Höhe befindet. Betrachtet man nun eine nicht horizontale Stromlinie, so muss der Schweredruck in der Gleichung berücksichtigt werden, wobei h_1 die Anfangshöhe und h_2 die Endhöhe der Stromlinie ist:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (76)$$

Dies ist die sogenannte Bernoulli-Gleichung, welche sich auf folgende Weise darstellen lässt:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konstant} \quad (77)$$

Die Gleichung besagt, dass die Summe aus statischem Druck p , Schweredruck $\rho \cdot g \cdot h$ sowie dynamischen Druck $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ konstant ist (Tipler & Mosca, 2008, S. 389-390).

Viskosität von Flüssigkeiten

Flüssigkeiten haben eine gewisse Zähigkeit, welche durch die Viskosität beschrieben wird. Die Viskosität entsteht durch die innere Reibung der Moleküle. Befindet sich etwa eine Flüssigkeitsschicht mit der Höhe h zwischen einem festen Boden und einer beweglichen Platte mit der Fläche A , so wird aufgrund der Reibung eine Kraft F benötigt, um die bewegliche Platte mit der Geschwindigkeit v zu verschieben (Abbildung 108).

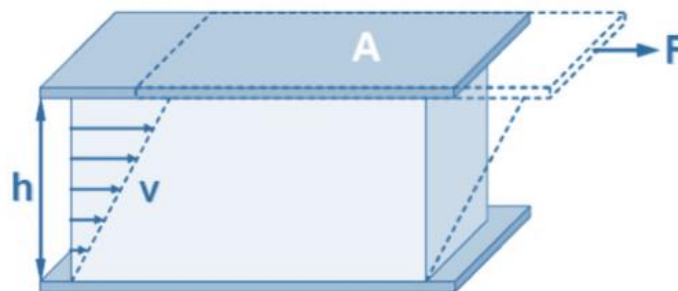


Abbildung 108: Dynamische Viskosität
Quelle: Fleischmann, 2014, S. 8

Die dafür benötigte Kraft F lässt sich berechnen durch (Meschede, 2010, S. 111):

$$F = \frac{\eta \cdot A \cdot v}{h} \quad (78)$$

η bezeichnet die Viskosität. Wasser hat bei 20°C eine Viskosität in der Größenordnung von $\eta_{\text{Wasser}} = 10^{-3} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$. Dies ist eine vergleichsweise geringe Viskosität im Vergleich zu Honig. Bei gleicher Temperatur ist dessen Viskosität in der Größenordnung von $\eta_{\text{Honig}} = 10^3 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$ (Hopmann et al., 2015, S. 80). Bei oben erwähntem Platten-Beispiel nimmt die Geschwindigkeit linear ab, sodass die Geschwindigkeit am Boden null ist. Dabei wird $\frac{v}{h}$ als Geschwindigkeitsgefälle bezeichnet (Kuchling, 2011, S. 168).

Laminare und turbulente Strömungen

Ob es sich um eine laminare oder turbulente Strömung handelt, hängt im Wesentlichen von der Geschwindigkeit ab. Bei niedrigen Geschwindigkeiten handelt es sich um eine laminare

Strömung, bei welcher sich die einzelnen Stromlinien nicht kreuzen. Im Gegensatz dazu entstehen turbulente Strömungen ab einer gewissen kritischen Geschwindigkeit. Dabei brechen die inneren Schichten nach außen und die Stromlinien kreuzen sich. Weiters treten große lokale Geschwindigkeitsunterschiede auf. Betrachtet man nun eine Strömung in einem Rohr, so wird eine Flüssigkeit durch die Druckkraft vorangetrieben. An der Rohrwand ist die Geschwindigkeit aufgrund der Reibungskräfte null und wird zur Mitte hin immer größer, wo sie letztlich in der Rohrachse ihr Maximum hat (Abbildung 109) (Meschede, 2010, S. 124). Dieses Phänomen kann man beispielsweise in einem Konvektionsrohr beobachten (Exp. [48]).

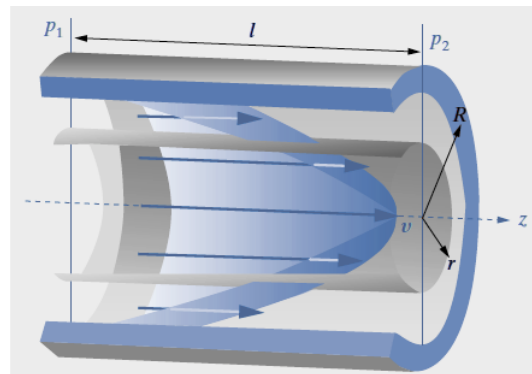


Abbildung 109: Laminare Strömung in einem Rohr
Quelle: Meschede, 2010, S. 125

Strömungswiderstand

Befindet sich ein Körper in einer Strömung, so wird die Kraft, die auf diesen wirkt, als Strömungswiderstand F_w bezeichnet. Diese berechnet sich durch:

$$F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (79)$$

Wie in Formel (79) ersichtlich, hängt der Strömungswiderstand von der angeströmten Oberfläche des Körpers, sowie der Dichte des Mediums ab. Weiters erkennt man, dass der Strömungswiderstand mit dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Körper zunimmt. Letztlich spielt der c_w -Wert eine Rolle. Dieser wird Widerstandsbeiwert genannt und ist eine Zahl ohne Einheit. Er ist nicht nur von der Stirnfläche, sondern von der gesamten Form des Körpers abhängig (Kuchling, 2011, S. 173, Meschede, 2010, S. 126). Außerdem ist der c_w -Wert eine Funktion der sogenannten Reynolds'schen Zahl Re :

$$Re = \frac{l \cdot \rho \cdot v}{\eta} = \frac{l \cdot v}{\nu} \quad (80)$$

Dabei ist l die charakteristische Länge des Körpers, v die Relativgeschwindigkeit und η die dynamische Viskosität. Weiters ist $\nu = \frac{\rho}{\eta}$ die kinematische Viskosität. Diese beträgt für Wasser bei 20°C $\nu_{Wasser} = 1,004 \frac{mm^2}{s}$. Die Strömung ist laminar, wenn die Reynolds-Zahl klein und somit auch die Geschwindigkeit gering ist. Bis zu einer Reynolds-Zahl von ca. 2300 kann man von einer rein laminaren Strömung in einem Rohr ausgehen. Dabei entspricht die Länge l dem Rohrdurchmesser. Liegt der Wert darüber, so wird die Strömung turbulent. Da die Strömung jedoch auch von den Anfangsbedingungen sowie der Beschaffenheit der Röhre abhängt, muss die sogenannte kritische Reynolds-Zahl jedes Mal individuell bestimmt werden (Kuchling, 2011, S. 174 & 621; Tipler & Mosca, 2008, S. 399).

Material

1 Strömungsapparat
1 Schlauch mit Klemme
1 Stativ
Destilliertes Wasser
1 Bogenlampe
Auffangbehälter
Tinte

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Zu Beginn des Experiments wird der Strömungsapparat mit Hilfe des Stativs vor der Bogenlampe aufgestellt. Beim Strömungsapparat handelt es sich um eine Spezialkonstruktion, welche aus einem rechteckigen Becken mit einem Durchflussrohr in der Mitte besteht. Das Durchflussrohr ist durch ein Verbindungsstück mit kleinen Löchern mit dem äußeren Becken verbunden. Oberhalb des Mittelstücks befindet sich ein Rohr, welches in einer Nadelöffnung unterhalb des Verbindungsstücks endet und somit in das

untere Rohr ragt (Abbildung 110). Der Schlauch wird am Ausfluss des Strömungsrohrs befestigt und knapp darunter mit einer Schlauchklemme abgeklemmt. Nun befüllt man das Becken mit Wasser, bis auch das untere Durchflussrohr mit Wasser befüllt ist. Anschließend wird mit Tinte eingefärbtes Wasser in das obere Rohr gefüllt. Nun wird die Schlauchklemme je nach gewünschter Fließgeschwindigkeit geöffnet. Das Schlauchende wird zuvor in einen Auffangbehälter gelegt. Bei niedriger Fließgeschwindigkeit kann man eine laminare Strömung beobachten (Abbildung 111). Wird die Geschwindigkeit erhöht, so geht die laminare Strömung in eine turbulente über (Abbildung 112). Klopft man während einer laminaren Strömung auf den Tisch, so gibt es einen störungsverursachten Strömungsabriss (Abbildung 113).

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 3.1.5 erwähnt, wird beim Überschreiten der kritischen Reynolds-Zahl aus einer laminaren Strömung eine turbulente. In einem glatten Rohr muss die Reynolds-Zahl einen Wert von 1160 überschreiten (bezogen auf den Radius), um Turbulenzen zu erzeugen. Die Reynolds-Zahl Re lässt sich bestimmen durch (Lüders & Pohl, 2017, S. 222):

$$Re = \frac{l \cdot v}{\nu} \quad (81)$$

Man setzt nun für die Reynolds-Zahl Re den Wert von 1160 ein. Für die Länge l wird der Rohrradius mit $l = 0,75 \text{ cm}$ herangezogen. Die kinematische Viskosität von Wasser bei 20°C beträgt $\nu_W = 1,004 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$. Somit lässt sich die Geschwindigkeit berechnen, ab welcher die turbulente Strömung einsetzt:

$$v = \frac{Re \cdot \nu}{l} = \frac{1160 \cdot 1,004 \cdot 10^{-6}}{0,0075} = 0,155 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 15,5 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (82)$$

Der berechnete Wert stimmt sehr gut mit der Durchführung überein. Üblicherweise bestimmt man die Geschwindigkeit, bei welcher die turbulente Strömung einsetzt und berechnet anschließend die kritische Reynolds-Zahl.



Abbildung 110: Aufbau Strömungsapparat

Apparatur: TU-Graz

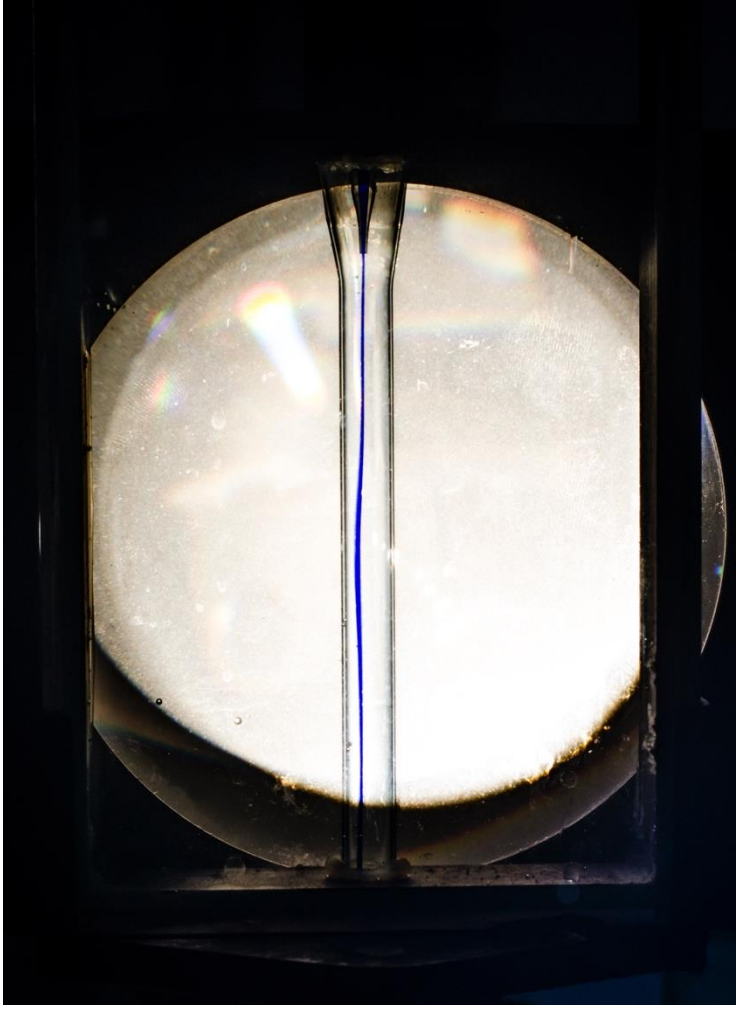


Abbildung 111: Laminare Strömung

Apparatur: TU-Graz

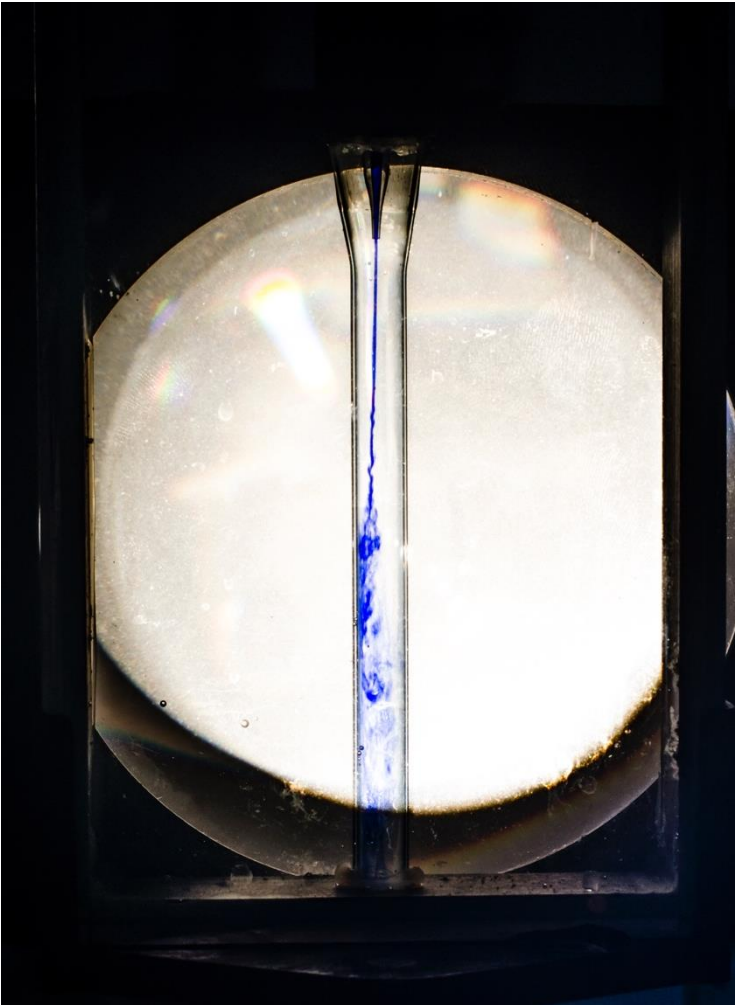


Abbildung 112: Turbulente Strömung

Apparatur: TU-Graz

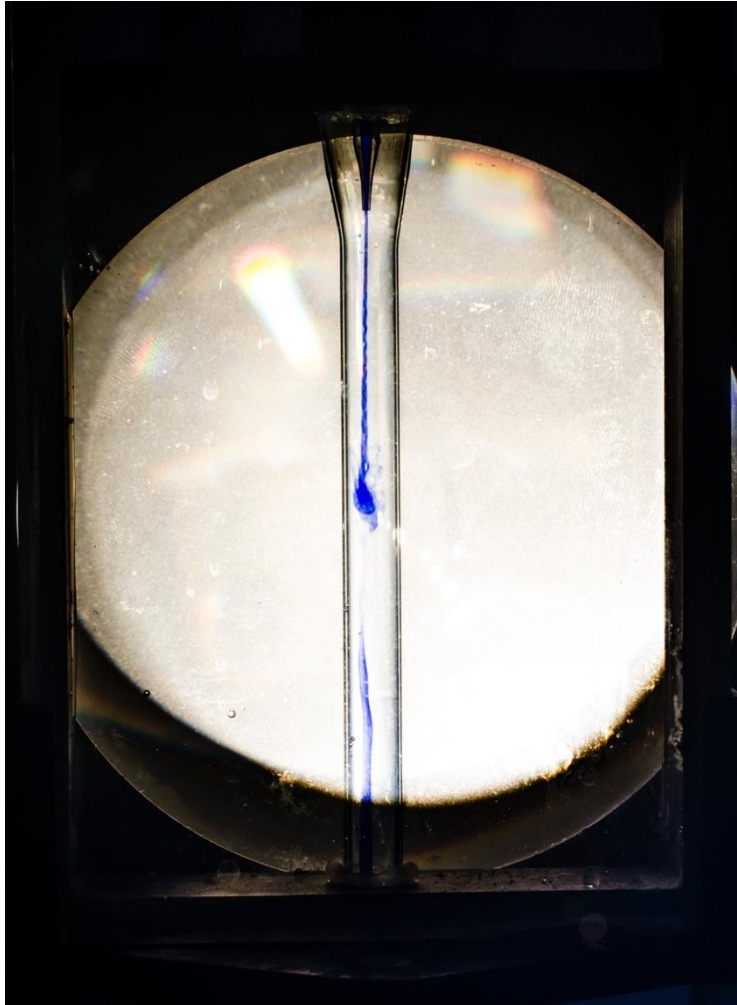


Abbildung 113: Störung einer Strömung

Apparatur: TU-Graz

Material

2 verschiedene
Ausflussapparate mit
passendem Stativ

2 Schläuche

1 Schlauchklemme

1 Standzylinder mit
Rohrstutzen

1 Bogenlampe

Auffangbehälter

Stativ mit Abstellplatte

Destilliertes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der gewünschte Ausflussapparat wird mit dem passenden Stativ auf die Arbeitsfläche gestellt. Er verfügt über zwei Schlauchnippel, einen für den Wasserzufluss und einen für den Wasserabfluss. Diese werden jeweils mit einem Schlauch verbunden. Das Ende des Abflussschlauchs wird in den am Boden stehenden Auffangbehälter gehängt, während der Anfang des Zuflussschlauchs am Rohrstutzen des Standzylinders befestigt wird. Am Zuflussschlauch wird des Weiteren die Schlauchklemme montiert. Hinter den Ausflussapparat wird eine Bogenlampe gestellt und gleich in Betrieb genommen. Diese dient zur Ausleuchtung des Ausflussapparats. Zum Schluss wird der Standzylinder auf die Abstellplatte des Stativs gestellt und nimmt somit eine erhöhte Position ein.

Löst man die Schlauchklemme, so fließt Wasser durch den Apparat und anschließend in den Auffangbehälter. Wählt man den Ausflussapparat mit den drei äquidistanten, vertikalen Manometerröhren, welche mit einem horizontalen und gleichbleibenden Durchflussrohr verbunden sind, so sieht man, dass der Wasserstand in den Manometerröhren linear abnimmt (Abbildung 114). Wählt man jedoch den Ausflussapparat mit den drei äquidistanten vertikalen Manometerröhren, welche mit einem horizontalen Ausflussrohr mit einer Einschnürung beim mittleren Manometerrohr verbunden sind, so sieht man, dass der Wasserpegel des ersten und letzten Röhrchens wieder im linearen Zusammenhang steht, während der Pegel des mittleren darunter liegt (Abbildung 115).

Anmerkung: Bei ruhender Flüssigkeit ist der Wasserpegel in jedem Manometerrohr gleich hoch, unabhängig vom Ausflussapparat (Kapitel 3.1.2 – Kommunizierende Röhren).

Physikalische Erklärung

Würde es sich bei diesem Experiment um eine ideale, also reibungsfreie Flüssigkeit handeln, so würde der Flüssigkeitspegel in jedem Manometerrohr gleich hoch stehen. Die Ausnahme dabei würde das Rohr über der Verengung bilden. Da es sich jedoch um eine Flüssigkeit mit Reibung handelt, ist diese für den linearen Abfall verantwortlich. Den linearen Zusammenhang zwischen der Differenz des statischen Drucks Δp und der Länge l des Rohres erkennt man im

Gesetz von Hagen-Poiseuille, welches das Durchflussvolumen einer Flüssigkeit in einer Zeit t in einem Rohr beschreibt:

$$V = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot t \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (83)$$

Bei der Verengung sinkt der Wasserspiegel und somit der statische Druck, da die Geschwindigkeit des dynamischen Drucks zunimmt (Formel (68)). Dies lässt sich in der Bernoulli-Gleichung für eine Strömung auf gleicher Höhe erkennen (Kuchling, 2011, S. 171, Meschede, 2010, S. 117-118):

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \text{konstant} \quad (84)$$

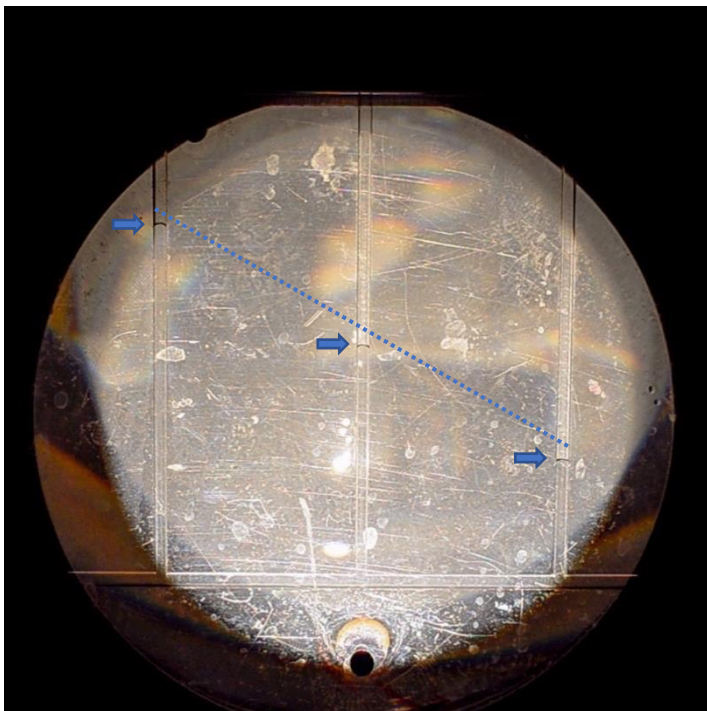


Abbildung 114: Linearer Druckabfall aufgrund von Strömungsreibung
Apparatur: TU-Graz

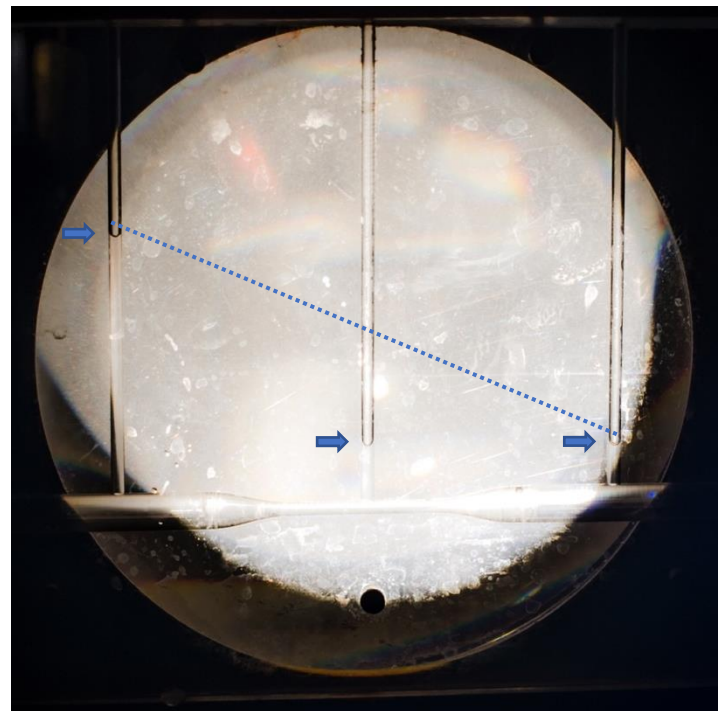


Abbildung 115: Zusätzlicher Druckabfall aufgrund höherer Strömungsgeschwindigkeit
Apparatur: TU-Graz

Material

- 1 Wasserstrahlpumpe
- 1 Becherglas
- 2 Schläuche
- Wasserhahn
- Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das kurze obere Ende der Wasserstrahlpumpe wird mit einem Schlauch am Wasserhahn angeschlossen. Der zweite Schlauch wird am seitlichen Saugstutzen befestigt. Dreht man den Wasserhahn auf, so fließt das Wasser durch die Pumpe. Legt man das andere Ende des Schlauchs am Saugstutzen in ein mit Wasser befülltes Becherglas, so wird das Wasser aus diesem gesaugt und läuft gemeinsam mit dem Wasser aus dem Hahn aus der unteren Öffnung ab (Abbildung 118). Der austretende Wasserstrahl wird dabei ruhiger. Dreht man das Wasser ab, so fließt auch kein Wasser aus dem Becherglas in die Pumpe (Abbildung 117).

Physikalische Erklärung

Wie in Abbildung 116 ersichtlich, ist das Eingangsrohr verengt und mündet in einem Hohlraum. In kurzem Abstand dazu ist ein Ausflussrohr an dem Hohlraum angebracht. Zu guter Letzt befindet sich orthogonal zum Eingangs- sowie Ausflussrohr ein Saugrohr. Fließt das Wasser nun durch das Eingangsrohr, so erhöht sich die Geschwindigkeit des Wassers, wenn es durch die Verengung fließt. Dies ist ersichtlich in der Kontinuitätsgleichung:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (85)$$

Die Erhöhung der Geschwindigkeit des Wassers bewirkt eine Erhöhung des dynamischen Drucks. Laut Bernoulli gilt:

$$p_{dyn} + p_{stat} = \text{konstant} \Leftrightarrow p_{stat} + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \text{konstant} \quad (86)$$

Somit muss bei einer Erhöhung des dynamischen Drucks, der statische Druck verringert werden. Somit entsteht ein Unterdruck im Hohlraum, wodurch Wasser durch das Saugrohr angesaugt wird. Das Wasser aus dem Eingangsrohr sowie dem Saugrohr fließt im Anschluss gemeinsam aus dem Ausflussrohr.

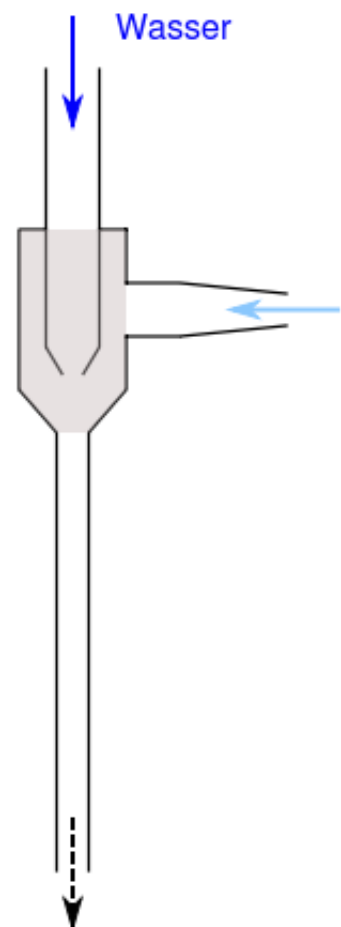


Abbildung 116: Funktionsweise Wasserstrahlpumpe.

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstrahlpumpe>



Abbildung 117: Bei abgedrehtem Wasserhahn wird kein Wasser aus dem Behälter gesaugt
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 118: Bei aufgedrehtem Wasserhahn wird aufgrund von Bernoulli Wasser aus dem Behälter gesaugt
Apparatur: TU-Graz

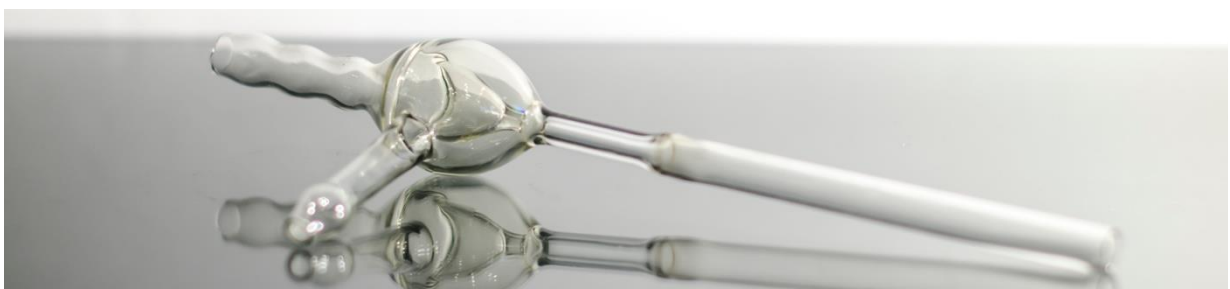


Abbildung 119: Wasserstrahlpumpe
Apparatur: TU-Graz

Material

1 Schlauch
1 Schlauchdüse
1 Hahnanschluss
1 Klemme mit Stativ
1 Tischtennisball
Wasserhahn

Wasser

Variante 2

1 Tischtennisball
1 Nähnadel
Nähfaden
Wasserhahn
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zur Vorbereitung dieses Experimentes wird der Schlauch mittels Hahnanschluss am Wasserhahn befestigt. Am anderen Ende des Schlauches wird die Düse befestigt. Diese sorgt für eine schnellere Fließgeschwindigkeit und somit für einen höheren Druck des ausströmenden Wassers (Kapitel 3.1.5). Der Schlauch wird an der Düse mittels Klemme und Stativ so befestigt, dass die Düsenöffnung senkrecht nach oben zeigt. Nun wird der Wasserhahn mit Gefühl aufgedreht, sodass ca. ein 30 – 50 cm langer Wasserstrahl austritt. Auf diesen versucht man einen Tischtennisball so zu platzieren, dass dieser vom Wasserstrahl in der Schwebe gehalten wird (Abbildung 120). Bei Variante zwei des Experimentes wird der Nähfaden durch das Nadelöhr gezogen. Anschließend sticht man mit der Nähnadel durch den Tischtennisball und zieht so den Faden durch den Ball. Nun wird der Nähfaden am unteren Ende des Tischtennisballes durch mehrere Knoten fixiert.

Daraufhin dreht man den Wasserhahn auf und lässt den Ball an dem Faden in den Wasserstrahl hängen. Sobald dieser eine stabile Lage gefunden hat, kann man den Faden zur Seite bewegen, ohne dass der Ball den Wasserstrahl verlässt (Abbildung 121).

Physikalische Erklärung

Der Ball wird aufgrund von Impulsüberträgen, verursacht durch die Wassermoleküle, nach oben gedrückt. Befinden sich die Auftriebskraft, sowie die Gewichtskraft des Balls im Gleichgewicht, so hat er seine vertikale Ausrichtung gefunden und scheint auf dieser Höhe zu schweben. Die horizontale Stabilität erhält der Ball dadurch, dass das Wasser nahe am Ball die höchste Geschwindigkeit hat (Formel (68)). Somit ist dort die Geschwindigkeit des dynamischen Drucks höher, wodurch sich auch dieser selbst erhöht (Formel (77)). Da die Summe aus statischem und dynamischem Druck konstant ist, sinkt daraufhin der statische Druck. Daher herrscht in der Nähe des Balls ein Unterdruck, wodurch der Ball im Wasserstrahl gehalten wird. Durch Reibungskräfte zwischen Ball und Wasser fängt dieser an zu rotieren, wenn er nicht symmetrisch angeströmt wird, was zum Magnus-Effekt führt (Exp. [36]). Dieser verursacht eine Kraft zur Strömung hin (Meyer, 2007, S. 18). Die vorliegende Erklärung ist ident auf das Phänomen in Variante zwei anzuwenden.



Abbildung 120: Schwebender Tischtennisball auf Wasserstrahl



Abbildung 121: Wasserstrahl wirkt horizontalen Kräften entgegen

Material

1 Aquarium

1 Holzbrett (50 – 100 cm)

1 Kunststoffzylinder

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Aquarium wird bis knapp unter dem oberen Rand mit Wasser befüllt. Das Holzbrett dient als Beschleunigungsrampe für den Zylinder. Dazu wird, längs betrachtet, eine Seite des Brettes am Aquarium abgestützt. Das entgegengesetzte Ende des Holzbrettes wird mit der Hand nach oben gehalten, sodass eine Neigung von etwa 10° entsteht. Anschließend lässt man den Kunststoffzylinder entlang des Brettes in das Wasser hineinrollen. Beobachtet man die Bewegung des Zylinders im Wasser, so erkennt man, dass dieser einen gekrümmten Weg zurücklegt.

Anmerkung: Das Funktionieren des Experiments hängt stark von der Wahl des Zylinders ab. Ist dieser zu leicht, so schwimmt er. Ist er zu schwer, so sinkt er fast senkrecht zu Boden. In diesem Fall hat sich ein mittelschwerer Kunststoffzylinder mit einer Länge von ca. 2 cm bewährt.

Physikalische Erklärung

Sobald der Zylinder in das Wasser fällt, wird er parallel zu seiner Bewegung von Wasser umströmt. Zusätzlich erfährt der Zylinder eine Zirkulationsströmung, die durch das Weiterdrehen im Wasser entsteht. In diesem Experiment rotiert der obere Teil des Zylinders gegen die Strömung, während der untere Teil mit der Strömung mitrotiert. Durch die Überlagerung der Zirkulationsströmung sowie der Parallel-Strömung ist die Geschwindigkeit an der Unterseite des Zylinders größer als oberhalb. Dies ist bekannt als Magnus-Effekt. Die höhere Geschwindigkeit bedeutet einen höheren dynamischen Druck, was nach Bernoulli einen niedrigeren statischen Druck zur Folge hat (Formel (77)). Dadurch erfährt der Zylinder auf der Unterseite eine ablenkende Kraft, die senkrecht nach außen zur Parallel-Strömung wirkt (Abbildung 122). Aufgrund dessen erfährt der Zylinder eine Ablenkung und legt einen gekrümmten Weg zurück (Meschede, 2010, S. 123; Hilscher et al., 2010, S. 347 & 348).

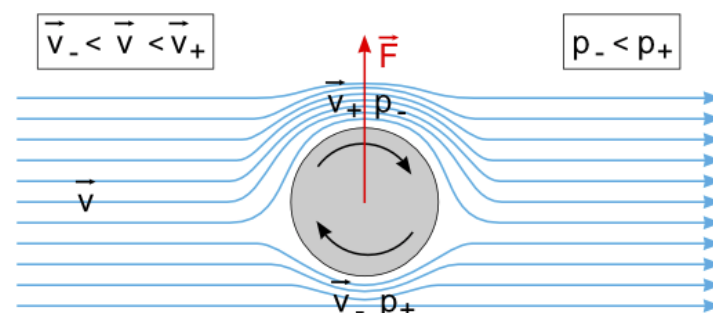


Abbildung 122: Magnus-Effekt

Quelle: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3773>



Abbildung 123: Eintauchen des Zylinders in Wasser

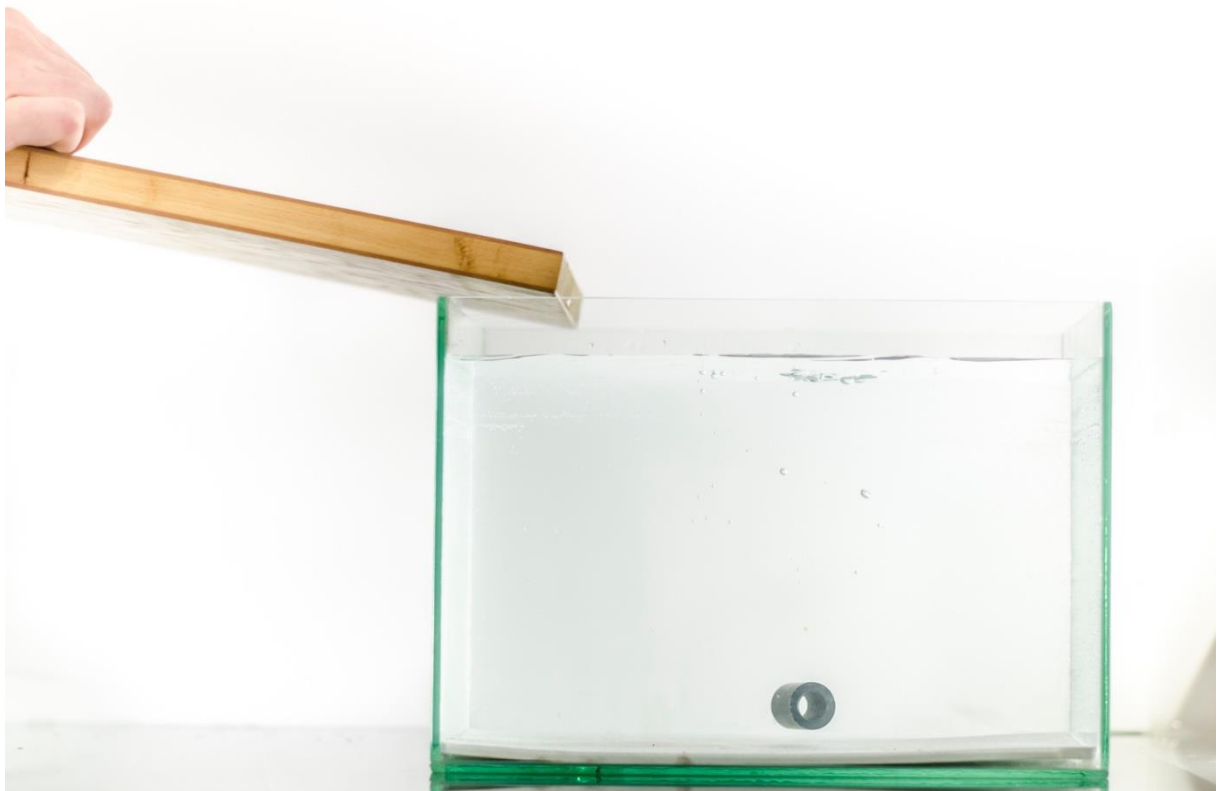


Abbildung 124: Zylinder legt gekrümmten Weg im Wasser zurück

Material

1 rechteckiges Glasgefäß

feines Aluminiumpulver

unterschiedliche Körper-
formen an Metallstab
(Zylinder, Quader und
Stromlinienform)

Spülmittel

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das rechteckige Glasgefäß wird ca. zu dreiviertel mit Wasser befüllt. Dieses wird mit feinem Aluminiumpulver und Spülmittel vermengt. Das Aluminiumpulver muss gut aufgelöst sein und es dürfen keine Strömungen sichtbar sein (Abbildung 125). Die unterschiedlichen Körperformen werden der Reihe nach in das Becken getaucht und mit Gefühl langsam von einer Seite zur anderen gezogen. Dabei entstehen je nach Form unterschiedliche Wirbel. Man kann beobachten, dass beim Zylinder (Abbildung 126) etwas weniger aufgewirbelt wird, als beim Quader (Abbildung 127). Am wenigsten wird durch die Stromlinienform aufgewirbelt, wenn sie mit der breiten Seite nach vorne durch das Becken gezogen wird (Abbildung 128). Zieht man sie jedoch anders-

herum durch die Flüssigkeit, so sorgt diese wiederum für mehr Unruhe im Becken (Abbildung 129).

Physikalische Erklärung

Wie bereits in Kapitel 3.1.5 erwähnt, gehen laminare Strömungen ab der sogenannten kritischen Geschwindigkeit in eine turbulente Strömung über. Fließt eine Flüssigkeit an einem Körper vorbei, so entsteht seitlich ein niedriger statischer Druck, während dieser auf der Rückseite vergleichsweise hoch ist. Ist die Strömungsgeschwindigkeit hoch genug, so kommt die Flüssigkeit, aufgrund von Reibungskräften, nicht mehr gegen den Druckunterschied an und es entstehen Wirbel an der Rückseite des Körpers (Dobrinski et al., 2006, S. 152). Diese Wirbelzone wird als Totwassergebiet bezeichnet. Wie schon in Kapitel 3.1.5 erklärt, hängt die Widerstandskraft vom c_w -Wert ab. Der c_w -Wert ist von der Stirnfläche des Körpers abhängig, aber auch von dessen Körperform. Betrachtet man zwei Körper mit der gleichen Stirnfläche, so ist der Strömungswiderstand umso geringer, umso mehr Wirbel unterdrückt werden. Dies kann dadurch erreicht werden, indem das Totwassergebiet vom Körper selbst ausgefüllt wird. Deshalb ist der Widerstandsbeiwert bei einem Stromlinienkörper besonders gering (Niedrig & Sternberg, 2014, S. 109). Während die Stromlinien beim Stromlinienkörper anliegen, verursacht die scharfe Kante eines Würfels einen Strömungsabriss, wodurch eine turbulente Strömung verursacht wird (Pütz & Serné, 2017, S. 201).

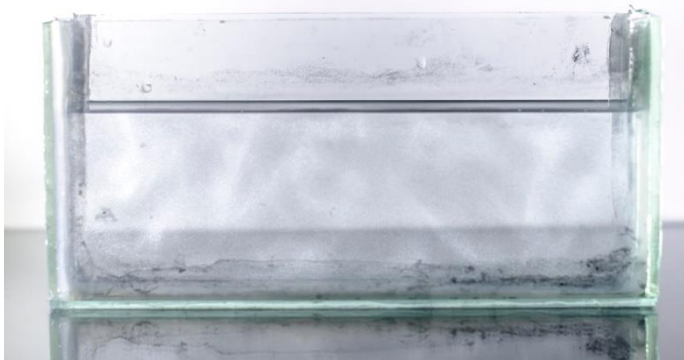


Abbildung 125: Aufgelöstes Aluminiumpulver in Wasser
Apparatur: TU-Graz

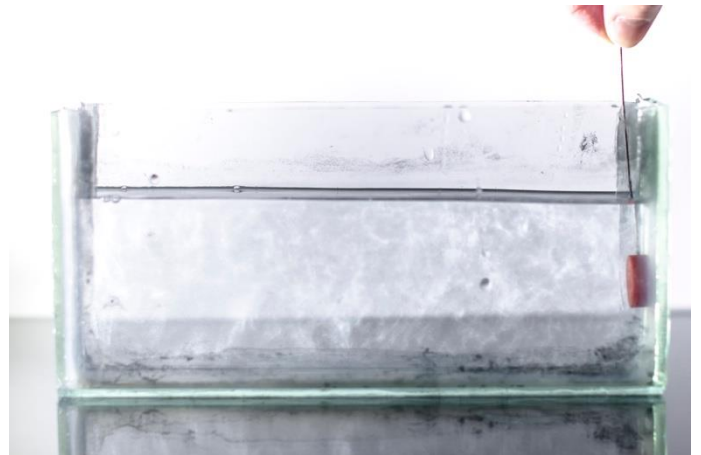


Abbildung 126: Strömungslinien eines Zylinders
Apparatur: TU-Graz

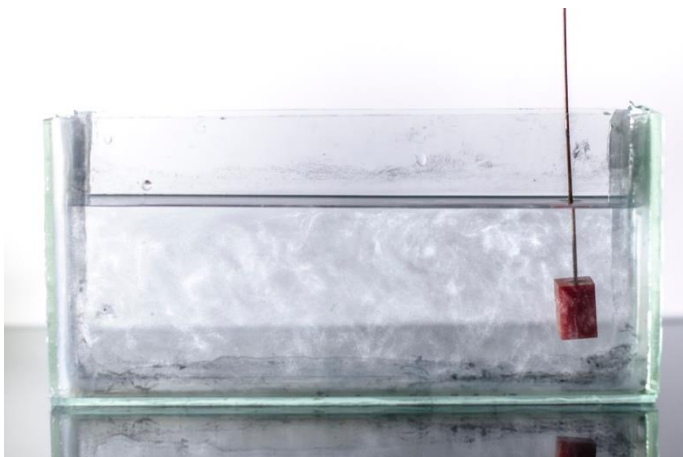


Abbildung 127: Strömungslinien eines Quaders
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 128: Strömungslinien einer Stromlinienform – breite Seite nach vorne gerichtet
Apparatur: TU-Graz

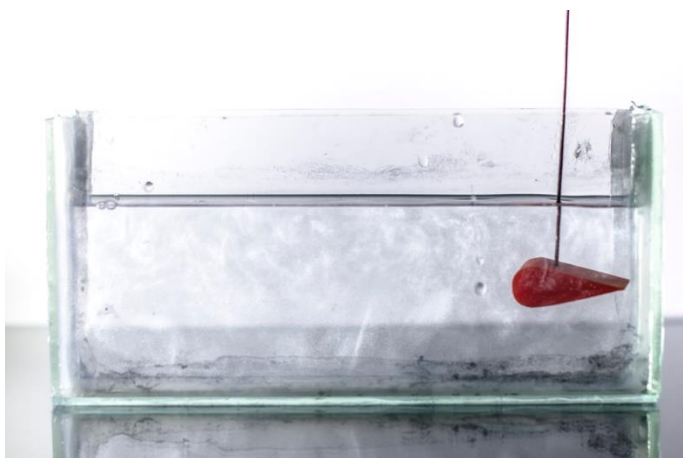


Abbildung 129: Strömungslinien einer Stromlinienform – schmale Seite nach vorne gerichtet
Apparatur: TU-Graz

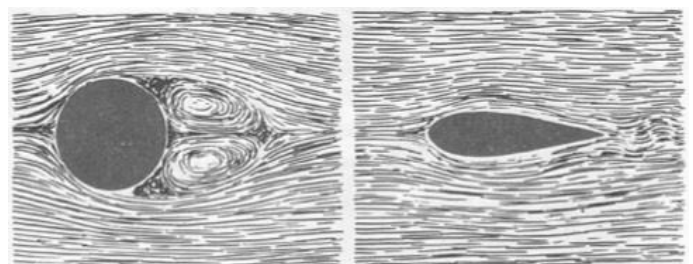


Abbildung 130: Vergleich der Wirbelbildung bei kugelförmigem zu stromlinienförmigem Körper

Quelle: http://www.zdrax.de/assets/pdf/Stroemungswiderstand_und_Wirbelbildung.pdf

Material

1 Glasflasche
Schutzhandschuhe
Schutzbrille
Auffangbehälter
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zur Demonstration zeigt man, dass bei einem Schlag auf die Flaschenöffnung einer leeren Flasche nichts passiert (Abbildung 131). Anschließend befüllt man die Flasche mit Wasser, lässt jedoch ein bis zwei Zentimeter Luft nach oben. Schlägt man nun erneut mit der flachen Hand auf die Flaschenöffnung, während man die Flasche mit der anderen Hand am Flaschenhals hält, so bricht der Flaschenboden weg und das Wasser strömt hinaus (Abbildung 132). Beim Schlag sollte darauf geachtet werden, dass er mit einer hohen Geschwindigkeit durchgeführt wird. Führt man dieses Experiment mit Mineralwasser durch, so zerbricht die Flasche nicht.



Anmerkung: Achtung! Bei diesem Versuch besteht Verletzungsgefahr. Unbedingt Handschuhe und Schutzbrille verwenden.

Physikalische Erklärung

Schlägt man mit der Hand auf die Flasche, so wird diese nach unten beschleunigt. Aufgrund der Trägheit möchte das Wasser seine Position beibehalten und folgt verzögert der Bewegung der Flasche. Dadurch erhält das Wasser eine so hohe Strömungsgeschwindigkeit, dass der statische Druck unter den Dampfdruck der Flüssigkeit fällt und sich Wasserdampfblasen bilden (Kapitel 3.1.5 und Kapitel 3.2.6). Wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Flasche und Wasser wieder geringer, so steigt der Druck und die entstandenen Blasen implodieren schlagartig. Durch das Zusammenbrechen des Hohlraums entsteht ein sehr hoher Druck. Dieser reicht aus, um den Flaschenboden abzuschlagen. Das Entstehen sowie anschließende Zusammenbrechen der Dampfblasen wird als Kavitation bezeichnet.

Bei Mineralwasser funktioniert das Experiment nicht, da die Kavitationsblasen mit CO_2 aufgefüllt werden und somit am Kollabieren gehindert werden (Meschede, 2010, S. 118; Daily, 2013, S. 1).



Abbildung 131: Schlag auf leere Glasflasche – nichts passiert



Abbildung 132: Schlag auf mit Wasser gefüllte Glasflasche – der Boden der Flasche wird abgeschlagen



Abbildung 133: Zerbrochene Flasche aufgrund von hohem Druck – es kommt zur Kavitation

3.1.6 Drehbewegungen und Scheinkräfte

Zentrifugal und Zentripetalkraft

Das erste Newtonsche Axiom, auch als Trägheitsprinzip bekannt, beschreibt, dass ein Körper entweder im Zustand der Ruhe verharrt oder sich gleichförmig und geradlinig fortbewegt, sofern keine Kräfte auf ihn wirken (Lüders & von Oppen, 2012, S. 60). Bewegt sich nun ein Körper auf einer Kreisbahn, so ändert dieser stets seine Richtung und benötigt dementsprechend eine Kraft, die den Körper auf die Kreisbahn zwingt. Diese Kraft weist in das Zentrum der Kreisbewegung und wird Zentripetalkraft F_{ZP} oder auch Radialkraft genannt. Entgegen der Zentripetalkraft, wirkt nach außen die Zentrifugalkraft F_{ZF} . Bei der Zentrifugalkraft, auch Fliehkraft genannt, handelt es sich um eine Trägheitskraft, welche betragsmäßig gleich groß ist wie die Zentripetalkraft. Somit gilt:

$$F_{ZF} = m \cdot r \cdot \omega^2 = -F_{ZP} \quad (87)$$

Dabei ist r der Radius der Kreisbahn, m die bewegte Masse und $\omega = \frac{v}{r}$ die Winkelgeschwindigkeit der Rotation, wobei v die Geschwindigkeit ist. Man betrachte nun die Kräfte eines an einer Schnur befestigten Steins, welcher durch diese in eine Rotationsbewegung versetzt wird. Der Stein befindet sich in Ruhe, da er sich in einem Kräftegleichgewicht befindet. Nach außen wirkt die Fliehkraft, während nach innen die Radialkraft wirkt. Die Zentripetalkraft ist als Spannung der Schnur spürbar. Man spürt an der Hand einen Zug nach außen, dennoch handelt es sich hierbei nicht um die Zentrifugalkraft, sondern um die Gegenkraft der Zentripetalkraft (Abbildung 134). Diese folgt dem dritten Newtonschen Axiom, welches besagt, dass es zu jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft gibt.

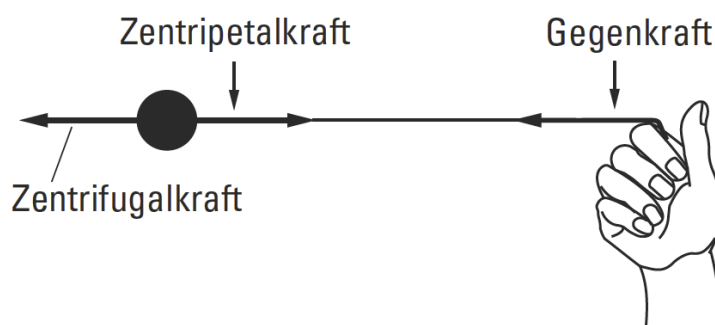


Abbildung 134: Kräfte bei einer Drehbewegung
Quelle: Lüders & von Oppen, 2012, S. 74

Reißt die Schnur, so bewegt sich der Stein in Richtung der Bahntangente fort. Da dann keine Zentripetalkraft wirkt, ist die stattfindende Bewegung geradlinig (Lüders & von Oppen, 2012, S. 73-74).

Scheinkräfte

Scheinkräfte oder auch Trägheitskräfte treten immer dann auf, wenn man einen physikalischen Vorgang in einem beschleunigten Bezugssystem betrachtet. Sitzt eine Person am Mittelpunkt einer rotierenden Scheibe und hält eine Schnur in der Hand, an dessen anderem Ende sich eine Kugel befindet, so beobachten die sitzende Person sowie ein außenstehender Beobachter eine Dehnung der Schnur. Der außenstehende Beobachter erkennt eine Kreisbewegung der Kugel, und führt die Dehnung auf die Zentripetalkraft zurück, welche die Kugel auf ihre Kreisbahn zwingt. Im Gegensatz dazu, erkennt die auf der Drehscheibe sitzende Person keine Bewegung der Kugel. Diese ist in Ruhe und es wirkt auf die Kugel insgesamt keine Kraft. Die Spannung der Schnur muss somit durch eine nach außen gerichtete Kraft kompensiert werden, der Zentrifugalkraft. Da die Zentrifugalkraft nur für den mitrotierenden Beobachter in Erscheinung tritt, ist diese eine Scheinkraft. Im Inertialsystem tritt im Gegensatz nur die Zentripetalkraft in Erscheinung (Stuart & Klages, 2010, S. 22).

Material

1 Kübel

Wasser

**Variante 2**

1 Wasserglas (mittel)

1 Zentrifugal-
schaukel

Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Der Kübel wird mit Wasser bis knapp unter den Rand befüllt. Anschließend hält man diesen am Henkel fest und lässt ihn mit ausgestrecktem Arm, seitlich des Körpers, vertikal rotieren (Abbildung 135). Dabei läuft kein Wasser aus.

Bei der zweiten Variante des Experiments wird das Trinkglas mit Wasser befüllt und auf die rutschfeste Fläche der Zentrifugalschaukel gestellt. Man fährt mit dem Finger durch die dafür vorgesehene Schlaufe und lässt das Ganze mit schnellen Bewegungen um diesen rotieren. Das Wasser wird weder ausgeschüttet noch fällt das Glas aus der Schaukel (Abbildung 136).

Physikalische Erklärung

Als außenstehender Betrachter erkennt man, dass sich der mit Wasser befüllte Eimer auf einer Kreisbahn bewegt. Dabei entsprechen die Armlänge mit dazu addierter Eimerhöhe, inklusive Griff, dem Radius. Um den Eimer bzw. das darin befindliche Wasser auf der Kreisbahn zu halten ist die Zentripetalkraft notwendig, welche zum Rotationsmittelpunkt wirkt. Gleichzeitig erfahren das Wasser und der Eimer die gleich große Zentrifugalkraft, welche insbesondere das Wasser in den Eimer drückt. Befindet sich der befüllte Eimer nun an der höchsten Position (Abbildung 135), so wirkt die Gewichtskraft ebenso zum Rotationszentrum. Somit muss die Zentripetalkraft F_{Zp} größer sein als die Gewichtskraft F_G des befüllten Eimers, damit kein Wasser austritt. Damit lässt sich die Mindestgeschwindigkeit berechnen, mit der man den Eimer drehen muss:

$$F_{Zp} \geq F_G \Leftrightarrow m \cdot a \geq m \cdot g \Leftrightarrow m \cdot \frac{v^2}{r} \geq m \cdot g \quad (88)$$

Dabei ist $\omega = \frac{v}{r}$. Kürzt man nun die Massen auf beiden Seiten und formt die Gleichung um, so erhält man für die Geschwindigkeit v :

$$v \geq \sqrt{r \cdot g} \quad (89)$$

Bei diesem Experiment ergibt sich ein Radius von $0,85 \text{ m}$, wodurch eine Geschwindigkeit von mehr als $2,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ benötigt wird. Dreht man den Eimer langsamer, so fließt das Wasser hinaus (Tipler & Mosca, 2008, S. 97). Ident verhält es sich beim Wasserglas in der Zentrifugalschaukel.



Abbildung 135: Wassereimer am Höchststand der Drehbewegung – kein Wasser tritt aus



Abbildung 136: Wasserglas auf Zentrifugalschaukel – kein Wasser tritt aus
Apparatur: TU-Graz

Material

1 Glasgefäß mit Achse
1 Zentrifugalapparat
Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Glasgefäß mit Achse wird etwa zu einem Drittel mit Wasser befüllt und anschließend im Futter des Zentrifugalapparats befestigt. Man dreht dann gleichmäßig und ruhig am Drehrad des Apparats, bis eine deutliche Parabel im Wasserglas sichtbar ist (Abbildung 138).

Anmerkung: Dreht man zu kräftig bzw. unregelmäßig, so erhält man eine unschöne Parabel.

Physikalische Erklärung

Betrachtet man ein Flüssigkeitselement an der Oberfläche des Wassers, so muss die resultierende Kraft senkrecht zur Oberfläche stehen, da ein Gleichgewicht herrscht. Würde die Resultierende tangential wirken, so würde es das Flüssigkeitsteilchen verschieben. Die resultierende Kraft F setzt sich aus der Gewichtskraft des Teilchens, sowie der darauf wirkenden Zentrifugalkraft zusammen (Abbildung 137):

$$F = m \cdot g + m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (90)$$

Betrachtet man das System in Zylinderkoordinaten so ergibt sich für die Steigung der Tangente beim Flüssigkeitselement, welche orthogonal zur Kraft F , mit der Steigung $k = \frac{-F_G}{F_{ZF}}$ steht:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{F_{ZF}}{F_G} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r}{m \cdot g} = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \quad (91)$$

Letztlich integriert man diese Differentialgleichung und erhält die Gleichung einer Parabel (Physikdepartment ETH Zürich, 2019, S. 1):

$$z(r) = z_0 + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot r^2 \quad (92)$$

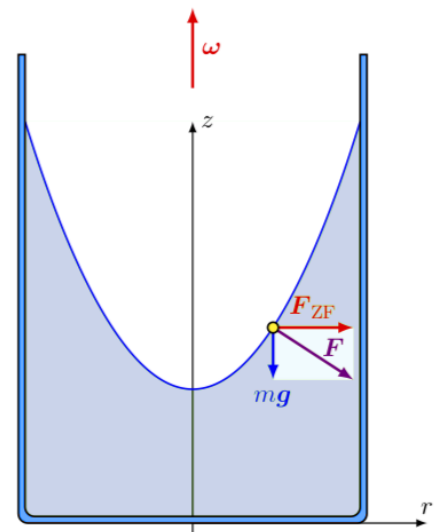


Abbildung 137: Resultierende Kraft auf ein Flüssigkeitselement.

Quelle: Physikdepartment ETH-Zürich, 2019, S. 1



Abbildung 138: Glasgefäß mit Achse auf Zentrifugalapparat – es kommt zur Parabelbildung
Apparatur: TU-Graz

Material

1 PET-Flasche
 3 Strohhalme mit Knick
 Flambierbrenner
 Kreuzschraubenzieher
 Stecknadel
 Schneidermaßband
 Heißklebepistole
 Gartenschnur
 Schere
 Wasser



Variante 2

Segnersches
 Wasserrad
 Nähfaden
 Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Schraubenzieher wird mit Hilfe des Flambierbrenners erhitzt. Dieser wird dazu verwendet, um ca. 5 cm über dem Flaschenboden drei Löcher in die PET-Flasche zu brennen. Diese drei Löcher liegen auf einer Ebene und sollten den gleichen Abstand zueinander haben. Dazu misst man mit dem Schneidermaßband den Umfang und drittelt diesen. Im Anschluss werden drei Strohhalme mit Knick zur Hand genommen und mit der Schere so unterhalb des Knicks gekürzt, dass diese Seite im Anschluss gleich lang ist, wie die Seite oberhalb des Knicks. Durch die eingebrannten Löcher in der Flasche werden die Strohhalme gesteckt und alle in dieselbe Richtung so fixiert, dass der untere Rand des Knicks bündig mit dem Loch schließt. Sind die Strohhalme richtig positioniert, werden sie mit Hilfe der Heißklebepistole fest fixiert. Zum Schluss wird noch mit Hilfe des heißen Schraubenziehers ein Loch in den Flaschenverschluss gebrannt, eine Gartenschnur durchgefädelt und mit einem Knoten auf der Innenseite befestigt. Mit einer heißen Stecknadel werden in den Deckel noch ein paar Luftlöcher hineingebrannt. Die Flasche wird mit Wasser befüllt und der Deckel wird wieder an der Flasche angebracht. Die Flasche

wird losgelassen und in ca. 1 m Entfernung nur von der Schnur gehalten. Das ganze System rotiert entgegen der Richtung (Abbildung 140), in welche die Strohhalme zeigen, solange bis der Wasserpegel knapp über den Strohhalmen liegt. Dann beginnt es sich in die andere Richtung zu drehen. Das Segnersche Wasserrad aus Glas wird mit drei gleich langen Nähfäden befestigt, welche am anderen Ende miteinander verknotet werden. Es dreht sich ebenso wie das selbstgemachte in die Richtung entgegen des Wasseraustritts, nur schneller (Abbildung 141). Auch dieses beginnt sich in die andere Richtung zu drehen, wenn der Wasserpegel knapp über den Austrittsstellen ist.

Physikalische Erklärung

Das Wasser fließt mit einer Geschwindigkeit v_1 in den Strohalm und hat somit einen Impuls $p_1 = m \cdot v_1$. Bei der Bewegung durch den Strohalm ändert das Wasser seine Richtung, jedoch nicht seine Geschwindigkeit. Somit tritt das Wasser mit dem Impuls p_2 aus dem Strohalm aus, welcher betragsmäßig gleich groß wie der Impuls p_1 ist. Durch die

Impulsänderung mit der Zeit übt der Strohhalm eine Kraft $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ auf das Wasser aus. Nach dem dritten Newtonschen Axiom gibt es eine vom Wasser ausgeübte Gegenkraft F_1 , die auf den Strohhalm wirkt. Die Kraft F_1 lässt sich in einen radialen Anteil F_{rad} , parallel zum Impuls p_1 , sowie einen tangentialen Anteil F_{tang} aufgliedern. Die radialen Anteile heben sich, während die tangentialen Kräfte ein Drehmoment erzeugen. Dieses Drehmoment verursacht die Rotation (Hilscher et al., 2010, S. 105). Ist der Faden so weit verdreht, dass die Kraft F_{tang} nicht mehr ausreicht um die Flasche weiter rotieren zu lassen, so beginnt sie sich zurückzudrehen.

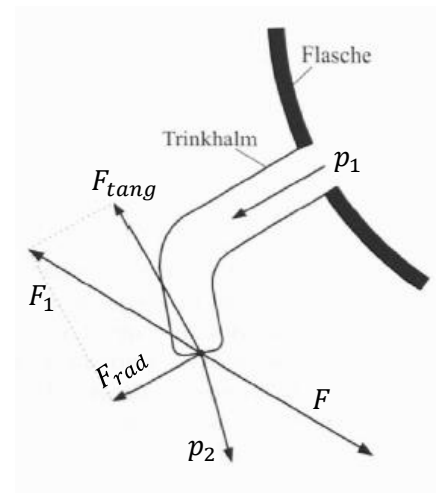


Abbildung 139: Kräfteverteilung beim Segnerschen Wasserrad

Quelle: Hilscher et al., 2010, S. 105



Abbildung 140: Segnersches Wasserrad – Selbstbau



Abbildung 141: Segnersches Wasserrad

Apparatur: TU-Graz

3.2 Versuche zur Wärmelehre

3.2.1 Anomalie des Wassers

99,9 % aller bekannter Verbindungen sind im festen Zustand am dichtesten. Eine Ausnahme dabei bildet Wasser, welches die größte Dichte bei 3,983°C hat. Sinkt oder steigt die Temperatur ausgehend von den knapp 4°C, so sinkt die Dichte (Abbildung 142, kleines Diagramm). Somit liegt die Anomalie des Wassers insbesondere im Bereich zwischen 0°C und 4°C.

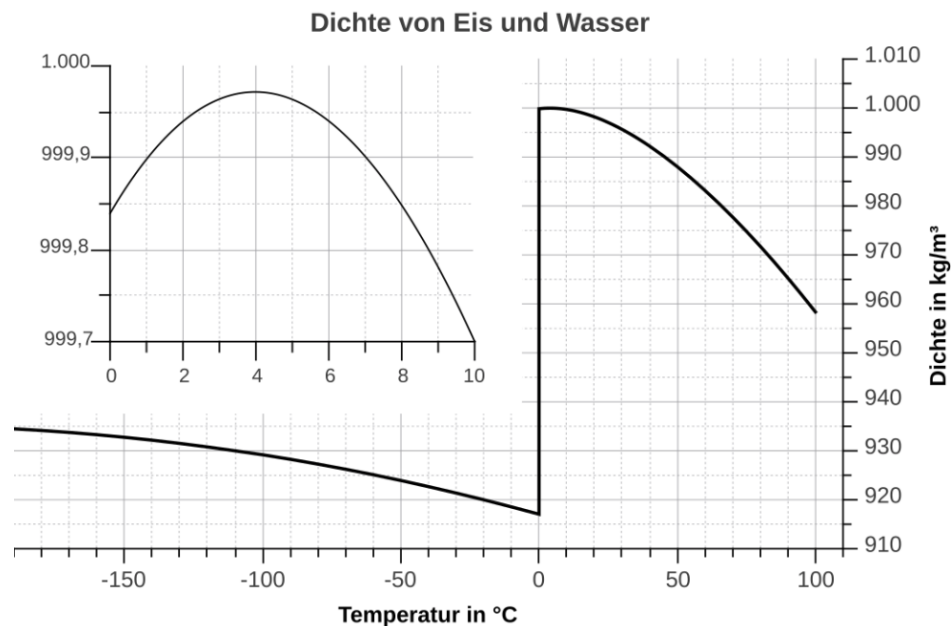


Abbildung 142: Die Anomalie des Wassers. Wasser hat bei Normaldruck die größte Dichte bei 3,983°C (kleines Diagramm). Die Dichte nimmt beim Übergang von flüssig zu fest sprunghaft ab (großes Diagramm)

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Dichteanomalie#/media/File:Density_of_ic

Bei Stoffen, deren Dichte beim Erwärmen abnimmt, sind die Moleküle im festen Zustand am geordnetsten. Durch das Erwärmen eines solchen Stoffes, gelangen die Moleküle in Bewegung und brauchen somit mehr Platz. Wasser besteht, wie die chemische Formel H_2O bereits verrät, aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Dabei hat je ein Wasserstoffatom ein Außenelektron, während das Sauerstoffatom sechs Valenzelektronen besitzt. Sowohl die Wasserstoffatome, als auch das Sauerstoffatom wollen ihre äußerste Schale mit Elektronen voll besetzt haben. Die Wasserstoffatome benötigen dafür zwei Elektronen, während das Sauerstoffatom acht Elektronen benötigt. Aus diesem Grund teilen sich der Sauerstoff und der Wasserstoff ihre Elektronen und gehen somit eine kovalente Bindung ein. Dabei bilden je ein Valenzelektron des Sauerstoffs mit dem Valenzelektron der Wasserstoffatome ein Elektronenpaar. Die vier übrig gebliebenen Valenzelektronen des Sauerstoffs bilden zwei weitere Elektronenpaare. Da Elektronen negativ geladen sind, streben diese einen möglichst großen Abstand zueinander an. Somit bilden die zwei Elektronenpaare sowie zwei Wasserstoffatome die Eckpunkte eines Tetraeders, in dessen Zentrum sich das

Sauerstoffatom befindet. Der Winkel zwischen zwei solcher Eckpunkte beträgt $104,5^\circ$. Bei der Bindung zwischen dem Sauerstoffatom und den Wasserstoffatomen befinden sich die Elektronen näher am Sauerstoff. Dies hat einen leicht negativ geladenen Sauerstoff und einen leicht positiv geladenen Wasserstoff zur Folge. Ein positiv geladener Wasserstoff wird nun von einem freien Elektronenpaar des Sauerstoffs angezogen und es entsteht eine Wasserstoffbrückenbindung (Kapitel 2.2.1). Im Gegensatz zu einer kovalenten Bindung ist solch eine Wasserstoffbrückenbindung jedoch deutlich flexibler.

Gefriert nun Wasser und wechselt in den festen Zustand, so bilden beide übriggebliebenen Elektronenpaare des Sauerstoffatoms eine Wasserstoffbrückenbindung mit einem Wasserstoffatom eines benachbarten Wassermoleküls. Das Besondere im festen Zustand ist, dass die Wasserstoffbrückenbindung gleich lang ist wie die kovalente Bindung. Somit ist jedes Sauerstoffatom von vier Wasserstoffatomen umgeben, in der Form eines Tetraeders (Abbildung 143). Da sich diese Bindungen im dreidimensionalen Raum stets wiederholen, entstehen dadurch hexagonale Strukturen, in deren Zentrum sich ein Hohlraum befindet (Abbildung 144). Schmilzt das Wasser, so werden die Wasserstoffbrückenbindungen flexibler und die Partnermoleküle werden ständig gewechselt. Weiters können sich die einzelnen Wassermoleküle zueinander nähern. Dabei werden die Hohlräume gefüllt, wodurch eine höhere Dichte entsteht. Bei den knapp vier Grad angekommen, nimmt die Bewegung sowie die Geschwindigkeit der Moleküle zu und es wird mehr Platz benötigt, wie bei den restlichen 99,9 % aller bekannten Verbindungen (Hüttermann, 2011, S. 13 & 22 ff.).

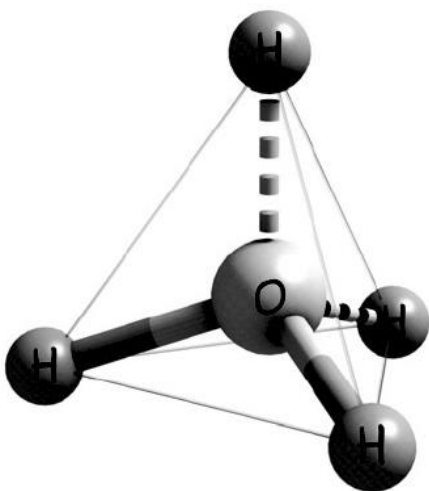


Abbildung 143: Das Sauerstoffatom ist von vier Wasserstoffatomen umgeben. Bei den durchgängig gezeichneten Bindungen handelt es sich um kovalente Bindung. Die strichliert eingezeichneten Bindungen sind die Wasserstoffbrückenbindungen

Quelle: Hüttermann, 2011, S. 24

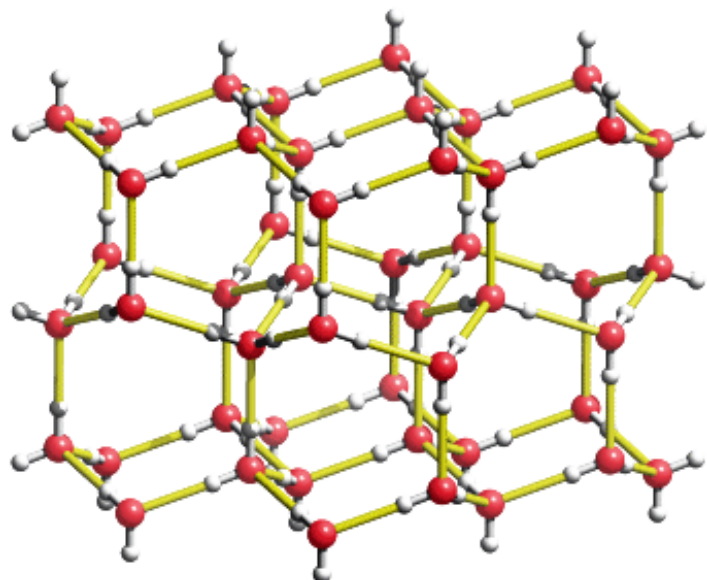


Abbildung 144: Hexagonale Anordnung der Wassermoleküle im festen Zustand. Dadurch entstehen Hohlräume, die beim Schmelzen befüllt werden können

Quelle: https://www.cup.uni-muenchen.de/ac/kluefers/homepage/L_ac1.html

Material

1 Eiswürfelform
1 Kochtopf
2 Trinkgläser (klein)
2-3 Eiswürfel
6 Stabkerzen
Herdplatte
Gefrierschrank
Gabel
kaltes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experiments werden sechs Stabkerzen in kleinere Stücke gebrochen und in ein Trinkglas gelegt. Dieses wiederum wird in ein Wasserbad in einen Topf gestellt, welcher auf der Herdplatte erhitzt wird. Sobald ein wenig Wachs geschmolzen ist, wird dieses in eine Eiswürfelform gegossen. Diese sollte die gleiche Form wie jene für die Eiswürfel aufweisen. Die Form wird in den Gefrierschrank gelegt. Während die Wachswürfel er härten, schmilzt das restliche Wachs im Wasserbad. Sobald dies zur Gänze geschehen ist, werden die Dochtreste mit einer Gabel aus dem geschmolzenen Kerzenwachs herausgefischt. Das Glas Wachs wird aus dem Wasserbad gehoben (Achtung: Heiß!) und neben einem identen Glas mit kaltem Wasser gestellt. Nun legt man in das Wasserglas ein paar Eiswürfel und in das Glas mit Kerzenwachs die zuvor

erstellten Wachswürfel. Man sieht, dass die Eiswürfel schwimmen, die Wachswürfel jedoch untergehen (Abbildung 145).

Anmerkung: Gläser sowie die Wachs- und Eiswürfelformen müssen nicht ident sein, jedoch wird das Phänomen dadurch besser dargestellt.



Anmerkung: Achtung! Bei diesem Experiment herrscht Verbrennungsgefahr!

Physikalische Erklärung

Die Dichte der meisten Stoffe ist im festen Zustand höher als im flüssigen Zustand. Dies gilt auch für Kerzenwachs, wodurch die festen Wachswürfel, nach dem archimedischen Prinzip, im flüssigen Wachs untergehen (Kapitel 3.1.3). Die Wassermoleküle haben die Form eines Tetraeders. Dabei befindet sich der Sauerstoff im Zentrum. An zwei Ecken befinden sich die Wasserstoffatome und in den beiden anderen Ecken jeweils ein Elektronenpaar. Aufgrund von Wasserstoffbrückenbindungen ordnen sich die Wassermoleküle im festen Zustand hexagonal an, wodurch Eis eine geringere Dichte als Wasser hat (Kapitel 3.2.1). Dadurch schwimmt Eis an der Wasseroberfläche, wobei sich in etwa 91,7 % des Eises unter Wasser befinden (Exp. [25]).



Abbildung 145: Festes Wachs sinkt in flüssigem Wachs während Eiswürfel im Wasserglas schwimmen

Material

1 Kaltwasserschwimmer
1 Thermometer
1 Messzylinder
Eis
Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Messzylinder wird mit ca. 15°C kaltem Wasser befüllt. In diesen legt man vorsichtig den Kaltwasserschwimmer, welcher langsam bis zum Boden hinab sinkt (Abbildung 147). Nun gibt man etwas Eis in den Zylinder um das Wasser weiter abzukühlen. Dazu rührt man den Inhalt des Messzylinders gegebenenfalls um. Anhand des Thermometers erkennt man, dass die Temperatur sinkt. Ab einer für den Kaltwasserschwimmer bestimmten Temperatur fängt er an zu steigen (Abbildung 148). Durch weitere Abkühlung steigt der Schwimmer immer weiter nach oben, bis er letztendlich am Eis ankommt, welches ihn am weiteren Aufsteigen hindert.

Physikalische Erklärung

Der Kaltwasserschwimmer ist so konstruiert, dass er bei 4°C schwimmt. Dies entspricht der Temperatur, bei der Wasser die höchste Dichte hat. Durch das Eis wird das Wasser an der Oberfläche abgekühlt. Beträgt dessen Temperatur 4°C , so sinkt es aufgrund der hohen Dichte zu Boden (Kapitel 3.1.3). Dies geschieht so lange, bis die Kaltwasserschicht mit 4°C am Boden immer höher und höher wird, wodurch der Kaltwasserschwimmer nach oben gedrückt wird und schwimmt. Oberhalb der 4°C kalten Schicht befindet sich Wasser mit niedriger Dichte, wodurch der Kaltwasserschwimmer weiter nach oben treiben kann.

In der Natur ist die Anomalie des Wassers sehr wichtig. Da Wasser bei 4°C die höchste Dichte hat, sinkt dieses beim Abkühlen in den Wintermonaten zu Boden, wodurch das Wasser mit steigender Höhe an Temperatur abnimmt, bis es an der Oberfläche, der obersten Schicht, 0°C hat und gefriert (Abbildung 146). Aufgrund der geringen Dichte des Eises schwimmt dieses an der Oberfläche. Somit gefrieren tiefere Gewässer nicht bis zum Boden, wodurch Flora und Fauna geschützt werden (Hüttermann, 2011, S. 21).

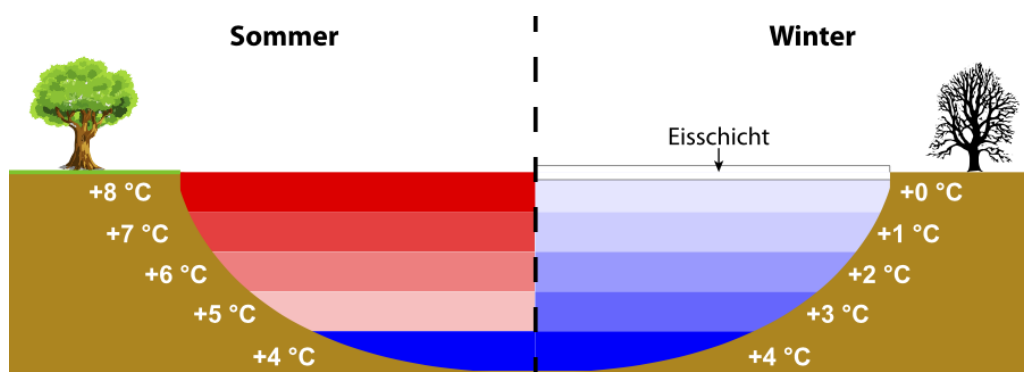


Abbildung 146: Temperaturschichten von Wasser, bei welchen sich das 4°C kalte Wasser stets an der tiefsten Stelle befindet

Quelle: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/ausdehnung-bei-erwaermung/anomalie-des-wasser>

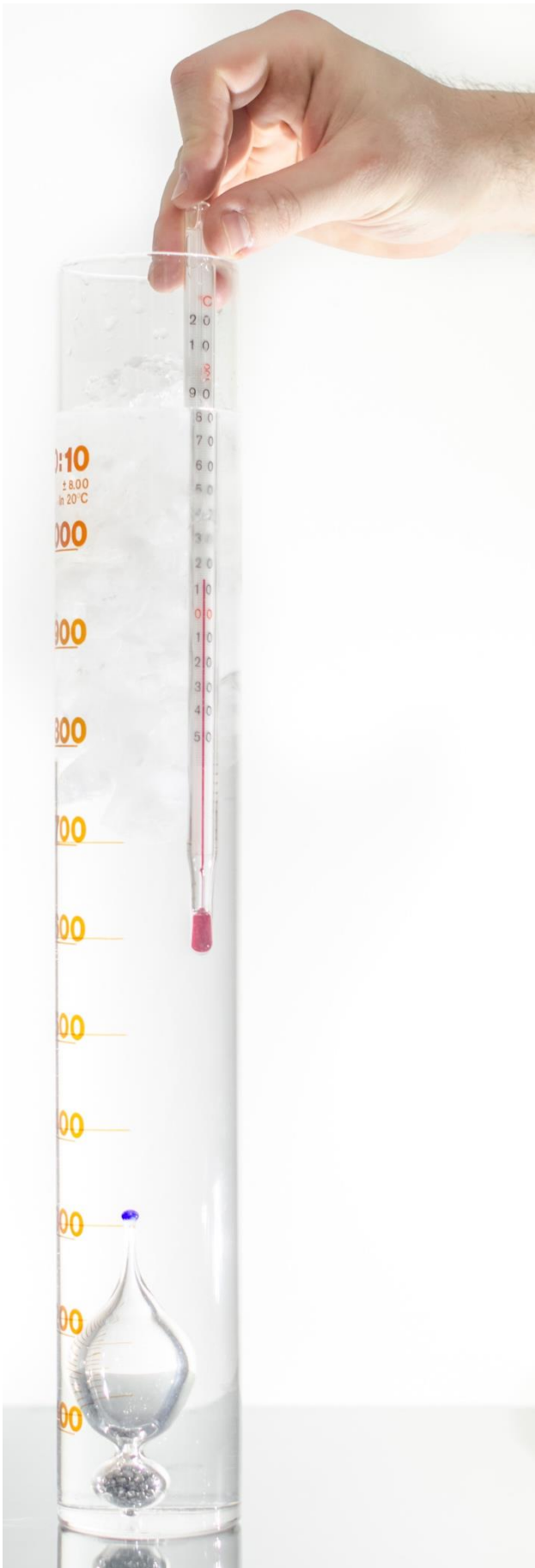


Abbildung 147: Bei einer Wassertemperatur von 15°C sinkt der Kaltwasserschwimmer nach unten

Apparatur: TU-Graz

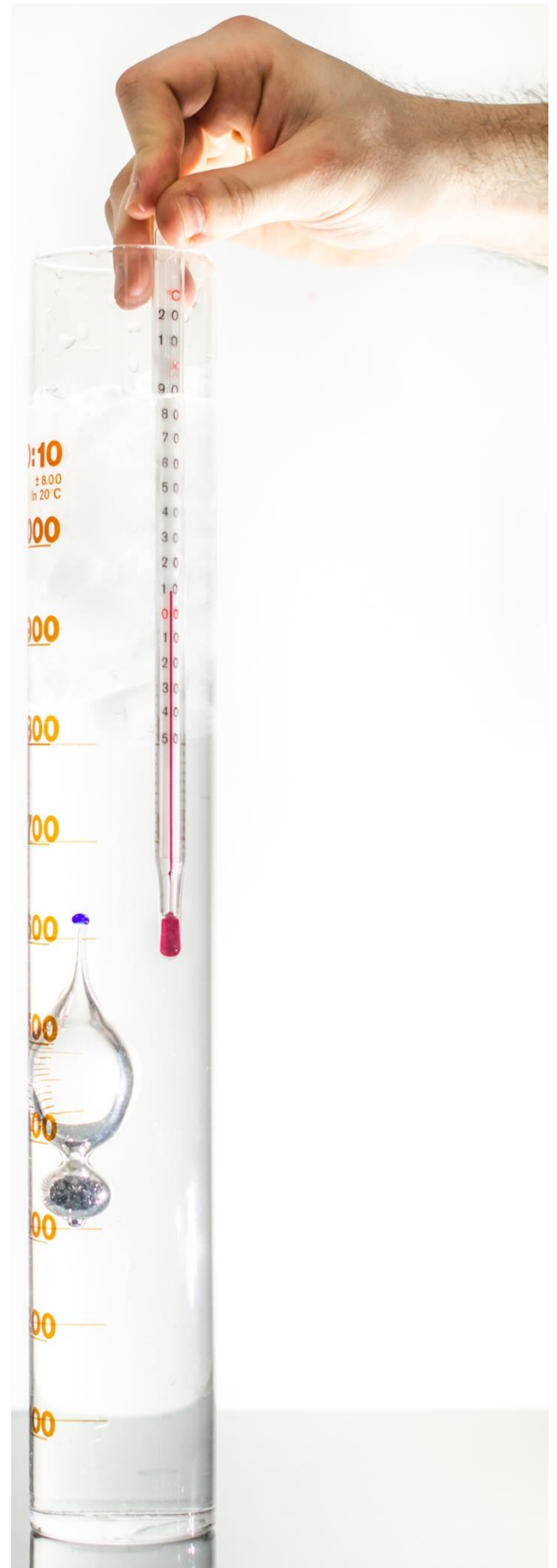


Abbildung 148: Sinkt die Temperatur weiter, so steigt der Kaltwasserschwimmer wieder nach oben

Apparatur: TU-Graz

Material

1 Erlenmeyerkolben

1 Stopfen

1 Glasröhrchen

1 Skala

1 Becherglas (mittel)

Thermometer

Kaltes Wasser

Eis

Warmes Wasser

Tinte



Versuchsdurchführung und Beobachtung

In den Erlenmeyerkolben wird Tinte hineingetropft, mit Wasser vermengt und aufgefüllt, sodass er vollgefüllt ist. Durch den Stopfen wird das Glasröhrchen gesteckt und diese Konstruktion wird anschließend auf den Kolben gesetzt. Im Glasröhrchen sollte oberhalb des Stopfens eingefärbtes Wasser sichtbar sein. Auf dem Glasröhrchen wird noch eine Skala angebracht. Den Kolben stellt man nun in ein Becherglas, gefüllt mit einem Gemisch aus Wasser und Eis. Wurde das eingefärbte Wasser im Kolben auf eine Temperatur von ca. 2°C heruntergekühlt (Abbildung 149), so beobachtet man ab sofort den Stand des Wasserpegels im Glasröhrchen anhand der zuvor angebrachten Skala. Stellt man anschließend den Erlenmeyerkolben in ein Becherglas gefüllt mit warmem Wasser, so kann man beobachten, dass der Pegel im Glasröhrchen zuerst sinkt (Abbildung 150) und danach fortführend steigt (Abbildung 151).

Physikalische Erklärung

Wasser dehnt sich ab einer Temperatur von ca. 4°C aus. Dies stellt soweit keine Besonderheit dar. Das Besondere ist jedoch, dass sich das Wasser beim Erwärmen zwischen 0°C und 4°C zusammenzieht. Der Ursprung dabei liegt in der Struktur der Wassermoleküle. Diese bilden im festen Zustand eine hexagonale Struktur mit Hohlräumen (Kapitel 3.2.1). Die Struktur wird insbesondere durch die Wasserstoffbrückenbindungen verursacht, die im festen Zustand gleich lange sind wie die kovalente Bindung zwischen den Wasserstoffmolekülen und dem Sauerstoffmolekül. Beim Erwärmen nähern sich die Wassermoleküle untereinander an und die Hohlräume können gefüllt werden. Bei 4°C wird somit die größte Dichte erreicht. Bei weiterer Erwärmung geraten die Wassermoleküle zunehmend in schnellere Bewegungen wodurch wieder mehr Volumen benötigt wird und sich das Wasser ausdehnt.

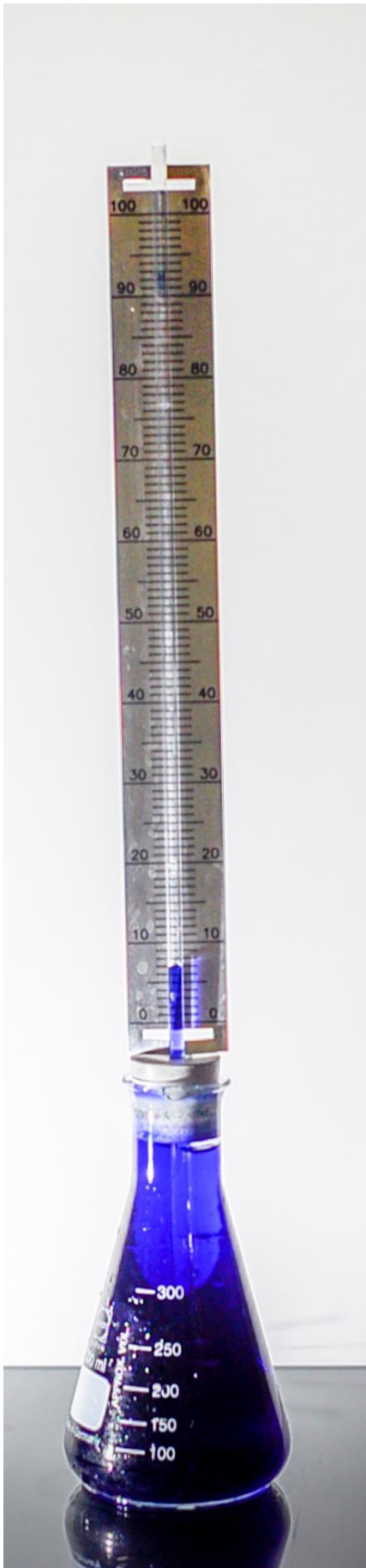


Abbildung 149: Wasserstand bei einer Wassertemperatur von 2°C

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 150: Wasserstand sinkt durch Erwärmen des Wassers – geringere Dichte

Apparatur: TU-Graz

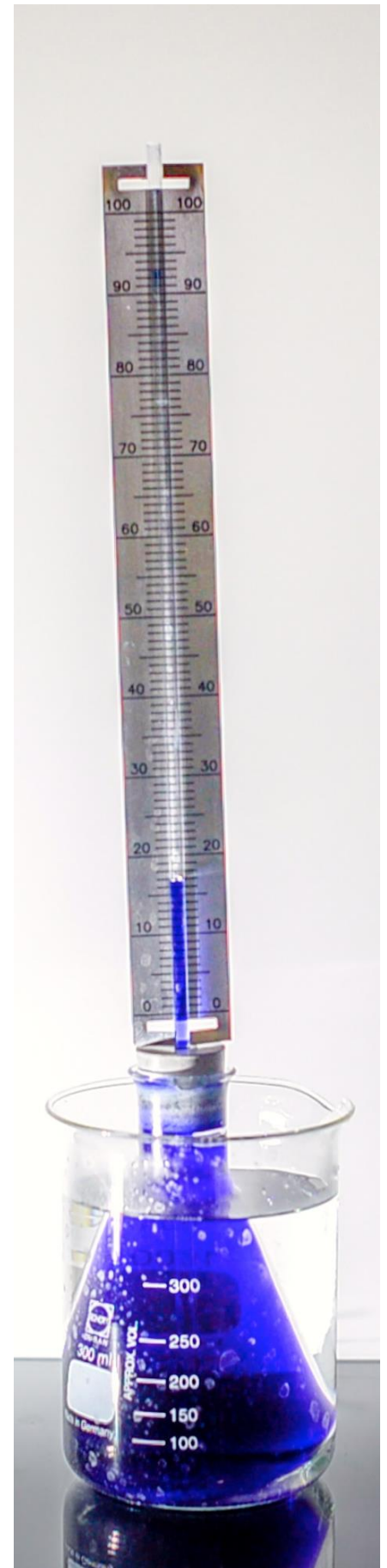


Abbildung 151: Wasserstand steigt im warmen Wasser nach einiger Zeit wieder an – größere Dichte

Apparatur: TU-Graz

Material	Versuchsdurchführung und Beobachtung
1 verschließbare Gusseisenhohlkugel Kältemischung Wasser	Die Gusseisenhohlkugel wird mit Wasser vollgefüllt. Anschließend wird diese mit dem Schraubverschluss verschlossen und durch die Öse im Verschluss so aufgehängt (z. B. an einem Stativ), dass diese ein paar Zentimeter über der Arbeitsfläche hängt. Eine Kältemischung wird vorbereitet (Exp. [63]). Diese wird so unter die hängende Gusseisenhohlkugel gestellt, dass die Kugel zur Gänze von der Kältemischung ummantelt ist und von dieser gekühlt wird. Nach einiger Zeit sieht man durch Bewegungen in der Kältemischung, dass es die Kugel gesprengt hat (siehe Vorher- und Nachher-Zustand der Eisenkugel in Abbildung 152).
Variante 2 1 Glasflasche mit Drehverschluss Gefrierschrank Wasser	

Bei der zweiten Variante wird eine Glasflasche komplett voll mit Wasser befüllt und mit dem Drehverschluss geschlossen. Die Flasche kommt so für mehrere Stunden in den Gefrierschrank. Nachdem das Wasser komplett gefroren ist, ist die Flasche zersprungen (Abbildung 154).

Anmerkung: In Abbildung 153 sieht man ein Alltagsproblem, welches durch die Ausdehnung von Eis entstanden ist. Es handelt sich hierbei um ein Stück einer Wasserleitung, die im Winter zufror und aufgebrochen ist.

Anmerkung: Das Experiment mit der Gusseisenkugel wurde nicht eigenständig durchgeführt. Die Eisenkugel wurde jedoch auf diese Weise zerstört.

Physikalische Erklärung

Es gibt zwei Anomalien des Wassers. Die bisher beschriebene Anomalie des Wassers ist jene, dass die größte Dichte von Wasser bei 4°C liegt. Die zweite Anomalie des Wassers beschreibt die sprunghafte Zunahme des Volumens beim Gefrieren (Abbildung 142, großes Diagramm). Diese Volumenzunahme entspricht in etwa 10 % (Emminger, 2005, S. 422). Befüllt man nun einen Behälter zur Gänze mit Wasser und verschließt diesen, so kann sich das Eis nicht ausdehnen und es entsteht ein Druck. Theoretisch wird bei -22°C der Maximaldruck von ca. $20\,000 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$ erreicht (Louis & Fischer, 1979, S. 114). Hält die Flasche dem entstehenden Druck nicht stand, so bricht sie.

Anmerkung: Die Entstehung von Schlaglöchern beruht auf demselben Prinzip. Dabei dringt Wasser aufgrund von Rissen in der Asphaltdecke bis in die Schotterschicht ein. Gefriert das Wasser im Anschluss, so dehnt es sich aus. Dadurch werden die Schotterschicht sowie der Asphalt so demoliert, dass der Boden nach dem Schmelzvorgang beim Befahren nachgibt.



Abbildung 152: Gusseisenhohlkugel – Zerbrochene Kugel durch Kältemischung

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 153: Durch gefrorenes Wasser geplatzte Wasserleitung

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 154: Zersprungene Flasche durch Einfrieren von Wasser im Tiefkühlschrank

3.2.2 Wärmeübertragung

Wärmeenergie kann auf drei Arten transportiert werden. Diese sind die Wärmeleitung, die Konvektion sowie die Wärmestrahlung. Dabei erfolgt der Transport stets von einem Ort höherer Temperatur zu einem Ort niedriger Temperatur (Meschede, 2010, S. 270).

Wärmeleitung

Die Wärmeleitung findet nur in Materie statt, jedoch wird dabei keine Materie transportiert, sondern lediglich Wärmeenergie. Dies geschieht, wie bereits erwähnt, stets bei einem Temperaturunterschied. Umso größer der Unterschied ist, umso stärker ist der Wärmestrom. Die Energieübertragung erfolgt aufgrund von Atom- bzw. Molekülstößen. Befindet sich beispielsweise ein nicht metallischer Stab mit dem einem Ende in siedendem Wasser und mit der anderen Seite in Eiswasser, so schwingen die Moleküle am heißen Ende mit größerer Energie und übertragen diese an ihre Nachbarn (Stuart & Klages, 2010, S.117). Nach einiger Zeit hat jeder Punkt im Stab eine gewisse Temperatur angenommen und es stellt sich ein stationärer Zustand ein. Dabei lässt sich die transportierte Wärmemenge Q berechnen durch:

$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot t \cdot \Delta T}{l} \quad (93)$$

Die transportierte Wärmemenge Q ist dabei abhängig von der Querschnittsfläche A sowie der Länge l des Leiters. Weiters spielen der Temperaturunterschied ΔT zwischen dem kalten und warmen Wasser, sowie die Dauer t der Wärmeleitung eine Rolle. Einen weiteren wesentlichen Einfluss hat die Wärmeleitfähigkeit λ des Stoffes. Flüssigkeiten und Gase leiten Wärme schlechter, da ihre Moleküle einen größeren Abstand zueinander haben und die Energie somit seltener zu Stößen kommt. Der Leidenfrost-Effekt basiert auf der schlechten Wärmeleitung von Gasen. Viele Metalle wiederum sind besonders gute Wärmeleiter, da die Wärmeleitung durch die Leitungselektronen erfolgt. Aluminium hat somit eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit mit $\lambda = 220 \frac{W}{m \cdot K}$. Im Vergleich dazu hat Wasser eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,598 \frac{W}{m \cdot K}$ (Kuchling, 2011, S. 322; Stuart & Klages, 2010, S.117-119).

Konvektion

Bei der Konvektion wird Wärmeenergie durch den Transport von Materie befördert und ist somit von Strömungen abhängig. Aus diesem Grund ist Konvektion in Festkörpern nicht möglich. Man unterscheidet zwischen erzwungener Konvektion, welche zum Beispiel durch Pumpen oder Gebläse verursacht wird und der freien Konvektion, welche dem Archimedischen Prinzip unterliegt. Aufgrund von Temperaturänderungen bei Fluiden ändert sich auch deren Dichte. So hat beispielsweise warme Luft eine geringere Dichte als kalte und steigt nach oben (Kuchling, 2011, S. 321).

Wärmestrahlung

Bei der Wärmestrahlung wird Wärmeenergie durch elektromagnetische Strahlung transportiert. Dabei bewegt sich die elektromagnetische Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit fort. Die Strahlung kann sich auch im leeren Raum fortbewegen. Ein Beispiel für solch eine elektromagnetische Strahlung ist das sichtbare Licht. Elektromagnetische Strahlung wird von jedem Körper absorbiert aber auch emittiert und bei lichtdurchlässigem Körper auch transmittiert. In welchem Ausmaß Reflexion, Absorption und Transmission auftreten, hängt vom jeweiligen Material des Körpers sowie wie von der auftreffenden Strahlung ab. Dabei gilt für den Reflexionsgrad ρ :

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \quad (94)$$

Dabei beschreibt Φ_0 die Strahlungsleistung bzw. den Strahlungsfluss der auftreffenden Strahlung. Φ_r beschreibt den Strahlungsfluss der reflektierten Strahlung, Φ_a den Strahlungsfluss der absorbierten Strahlung und Φ_t , den Strahlungsfluss der transmittierten Strahlung. Weiters ist der Absorptionsgrad α definiert durch:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \quad (95)$$

Letztlich ist der Transmissionsgrad τ definiert als:

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_0} \quad (96)$$

Aufgrund des Energieerhaltungssatzes, wonach Energie nicht verloren gehen kann, gilt:

$$\Phi_r + \Phi_a + \Phi_t = \Phi_0 \quad (97)$$

Kürzt man nun auf beiden Seiten durch Φ_0 so ergibt sich:

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_0} + \frac{\Phi_a}{\Phi_0} + \frac{\Phi_t}{\Phi_0} = \frac{\Phi_0}{\Phi_0} \Leftrightarrow \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (98)$$

Jeder Körper mit einer Temperatur von über 0 K emittiert eine Strahlung. Die Leistung P dieser Strahlung hängt von der vierten Potenz der Temperatur T_1 ab und wird mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben:

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_1^4 \quad (99)$$

Dabei beschreibt A die Oberfläche des Körpers. Weiters handelt es sich bei σ um die Stefan-Boltzmann-Konstante, welche den Wert $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ besitzt. Bei ε handelt es sich um den Emissionsgrad der Oberfläche des Körpers. Er nimmt Werte zwischen 0 und 1 an und hängt von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Da der Körper zeitgleich zur Emission auch Strahlung von der Umgebung mit der Temperatur T_2 mit der Leistung $P = \sigma \cdot \alpha \cdot A \cdot T_2^4$ absorbiert, ergibt sich für die Gesamtleistung der Emission:

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_1^4 - \sigma \cdot \alpha \cdot A \cdot T_2^4 \quad (100)$$

α beschreibt den Absorptionsgrad und kann gleich wie der Emissionsgrad Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Dabei beinhaltet die Leistung das gesamte Spektrum der Strahlung. Für einzelne Wellenlängen benötigt man das Planck'sche Strahlungsgesetz (Formel (102)).

Der schwarze Körper

Bei einem schwarzen Körper handelt es sich um einen idealisierten Körper, welcher jegliche auftreffende Strahlung absorbiert, unabhängig von seiner Wellenlänge und Temperatur. Sein Absorptionsgrad ist dementsprechend $\alpha = 1$. Der schwarze Körper wird auch schwarzer Strahler genannt, da er bei gegebener Temperatur und Wellenlänge am stärksten strahlt. Somit ist für den schwarzen Körper der Emissionsgrad ε gleich dem Absorptionsgrad α . Dieser Sachverhalt wird als Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz bezeichnet und besagt für alle Körper, dass gute Strahler gute Absorber sind. Haben die absorbierenden sowie die emittierenden Flächen dieselbe Größe, so beträgt die Gesamtleistung der Emission:

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (101)$$

Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers ist von seiner Temperatur und seiner Wellenlänge abhängig. Dieser Sachverhalt wird mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz beschrieben:

$$dP_\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{A}{e^{h \cdot c_0 / (k \cdot \lambda \cdot T)} - 1} \cdot d\lambda \quad (102)$$

Dabei beschreibt dP_λ die Strahlung, welche im Bereich von λ bis $\lambda + d\lambda$ abgestrahlt wurde. Bei h handelt es sich um das Planck'sche Wirkungsquantum mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Weiters ist c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum mit $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Zudem ist λ die Wellenlänge und $d\lambda$ die Intervallbreite. k ist die Boltzmann-Konstante mit $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$. Bei T handelt es sich um die Temperatur des strahlenden Körpers und bei A um seine Fläche. e ist die Euler'sche Zahl mit $e = 2,718$.

Die Strahlungsleistung (Stefan-Boltzmann-Gesetz – Formel (99)) nimmt mit der Temperatur zu (Fläche unterhalb des Graphen – Abbildung 155) und das Maximum verschiebt sich zu den kürzeren Wellenlängen (strichlierte Kurve – Abbildung 155). Die maximale Wellenlänge $\lambda_{\max}$ lässt sich mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz beschreiben, welches der ersten Ableitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes entspricht und anschließend null gesetzt wird. Dabei ist die Wellenlänge $\lambda_{\max}$ reziprok proportional zur Temperatur T :

$$\lambda_{\max} = \frac{h \cdot c_0}{4,9651 \cdot k \cdot T} \quad (103)$$

Alle vorkommenden Konstanten werden zur sogenannten Wien'schen Konstante, zusammengefasst:

$$b = \frac{h \cdot c_0}{4,9651 \cdot k} \Leftrightarrow b = 2,89777 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (104)$$

Somit lautet das Wien'sche Verschiebungsgesetz (Kuchling, 2011, S. 328 ff.; Tipler & Mosca, 2008, S. 638 ff.):

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} \quad (105)$$

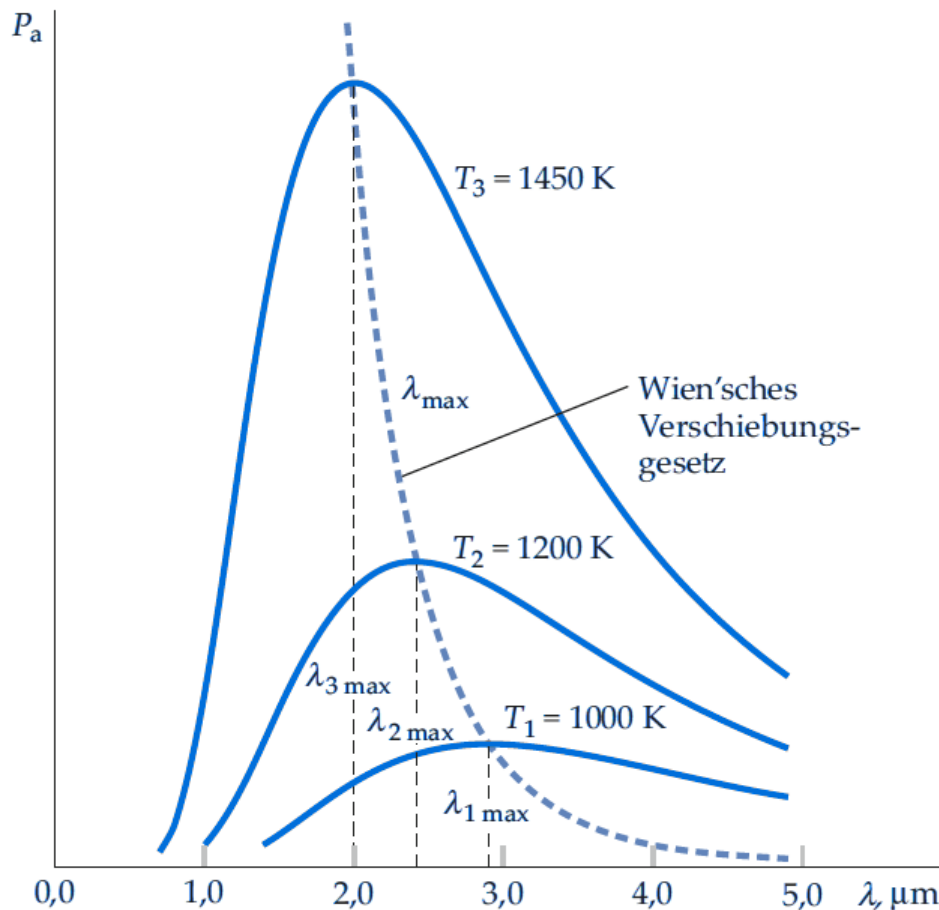


Abbildung 155: Fläche unterhalb der Kurve entspricht der Strahlungsleistung, welche mit steigender Temperatur zunimmt. Dabei verschiebt sich das Maximum zu den kürzeren Wellenlängen (strichliert eingezeichnet, nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz)

Quelle: Tipler & Mosca, 2008, S. 640

Die Strahlung der Sonne entspricht der eines schwarzen Körpers. Dabei liegt das Intensitätsmaximum im sichtbaren Bereich bei etwa 500 nm , also im grün-blauen Bereich. Mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes (Formel (105)) lässt sich nun die Oberflächentemperatur berechnen (Tipler & Mosca, 2008, S. 640):

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} \Leftrightarrow T = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{500 \cdot 10^{-6} \text{ mm}} \Leftrightarrow T = 5796 \text{ K} \quad (106)$$

Dennoch macht der sichtbare Teil des Sonnenspektrums nur einen Teil der Sonnenstrahlung aus. Die Strahlung der Sonne reicht vom Bereich der kurzwelligen Röntgenstrahlung mit $0,1 \text{ nm}$ Wellenlänge bis zur langwelligen Radiostrahlung mit bis zu 30 m Wellenlänge (Mattig, 1995, S. 51).

Material

1 Glasgefäß (klein)

1 Trinkglas (mittel)

1 Tintenpatrone

1 Grillzange

kaltes Wasser

lauwarmes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Trinkglas wird mit kaltem Leitungswasser befüllt. Man sollte dabei etwas Luft nach oben lassen, da es ansonsten bei der späteren Durchführung übergehen könnte. Anschließend fügt man dem deutlich kleineren Glasgefäß ein paar Tropfen Tinte hinzu und füllt es randvoll mit lauwarmem Wasser auf. Empfehlenswert ist, dass der Temperaturunterschied zwischen dem kalten, sowie dem lauwarmen Wasser nicht zu groß ist, da sich die Beobachtungszeit ansonsten rapide verkürzt. Zu guter Letzt stellt man das kleine, eingefärbte Gefäß mit ruhiger Hand und Zuhilfenahme einer Grillzange in das mit kaltem Wasser befüllte Trinkglas. Auch beim Herausnehmen der Grillzange

ist Vorsicht geboten, da das Wasser ansonsten in Unruhe versetzt wird. Das eingefärbte Wasser steigt nun aus dem kleinen Gefäß, bis zur Wasseroberfläche des Trinkglases nach oben, verweilt dort und sinkt schließlich wieder hinab (Abbildung 156).

Physikalische Erklärung

Wasser hat bei einer Temperatur von 4°C die größte Dichte. Mit steigender Temperatur ab diesem Wert nimmt die Dichte von Wasser ab. Das eingefärbte Wasser hat eine höhere Temperatur als das Wasser, welches das Fläschchen umgibt und somit eine geringere Dichte. Nach dem Archimedischen Prinzip (Kapitel 3.1.3) schwimmen Körper mit geringer Dichte nach oben. Dadurch entsteht eine Konvektionsströmung, bei welcher warmes Wasser nach oben strömt und zeitgleich kälteres nach unten. Nach einiger Zeit hat das an der Oberfläche angekommene, eingefärbte Wasser die gleiche Temperatur wie das umliegende Wasser an der Oberfläche und gelangt durch die Konvektionsströmung wieder nach unten.



Abbildung 156: Der Farbvulkan – Ausdehnung von warmem Wasser in umliegendes, kälteres

Material

2 Glasgefäße (klein)

2 verschiedenfarbige
Tintenpatronen

1 Stk. laminiertes Papier

kaltes Wasser

warmes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

In die zwei identen Glasgefäße wird jeweils eine andersfarbige Tinte geträufelt. Eines dieser Gefäße wird mit warmem Wasser, das andere mit kaltem Wasser aufgefüllt. Von Abbildung 157 bis Abbildung 160 handelt es sich bei dem orange eingefärbten um das warme und beim blau eingefärbten um das kalte Wasser. Für die erste Demonstration lässt man das kaltgefüllte Glasgefäß stehen. Das mit warmem Wasser gefüllte Glas wird mit Hilfe des laminierten Papiers um 180° gedreht und anschließend mitsamt dem Papier auf das andere Glas gestellt. Nun zieht man das Papier vorsichtig heraus und die beiden Gläser

sollten bündig, mit den Öffnungen zueinander dastehen. Die Farben vermischen sich nicht (Abbildung 157). Dreht man nun beide Gläser gemeinsam um 180°, so beginnen sich die Farben zu vermischen (Abbildung 158). Von Abbildung 158 bis Abbildung 160 erkennt man, dass das warme Wasser rechts nach oben strömt und das kalte links nach unten. Letztendlich vermischen sich die beiden Farben und es wird grünlich (Abbildung 160) (Kapitel 3.3.2).

Physikalische Erklärung

Das in diesem Experiment verwendete Wasser hatte eine Temperatur von über 4°C. Somit hat das kalte Wasser eine höhere Dichte als das warme Wasser (Kapitel 3.2.1). Schichtet man nun das warme über dem kalten Wasser, so vermischen sich die unterschiedlich eingefärbten Flüssigkeiten nicht, da das warme Wasser aufgrund der geringeren Dichte (Kapitel 3.1.3) ohnehin die obere Position einnehmen möchte. Vertauscht man nun die Positionen der Gläser, so steigt das warme und leichtere Wasser nach oben, während das kältere und schwerere nach unten sinkt.



Abbildung 157: Oranges, warmes Wasser oben; kaltes, blaues Wasser unten – es findet keine Vermischung der Flüssigkeiten statt



Abbildung 158: Oranges, warmes Wasser unten; kaltes, blaues Wasser oben – es kommt zur Vermischung der beiden Flüssigkeiten



Abbildung 159: Aufgrund der höheren Dichte von kaltem Wasser, fließt dieses nach unten während das warme nach oben steigt



Abbildung 160: Vermischung der beiden Flüssigkeiten nach einiger Zeit

Material

1 Konvektionsrohr

1 Tintenpatrone

1 Teelicht

Feuerzeug

Destilliertes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Konvektionsrohr wird mit destilliertem Wasser vollgefüllt. In die Öffnung werden ein paar Tropfen Tinte geträufelt. Anschließend wird das Konvektionsrohr mit einer der beiden unteren Abrundungen über das brennende Teelicht gehalten. In diesem Experiment wurde jeweils die linke untere Abrundung erhitzt (Abbildung 161). Die Tintentropfen bewegen sich in diesem Fall im Uhrzeigersinn. Hat das eingefärbte Wasser eine ganze Runde zurückgelegt, so erkennt man in der Öffnung des Rohres, wie das Wasser nach oben strebt und dann wieder absinkt

(Abbildung 162). Nach und nach verfärbt sich immer mehr Wasser im Konvektionsrohr, bis letztendlich das gesamte Wasser eine einheitliche Farbe erhält.

Anmerkung: Man kann in Abbildung 163 turbulente Strömungen in der Kurve und darüber beinahe laminare Strömungen erkennen (Exp. [32]). Zu Beginn des Videos erkennt man besonders bei der senkrechten Strömung nach unten, dass sich die Flüssigkeit im Zentrum des Rohrquerschnitts schneller fortbewegt.

Physikalische Erklärung

Das Wasser wird durch die Kerze erwärmt. Dadurch dehnt es sich aus und die Dichte nimmt ab, wodurch es nach dem Archimedischen Prinzip (Kapitel 3.1.3) nach oben steigt. Oben angekommen, kühlt das Wasser nach und nach ab und sinkt auf der anderen Seite erneut hinab. Es entsteht eine Konvektionsströmung. Die Reibung zwischen den Wassermolekülen untereinander ist geringer als zwischen den Wassermolekülen und der Rohrwand, wodurch sich das Wasser im Rohrrinneren schneller fortbewegt (Kapitel 3.1.5). Die Strömungsgeschwindigkeit ist jedoch gering genug, dass hauptsächlich lineare Strömungen auftreten.



Abbildung 161: Konvektionsrohr über Teelicht – erhitztes Wasser steigt nach oben und eine Konvektionsströmung entsteht

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 162: Im oberen Bereich kühlt Wasser erneut ab und sinkt wieder nach unten hin ab

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 163: Turbulente Strömung an Abrundung des Konvektionsrohres

Apparatur: TU-Graz

Material

1 Reagenzglas
1 Reagenzglasklammer
1 Flambierbrenner
Draht
Kombizange
Eiswürfel
Kaltes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Man schneidet ein kleines Stück Draht ab und formt es mit der Kombizange so, dass es gerade noch in das Reagenzglas passt. Anschließend zerkleinert man die Eiswürfel und gibt diese in das Reagenzglas. Auf diese folgt das Drahtstück und das Ganze wird mit kaltem Wasser aufgefüllt. Der Draht verhindert lediglich das Aufsteigen des Eises (Kapitel 3.2.1). Mit der Klammer wird das Reagenzglas gehalten, während es im oberen Bereich mit dem Flambierbrenner erhitzt wird. Nur das Wasser ganz oben im Reagenzglas fängt an zu kochen, während das Eis ohne Veränderung bestehen bleibt (Abbildung 164).

Physikalische Erklärung

Wasser ist mit einer Wärmeleitfähigkeit λ von $0,598 \frac{W}{m \cdot K}$ sehr schlecht wärmeleitend. Befindet sich der Eiswürfel am Boden des Reagenzglases während man im oberen Bereich das Wasser erhitzt, so bleibt der Eiswürfel davon unberührt, obwohl das erwärmte Wasser darüber sogar zu kochen beginnt. Führt man dieses Experiment so durch, dass man den Eiswürfel an der Wasseroberfläche schwimmen lässt und das Wasser nun am Boden des Reagenzglases erwärmt, so beginnt der Eiswürfel zu schmelzen. Dies liegt daran, dass das unten erwärmte Wasser eine geringere Dichte hat als das obere, kühlere Wasser, wodurch dieses beginnt aufzusteigen. Somit schmilzt der Eiswürfel in diesem Fall durch Konvektion, wodurch die Wärmeenergie durch einen Massetransport von unten zum Eiswürfel befördert wird (Stuart et al., 2015, S. 118).



Abbildung 164: Eis, flüssiges und kochendes Wasser in einem Reagenzglas – geringe Wärmeleitfähigkeit von Wasser

Material

2 Luftballone

1 Kerze

Feuerzeug

Wasserhahn

Wasser



Variante 2

2 Trinkbecher

1 Kerze

Feuerzeug

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der erste Luftballon wird aufgeblasen und über die brennende Kerze gehalten. Der Luftballon platzt sofort (Abbildung 165). Den zweiten Luftballon stülpt man über den Wasserhahn und füllt ihn mit Wasser. Anschließend bläst man ihn noch etwas weiter auf. Hält man diesen nun über die Flamme, so zerplatzt er nicht (Abbildung 166).

Nach demselben Prinzip demonstriert man die Variante des Experiments mit Hilfe eines Trinkbechers aus Kunststoff. Während er ohne Wasser sofort zum Schmelzen und Brennen anfängt (Abbildung 167), so bleibt er mit Wasser gefüllt ganz (Abbildung 168). Hält man den mit Wasser befüllten Becher eine Zeit lang über den Flammen, so fängt das Wasser in diesem zum Köcheln an.

Physikalische Erklärung

Möchte man einen Stoff erwärmen, so muss ihm Energie zugeführt werden. Erwärmt man nun einen Stoff um die Temperatur ΔT , so benötigt man die Wärmeenergie Q , welche proportional zum Temperaturanstieg sowie der Masse m ist:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (107)$$

Dabei ist c die spezifische Wärmekapazität. Diese beschreibt die Wärmemenge, welche erforderlich ist um 1 kg einer Substanz um 1 K zu erwärmen. Dies trifft jedoch nicht bei einem Phasenübergang zu. Wasser hat bei 20°C eine der höchsten spezifischen Wärmekapazitäten mit $c_w = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ (Tipler & Mosca, 2008, S. 568-569).

Luft ist als Gas mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,026 \frac{W}{m \cdot K}$ ein noch schlechterer Wärmeleiter als Wasser mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,598 \frac{W}{m \cdot K}$ (Kuchling, 2011, S. 644-645). Die von der Kerze auf den Becher übertragene Wärmeenergie kann von der Luft nicht schnell genug weitergeleitet werden, um die Wärme als innere Energie aufzunehmen. Ist der Becher mit Wasser befüllt, so wird die Wärmeenergie an das Wasser abgegeben, welches sich dadurch erwärmt. Dieses steigt aufgrund von Konvektion nach oben und kühlt an der Oberfläche des Bechers ab. Im Gegensatz zu Luft hat Wasser eine sehr hohe Wärmekapazität, wodurch viel Wärme aufgenommen werden kann. Somit wird die Zündungstemperatur nie erreicht und der Becher fängt nicht an zu brennen. Dieselben physikalischen Vorgänge laufen im Luftballon ab.



Abbildung 165: Luftballon zerplatzt über Kerzenflamme



Abbildung 166: Mit Wasser gefüllter Luftballon zerplatzt nicht über Kerzenflamme



Abbildung 167: Plastikbecher fängt über Kerzenflamme an zu brennen



Abbildung 168: Mit Wasser gefüllter Plastikbecher brennt nicht über Kerzenflamme

Material	Versuchsdurchführung und Beobachtung
3 Thermometer	Die drei Glasgefäße, sowie ihre Deckel werden mit den Spraydosen in den Farben Weiß, Grau und Schwarz eingefärbt. Dies sollte am Vortag geschehen, damit die Farbe gut trocknen kann. Als Gefäße eignen sich Marmeladengläser oder Ähnliches. Als Vorbereitung kann man des Weiteren Wasser in eine PET-Flasche einfüllen und diese in den Kühlschrank stellen. An einem sonnigen Tag stellt man die Glasgefäße auf Untersetzer in die Sonne, sodass alle in etwa im gleichen Winkel von ihr bestrahlt werden. Man füllt das gekühlte Wasser in die vorbereiteten Glasgefäße und misst die Temperatur. Diese ist am Anfang in allen drei Behältern ident (Abbildung 169). Bei der dargestellten Durchführung hatte das Wasser eine Anfangstemperatur von $7,5^{\circ}\text{C}$. Die Behälter lässt man nun zugeschraubt in der Sonne stehen (Abbildung 170) und misst die Außentemperatur, welche in diesem Fall bei $13,5^{\circ}\text{C}$ lag. Nach ca. einer Stunde wird die Temperatur des Wassers in den Glasgefäßen erneut gemessen (Abbildung 171). Man erkennt, dass die Temperaturen unterschiedlich sind. Das Wasser im weißen Glas ist am kältesten und im schwarzen am wärmsten. Die endgültigen Temperaturen betrugen nach einer Stunde dabei $10,5^{\circ}\text{C}$ im weißen Glas, $12,5^{\circ}\text{C}$ im grauen sowie 23°C im schwarzen Glas.
3 gleiche Gläser mit Deckel	
3 Untersetzer	
1 PET-Flasche (1,5 l)	
Weiß, graue und schwarze Farbe (Spraydose – wasserfest)	
kaltes Wasser	
Kühlschrank	

Physikalische Erklärung

Durch elektromagnetische Strahlung wird Wärmeenergie transportiert. Die Sonne strahlt als schwarzer Körper und sendet somit solch elektromagnetische Strahlung aus. Das Spektrum des Sonnenlichts besteht aus dem sichtbaren Licht, welches aufgrund der additiven Farbmischung (Kapitel 3.3.2) weiß erscheint, sowie einem infraroten und ultravioletten Anteil. Trifft diese Strahlung nun auf einen Körper, der weiß erscheint, so reflektiert dieser beinahe das komplette Spektrum, während ein schwarzer Körper die Wellenlängen in jedem Bereich absorbiert. Diese absorbierte Strahlung wird in Wärmeenergie umgewandelt, wodurch das Wasser im schwarzen Behälter wärmer wird. Der graue Behälter ist dunkler als der weiße und absorbiert somit mehr Wärmeenergie. Da er jedoch eine spiegelnde Oberfläche hat, ist der Unterschied zum weißen Behälter sehr gering.



Abbildung 169: Ausgangssituation – drei Gläser in unterschiedlicher Farbe gefüllt mit Wasser gleicher Temperatur



Abbildung 170: Im Sonnenlicht werden die drei Gläser mit geschlossenem Deckel für einige Zeit stehen gelassen



Abbildung 171: Nach einer Stunde beträgt die Temperatur 10,5°C im weißen, 12,5°C im grauen sowie 23°C im schwarzen Glas

3.2.3 Wärmeausdehnung von Körpern

[52] DICHTEPARADOXON

Material

1 Dichteparadoxon Satz
(bestehend aus 2 Stk.)

2 Bechergläser

Wasserkocher

Kaltes Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Eines der Bechergläser wird mit kaltem und das andere wird mit warmem Wasser aus dem Wasserkocher befüllt. Anschließend wird in je eines der Bechergläser einer der Schwimmkörper gelegt. Zu Beginn erkennt man, wie sich beide Schwimmkörper am Boden des jeweiligen Glases befinden (Abbildung 172). Nach einer Weile steigt der Schwimmkörper im heißen Wasser an die Oberfläche (Abbildung 173). Nimmt man die blauen Schwimmer nun aus dem Wasser und gibt sie anschließend in das jeweilig andere Becherglas, so schwimmt der Körper im kalten Wasser, während jener im heißen Wasser am Boden liegt (Abbildung 174). Nach kurzer Zeit tauschen sie ihre Positionen und der Schwimmer im kalten Wasser sinkt zu Boden, während jener im heißen Wasser nach oben steigt (Abbildung 175).

Physikalische Erklärung

Werden Festkörper oder Flüssigkeiten erwärmt, so dehnen sich diese aus. Betrachtet man dabei einen Stab bzw. eine Flüssigkeitssäule mit der Länge l bei der Temperatur T , so ändert sich die Länge um Δl bei einer Temperaturänderung von ΔT . Dabei ist die Längenänderung Δl proportional zur Temperaturänderung ΔT und es gilt:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta T \quad (108)$$

Dabei ist α der stoffspezifische Längenausdehnungskoeffizient. Formt man obige Formel auf α um, so erhält man den Mittelwert von α für ein Temperaturintervall ΔT . Den Längenausdehnungskoeffizient für eine bestimmte Temperatur erhält man, indem man die Temperaturänderung gegen null laufen lässt:

$$\alpha = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (109)$$

Betrachtet man die Änderung im dreidimensionalen Raum, so ändert sich das Volumen V um ΔV . Der Volumenausdehnungskoeffizient β für eine bestimmte Temperatur lässt sich analog zum Längenausdehnungskoeffizient berechnen:

$$\beta = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} \quad (110)$$

Im Allgemeinen gilt, dass der Volumenausdehnungskoeffizient β dreimal so groß ist wie der Längenausdehnungskoeffizient α , da sich ein Körper, stets in jede Richtung gleich stark ausdehnt. Wasser hat einen Volumenausdehnungskoeffizienten β von $\beta = 0,207 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ bei 20°C (Tipler & Mosca, 2008, S. 535 ff.).

Werden die Schwimmkörper, welche Raumtemperatur haben, in das Wasser geworfen, so sinken diese anfangs zu Boden. Dies bedeutet, dass ihre Dichte zu diesem Zeitpunkt höher sein muss, als jene von Wasser (Kapitel 3.1.3). Der Schwimmkörper im kalten Wasser bleibt am Boden liegen, da die Temperatur des Körpers verringert wird und er sich noch weiter zusammenzieht, wodurch die Dichte erhöht wird. Der Schwimmkörper im warmen Wasser wird erwärmt, wodurch er sich ausdehnt. Im Vergleich zum Wasser muss der Volumenausdehnungskoeffizient des Schwimmkörpers höher sein, da er sich so stark ausdehnt, dass seine Dichte geringer wird als die von Wasser. Die meisten Festkörper dehnen sich beim Erwärmen geringer aus als Flüssigkeiten. Diese Schwimmkörper bilden eine der Ausnahmen, wodurch das paradoxe Verhalten in Erscheinung tritt (3B Scientific, 2019).



Abbildung 172: Beide schwimmende Körper befinden sich zu Beginn am Boden des Becherglases

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 173: Der Körper im heißen Wasser schwimmt an die Oberfläche, während der Körper im kalten Wasser am Boden bleibt

Apparatur: TU-Graz

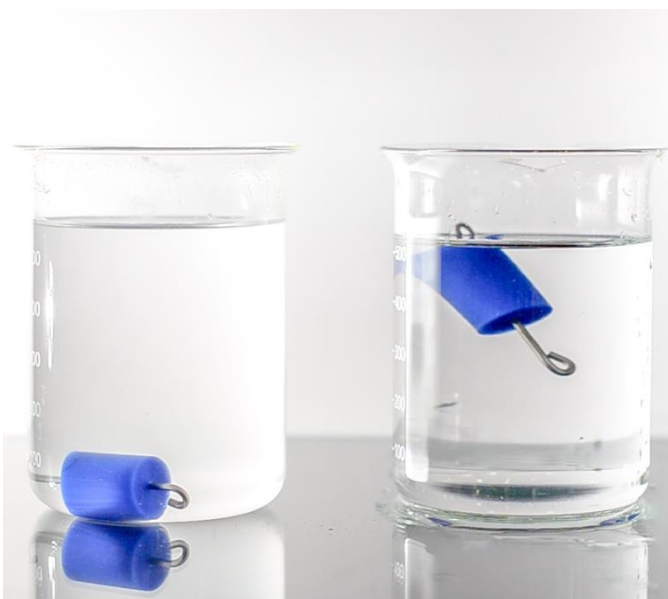


Abbildung 174: Schwimmkörper werden in das jeweils andere Becherglas gegeben, wobei der Körper im heißen Wasser am Boden verweilt, während der Körper im kalten Wasser schwimmt

Apparatur: TU-Graz

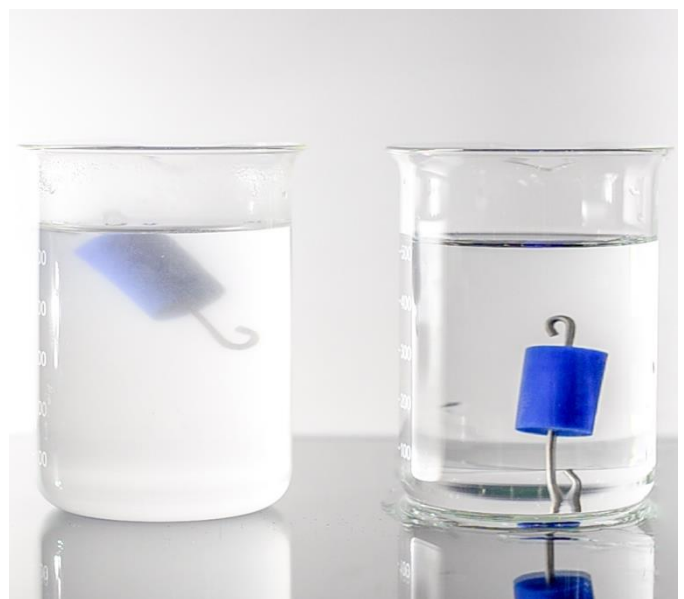


Abbildung 175: Nach einiger Zeit tauschen die beiden Schwimmkörper ihre Position

Apparatur: TU-Graz

3.2.4 Diffusion

Brown'sche Bewegung

Beobachtet man sehr kleine Teilchen in einer Flüssigkeit mit Hilfe eines Mikroskops, so kann man feststellen, dass diese kleine, ruckartige Bewegungen durchführen. Umso kleiner die Teilchen sind, umso schneller sind diese Bewegungen. Die Bewegungen lassen sich dadurch erklären, dass noch kleinere Teilchen ständig gegen diese Teilchen stoßen. Da dies nicht von jeder Seite gleichmäßig geschieht, bewegen sich die größeren Teilchen aufgrund der Stoßbewegungen in einem längeren Zeitraum in „zickzack“-Bewegungen (Abbildung 176). Die Größe der kleineren Teilchen ist so gering, dass man diese Stoßbewegungen nicht erkennen kann und sich das größere Teilchen bei starken Stößen in der Größenordnung eines Flüssigkeitsmoleküls verschiebt. Weiters bewegt sich das größere Teilchen ebenfalls selbstständig, da jedes Teilchen in einem System mit der Temperatur T über eine mittlere kinetische Energie von $\frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ verfügt. Dabei wirkt sich die Größe der Masse m des Teilchens nicht auf die Energie aus, sie hat lediglich einen Einfluss auf die Geschwindigkeit v :

$$\frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} \quad (111)$$

Bei k handelt es sich um die Boltzmann-Konstante mit $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$. Somit bewegen sich schwere Teilchen mit geringerer Geschwindigkeit als leichte Teilchen. Weiters erkennt man anhand der Formel, dass die Geschwindigkeit der Teilchen mit steigender Temperatur zunimmt. In Festkörpern können sich die Teilchen nicht frei bewegen und so schwingen die Moleküle auf ihrem festen Platz im Kristallgitter (Meschede, 2010, S. 254; Stuart & Klages, 2010, S. 103; Kuchling, 2011, S. 310).

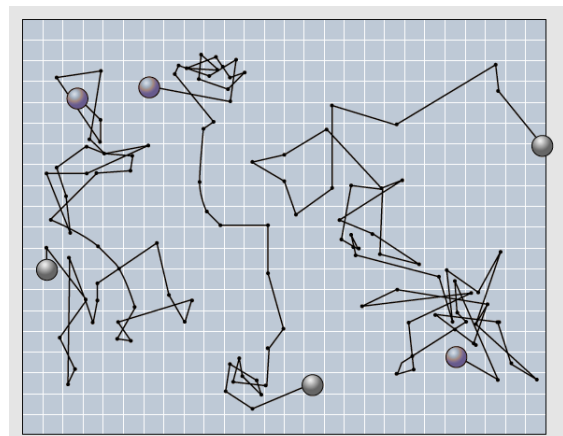


Abbildung 176: Brown'sche Bewegung eines "schwereren" Teilchens. Die einzelnen Punkte wurden in gewissen Zeitabständen aufgetragen. Die Geraden dazwischen sind willkürlich eingezeichnet

Quelle: Meschede, 2010, S. 255

Diffusion

Betrachtet man Experiment [72], so wurde eine Wasserschicht über ein Wasser-Zucker-Gemisch geschichtet. Zweiteres hat dabei eine höhere Dichte und bevorzugt nach dem Archimedischen Prinzip (Kapitel 3.1.3) die untere Position, die es auch einnimmt. Dennoch verschimmt die Grenzfläche immer mehr und es kommt zu einer Vermischung der einzelnen Schichten. In Flüssigkeiten kann dies oft Stunden in Anspruch nehmen. Dieses Phänomen bezeichnet man als Diffusion und es tritt dann in Erscheinung, wenn sich die Teilchenanzahldichte n von einem Ort zum anderen Ort unterscheidet. Der Unterschied wird

durch die Bewegung der Teilchen ausgeglichen und erfolgt stets vom Ort hoher Konzentration in Richtung niedriger Konzentration. Man unterscheidet dabei zwischen Eigendiffusion, bei welcher sich Moleküle der gleichen Art vermischen und der Fremddiffusion, bei der sich Moleküle unterschiedlicher Stoffe vermischen. Diffusion tritt sowohl in Fluiden als auch Festkörpern auf. In Gasen geschieht die Diffusion jedoch am schnellsten, da sich dort die Moleküle am schnellsten bewegen (Meschede, 2011, S. 277; Kuchling, 2011, S. 181; Stuart & Klages, 2010, S. 105).

Osmose

Befinden sich zwei unterschiedliche Stoffe auf je einer Seite einer porösen Wand und diffundieren mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit, so entsteht ein Druckunterschied, da sich in eine Richtung mehr Moleküle bewegen als in die andere. Dieser gleicht sich jedoch schnell wieder aus. Ist die Wand dabei nur halbdurchlässig (semipermeabel), d. h. die Wand lässt die Moleküle nur in eine Richtung durch, so entsteht ein permanenter Druckunterschied. Man betrachte ein Gefäß mit solch einer semipermeablen Trennwand: Auf der einen Seite (Abbildung 177, linke Beckenhälfte) befindet sich beispielsweise ein Zucker-Wasser-Gemisch mit viel Zucker, während sich auf der anderen Seite (Abbildung 177, rechte Beckenhälfte) ein Gemisch mit wenig Zucker befindet. Die Trennwand lässt Wasser durchdiffundieren, jedoch keinen Zucker. Da die Bewegung von einem Ort hoher Konzentration in Richtung niedriger Konzentration, bezogen auf das Wasser, erfolgt, bewegt sich das Wasser aus dem Gemisch mit weniger Zucker in Richtung Zucker-Wasser-Gemisch mit mehr Zucker um dort die Wasserkonzentration zu erhöhen. Somit steigt auf der linken Seite der Druck und durch die erhöhte Wasserkonzentration gleicht sich ebenso die Zuckerkonzentration aus. Der Überdruck wird osmotischer Druck genannt (Stuart & Klages, 2010, S. 106; Kuchling, 2011, S. 181). Den Vorgang der Osmose kann man auch im Alltag beobachten am Beispiel einer Radieschen-Scheibe. Dabei wird dem Radieschen durch Bestreuen mit Salz Wasser entzogen (Abbildung 178).

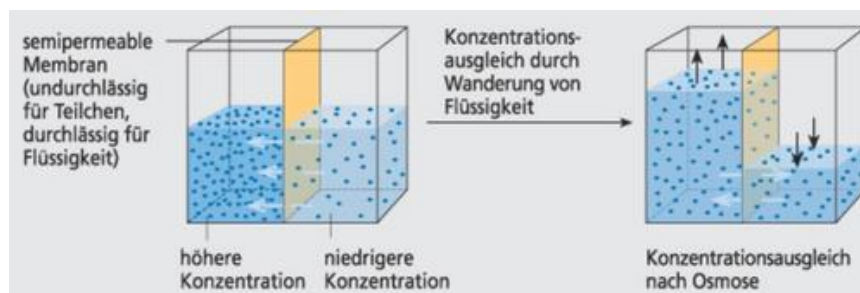


Abbildung 177: Funktionsweise der Osmose und Entstehung des osmotischen Drucks

Quelle: <https://quizlet.com/278606501/biologie-diffusion-und-osmose-flash-cards/>



Abbildung 178: Osmose am Beispiel von Radieschen mit Salz
links, rechts keine Osmose

Material

2 Teetassen

2 Teebeutel

Wasser

Wasserkocher



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Eine Teetasse wird mit kaltem Wasser befüllt, die andere mit kochendem Wasser aus dem Wasserkocher. In beide Tassen wird ein Teebeutel gelegt und anschließend ein wenig gewartet. Beim kalten Wasser tritt auch nach längerer Zeit kaum eine Veränderung ein, während sich das heiße Wasser beinahe komplett verfärbt hat (Abbildung 179 - links kalt, rechts heiß).

Variante 2

2 Trinkgläser (klein)

2 Tintenpatronen

Wasser

Wasserkocher



Die beiden Trinkgläser werden analog mit heißem und kaltem Wasser befüllt. In jedes der Gläser wird ein Tropfen Tinte hineingetropft. Beim kalten Wasser treten die Veränderungen nur sehr langsam auf, die Struktur der Tinte ist sehr scharf, während beim heißen Wasser die Tinte nach und nach zu verschwinden scheint und die Struktur dabei unscharf ist (Abbildung 180 - links kalt, rechts heiß).

Physikalische Erklärung

Die Wassermoleküle haben eine thermisch verursachte Bewegungsenergie:

$$E = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (112)$$

Dabei ist k die Boltzmann-Konstante mit $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ und T die Temperatur. Setzt man diese mit der kinetischen Energie gleich und formt anschließend auf die Geschwindigkeit v um, so erkennt man deren Abhängigkeit von der Temperatur T :

$$\frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} \quad (113)$$

Hat das Wasser nun eine höhere Temperatur, so bewegen sich dessen Moleküle schneller als jene von kaltem Wasser. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit der warmen Wassermoleküle stoßen diese öfters mit den Molekülen des Tees bzw. der Tinte zusammen. Dadurch diffundieren die Tinte als auch der Tee im heißen Wasser schneller als im kalten Wasser.



Abbildung 179: Diffusion von Tee – links bei kaltem, rechts bei warmem Wasser



Abbildung 180: Diffusion von Tinte – links bei kaltem, rechts bei warmem Wasser

Material

1 Erlenmeyerkolben
1 Stopfen
1 Tonzylinder
1 Becherglas
1 Heliumflasche
1 Schlauch
2 Glasröhrchen (1
gerades, 1 verwinkeltes)
Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Der Erlenmeyerkolben wird in etwa zur Hälfte mit Wasser befüllt und anschließend mit einem Stopfen mit zwei Löchern verschlossen. Durch diese zwei Löcher werden einerseits das verwinkelte Glasröhrchen, sodass es in das Wasser ragt und andererseits das gerade Glasröhrchen, welches gerade so noch in das Innere des Erlenmeyerkolbens ragt, gesteckt. Auf dem geraden Röhrchen wird der Tonzylinder befestigt. Über diesen wird ein etwas größeres Becherglas gestülpt (Abbildung 181). Mit Hilfe eines Schlauches wird Helium zwischen Becherglas und Tonzylinder eingelassen. Sofort fängt das Wasser an, aus dem verwinkelten Glasröhrchen zu fließen (Abbildung 182). Stoppt man die aktive Heliumzufuhr, so fließt weiterhin Wasser aus dem Erlenmeyerkolben, bis es langsam nachlässt und letztlich aufhört. Nimmt man nun das Becherglas vom Tonzylinder, so fängt es im Kolben an zu blubbern.

Physikalische Erklärung

Die Dichte von Helium ist mit $\rho_{He} = 0,1785 \frac{kg}{m^3}$ deutlich geringer als jene von Luft mit $\rho_{Luft} = 1,2923 \frac{kg}{m^3}$ bei $0^\circ C$ und Normaldruck (Kuchling, 2011, S. 616). Somit steigt Helium nach dem Archimedischen Prinzip nach oben (Kapitel 3.1.3). Durch das Becherglas wird das Helium jedoch daran gehindert und sammelt sich in diesem an. Der Tonzylinder ist sehr porös, wodurch sowohl Luft als auch Helium aufgrund der thermischen Bewegung hindurchdiffundieren können. Die Geschwindigkeit der Diffusion ist jedoch abhängig von der Temperatur, als auch der Masse der Teilchen (Kapitel 3.2.4):

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} \quad (114)$$

Da sowohl die Luft als auch das Helium die gleiche Temperatur haben, ergibt sich folgendes Verhältnis für die Geschwindigkeit von Helium v_{He} zur Geschwindigkeit von Luft v_{Luft} :

$$\frac{v_{He}}{v_{Luft}} = \sqrt{\frac{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_{He}}}{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_{Luft}}}} \Leftrightarrow \frac{v_{He}}{v_{Luft}} = \sqrt{\frac{m_{Luft}}{m_{He}}} \quad (115)$$

Nach Einsetzen der jeweiligen molaren Masse ergibt dies ein Verhältnis von:

$$\frac{v_{He}}{v_{Luft}} = \sqrt{\frac{m_{Luft}}{m_{He}}} = \sqrt{\frac{28,965}{4,002}} \approx 2,7 \quad (116)$$

Somit diffundiert das Helium 2,7 mal schneller in den Tonzylinder hinein als die Luft hinausdiffundiert. Dadurch entsteht ein Überdruck, wodurch das Wasser aus der Öffnung herausgedrückt wird. Entfernt man das Becherglas, so diffundiert das Helium wieder schneller aus dem Zylinder hinaus, als Luft hineindiffundieren kann, wodurch ein Unterdruck entsteht, welcher Luft ansaugt. Nach einiger Zeit stellt sich wieder ein Gleichgewicht ein (Stuart & Klages, 2010, S. 106)

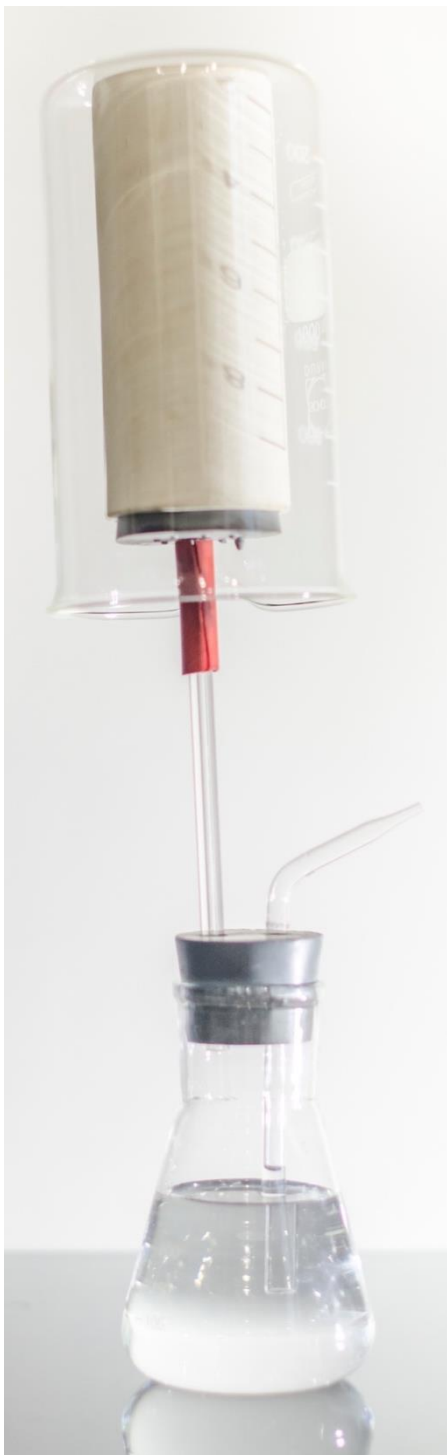


Abbildung 181: Ausgeglichener Druck ohne Helium
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 182: Druckanstieg aufgrund von diffundierendem Helium
Apparatur: TU-Graz

3.2.5 Gasgesetze

Zustandsgleichungen idealer Gase

Unter einem idealen Gas versteht man eine Ansammlung von punktförmigen Teilchen mit einer Masse m , welche sich kräftefrei in einem Volumen V bewegen können. Dabei herrscht ein Druck p sowie eine Temperatur T . Diese Teilchen wechselwirken nur bei Stößen miteinander. Dies ist als Näherung für echte Gase zulässig (Tipler & Mosca, 2008, S. 546). Bei einer Zustandsgleichung werden zwei oder mehr Zustandsgrößen in Beziehung zueinander gesetzt. Bei einer Gasmasse M eines idealen Gases kann dessen Zustand durch die drei Zustandsgrößen Druck p , Volumen V und Temperatur T beschrieben werden. Diese drei Zustandsgrößen werden bei den folgenden Gesetzen in Relation zueinander gesetzt (Meschede, 2011, S. 261; Kommer et al., 2015, S. 255-256).

Das Gesetz von Boyle-Mariotte:

Robert Boyle (1627-1691) verwendete ein U-Rohr-Manometer, dessen kürzerer Schenkel zugeschmolzen war. In den längeren Schenkel schüttete er Quecksilber. Da die Luft nicht zur Gänze entweichen konnte und somit eingeschlossen war, merkte er, dass beim zusätzlichen Eingießen von Quecksilber die Luft komprimiert wurde. Er erkannte, dass das Volumen der Luft umgekehrt proportional zu dem vom Quecksilber verursachten Druck ist, wenn die Temperatur konstant ist. Dieses Gesetz wurde etwas später, unabhängig von Boyle, vom Forscher Edme Mariotte (1620-1684) entdeckt. Formal ausgedrückt lautet es:

$$p \sim \frac{1}{V} \text{ oder } p \cdot V = \text{konstant} \quad (117)$$

Vergleicht man nun den Anfangszustand des Gases mit dem Endzustand so ergibt sich:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (118)$$

Dabei sind p_1 , V_1 die Anfangszustandsgrößen und p_2 , V_2 die Endzustandsgrößen des Gases. Ist die Temperatur konstant, so ist die Zustandsänderung isotherm. Der Graph dieser Zustandsänderung ist eine Hyperbel (Abbildung 183) (Kuchling, 2011, S. 156; Kistner, 1919, S. 105).

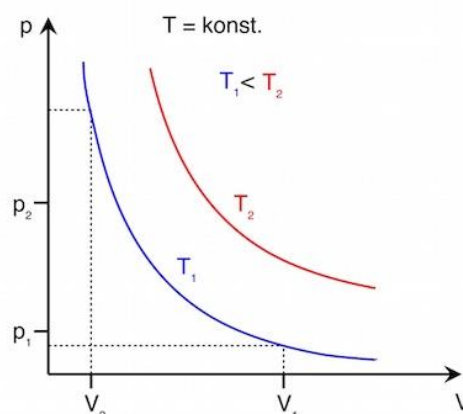


Abbildung 183: Das Gesetz von Boyle-Mariotte.
Die Zustandsänderung ist isotherm

Quelle: <https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/-gasgesetze-und-gasgleichung/>

Die Gesetze von Gay-Lussac

Das erste Gesetz von Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), beschreibt, dass bei einem eingeschlossenen Gas das Volumen proportional zur Temperatur ist, wenn der Druck unverändert bleibt. Formal ausgedrückt lautet es:

$$V \sim T \text{ oder } \frac{V}{T} = \text{konstant} \quad (119)$$

Erwärmt man nun ein ideales Gas bei gleichbleibender Temperatur, so dehnt es sich aus, während es sich beim Abkühlen zusammenzieht. Dieses Gesetz wurde von Jaques Charles (1746-1823) mitentwickelt und ist auch als das Gesetz von Charles bekannt. Vergleicht man die Anfangszustände des Gases mit dem Endzustand, so ergibt sich:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (120)$$

Dabei sind V_1 , T_1 die Anfangszustandsgrößen und V_2 , T_2 die Endzustandsgrößen des Gases. Ist der Druck konstant, so ist die Zustandsänderung isobar. Beim Graphen dieser Funktion handelt es sich um eine Gerade (Abbildung 184).

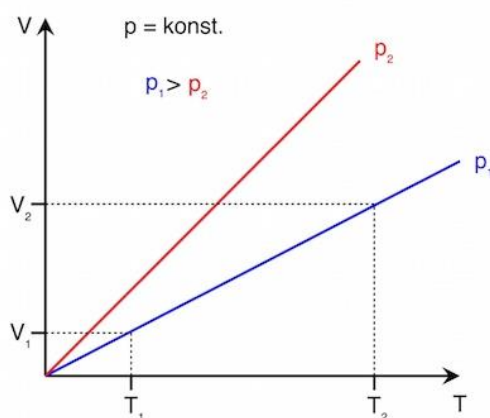


Abbildung 184: Das erste Gesetz von Gay-Lussac. Die Zustandsänderung ist isobar

Quelle: <https://physikunterricht-online.de/jahrgang11/-gasgesetze-und-gasgleichung/>

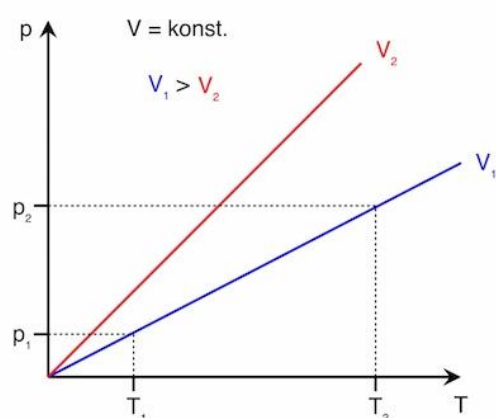


Abbildung 185: Das zweite Gesetz von Gay-Lussac. Die Zustandsänderung ist isochor. Dabei sind p_1 , V_1 die Anfangszustandsgrößen und p_2 , V_2 die Endzustandsgrößen des Gases

Quelle: <https://physikunterricht-online.de/jahrgang11/-gasgesetze-und-gasgleichung/>

Beim zweiten Gesetz von Gay-Lussac wird das Volumen eines eingeschlossenen Gases konstant gehalten. Dann verhält sich der Druck proportional zur Temperatur:

$$p \sim T \text{ oder } \frac{p}{T} = \text{konstant} \quad (121)$$

Vergleicht man nun wieder den Anfangszustand eines Gases mit seinem Endzustand, so ergibt sich:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (122)$$

Dabei sind p_1 , T_1 die Anfangszustandsgrößen und p_2 , T_2 die Endzustandsgrößen des Gases. Ist das Volumen konstant, so ist die Zustandsänderung isochor. Es handelt sich wieder um

einen linearen Zusammenhang, wodurch der Graph ebenfalls eine Gerade ist (Abbildung 185) (Kuchling, 2011, S. 205-206; Tipler & Mosca, 2008, S. 546; Meschede, 2011, S. 261).

Das allgemeine Gasgesetz

Kombiniert man nun das Gesetz von Boyle-Mariotte und das erste Gesetz von Gay-Lussac, so ergibt dies das allgemeine Gasgesetz:

$$\frac{p \cdot V}{T} = C \quad (123)$$

Dabei ist C eine von der Gasmenge abhängige Proportionalitätskonstante. Nimmt man zwei idente Behälter mit gleichem Volumen, so befindet sich bei identem Druck sowie identer Temperatur gleich viel Menge an Gas in ihnen. Betrachtet man nun die beiden Behälter als ein gemeinsames System, befindet sich die doppelte Gasmenge mit doppeltem Volumen darin. Jedoch herrschen der gleiche Druck und die gleiche Temperatur. Somit ist $\frac{p \cdot V}{T} = C$ doppelt so groß. Aus diesem Grund muss man die Konstante in Abhängigkeit der Teilchenanzahl N im Gas setzen. Diese wird folgend mit der Boltzmann-Konstante $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ multipliziert. Somit ist:

$$C = k \cdot N \quad (124)$$

Setzt man die Gleichung in Formel (124) ein, so erreicht man durch umformen:

$$p \cdot V = k \cdot N \cdot T \quad (125)$$

In den Naturwissenschaften werden Stoffmengen häufig in der Einheit Mol angegeben. Dabei enthält ein Mol N_A Teilchen. N_A ist die sogenannte Avogadro-Konstante und beträgt $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Betrachtet man nun $n \text{ mol}$ des Gases, so ergibt sich die Teilchenanzahl N :

$$N = N_A \cdot n \quad (126)$$

Weiters lässt sich mit der Boltzmann-Konstante sowie der Avogadro-Konstante die allgemeine Gaskonstante R berechnen:

$$R = N_A \cdot k = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1,38065 \cdot 10^{-23} = 8,314 \frac{J}{\text{mol} \cdot K} \quad (127)$$

Setzt man nun in Gleichung (125) ein, so erhält man die allgemeine Gasgleichung (Tipler & Mosca, 2008, S. 546; Kuchling, 2011, S. 310):

$$p \cdot V = k \cdot N \cdot T \Leftrightarrow p \cdot V = k \cdot N_A \cdot n \cdot T \Leftrightarrow p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (128)$$

Entstehung des Druckes in einem Gas

In einem Gas ist Wärme die ungeordnete Molekülbewegung. Die Moleküle bewegen sich dabei völlig unabhängig voneinander, mit der Geschwindigkeit v fort. Stoßen sie zusammen, so tauschen sie gemäß den Gesetzen des elastischen Stoßes, Energie und Impuls aus.

Treffen die Moleküle eines Gases in einem Zeitraum dt auf die Wand eines Behälters mit einer Fläche A , so übertragen diese den Impuls $d\mathbf{p}$ auf die Wand, wodurch ein Druck p entsteht:

$$p = \frac{\text{an Wand abgegebener Impuls}}{\text{Wandfläche} \cdot \text{Zeit}} \quad (129)$$

Stellt man sich nun ein rechteckiges Volumen vor (Abbildung 186), in welchem sich die Moleküle befinden, so gibt es sechs Flächen, auf welche die Moleküle mit der Geschwindigkeit v treffen können. Im Volumen V gibt es N Teilchen. Dies ergibt eine Teilchenzahldichte n_ρ von $n = \frac{N}{V}$. Idealisiert man die Bewegungen der Moleküle so, dass sich auf jede Fläche $\frac{1}{6}$ der Teilchen senkrecht

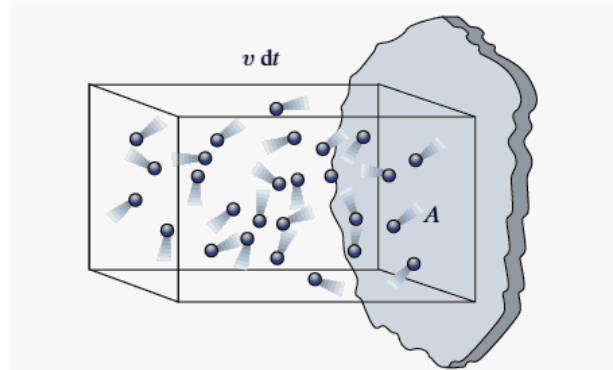


Abbildung 186: Entstehung des Gasdruckes auf der Seitenfläche A

Quelle: Meschede, 2011, S. 108

zubewegt, so treffen all jene Moleküle im Zeitraum dt auf die Seitenfläche A , die sich in einer Entfernung $v \cdot dt$ zu ihr befinden. Dies ergibt eine Stoßrate R_{St} von:

$$R_{St} = \frac{1}{6} \cdot n_\rho \cdot \frac{v \cdot dt}{dt} = \frac{1}{6} \cdot n \cdot v \quad (130)$$

Da sich ein Molekül senkrecht mit einem Impuls von $\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$ auf die Wand zubewegt, hat es nach der Reflexion einen Impuls von $\mathbf{p} = -m \cdot \mathbf{v}$. Somit überträgt jedes Teilchen den Impuls von $d\mathbf{p} = 2 \cdot m \cdot \mathbf{v}$ auf die Wand. Somit ergibt sich für den Druck das Produkt aus Impuls $d\mathbf{p}$ und Stoßrate R_{St} :

$$p = R_{St} \cdot d\mathbf{p} \Leftrightarrow p = \frac{1}{6} \cdot n_\rho \cdot v \cdot 2 \cdot m \cdot v \Leftrightarrow p = \frac{1}{3} \cdot n_\rho \cdot m \cdot v^2 \quad (131)$$

Ersetzt man hier n_ρ mit $\frac{N}{V}$ so ergibt sich nach einer einfachen Umformung:

$$p \cdot V = \frac{1}{3} \cdot N \cdot m \cdot v^2 \quad (132)$$

Setzt man $p \cdot V$ mit jenen aus den Gleichungen (125) und (132) gleich, so ergibt dies für den Druck:

$$p = n \cdot R \cdot T = k \cdot N \cdot T \quad (133)$$

Setzt man die rechte Seite der Gleichung (132) mit der rechten Seite der Gleichung (133) gleich, so kann man die kinetische Energie der Teilchen bestimmen:

$$\frac{1}{3} \cdot N \cdot m \cdot v^2 = k \cdot N \cdot T \Leftrightarrow m \cdot v^2 = 3 \cdot k \cdot T \Leftrightarrow \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (134)$$

Aufgrund dessen erkennt man die Abhängigkeit der Bewegungsenergie von der Temperatur (Meschede, 2011, S. 107-108).

Material

1 Trinkglas (mittel)

1 Teelicht

1 flacher Teller

1 Münze

Feuerzeug

Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Seitlich des recht flachen Tellers wird eine Münze positioniert. Der Teller wird daraufhin so hoch mit Wasser befüllt, dass die Münze gerade noch bedeckt wird. Anschließend wird das Teelicht mittig auf den Teller gestellt und angezündet. Über das Teelicht wird das Trinkglas gestülpt (Abbildung 187). Man kann nun beobachten, wie sich die Flamme der Kerze nach und nach verkleinert, während zugleich der Wasserpegel im Glas steigt. Ist die Kerze erloschen, so befindet sich das meiste Wasser im Trinkglas und die Münze liegt beinahe im Trockenen (Abbildung 188).

Physikalische Erklärung

Die Hauptursache, welche für das Ansaugen des Wassers verantwortlich ist, ist die Änderung der Temperatur im Glas. Stülpt man dieses über die Kerze, so erwärmt sich die Luft im Glas und dehnt sich dabei aus, wobei etwas Luft entweicht. Nach dem vollständigen Erwärmen der Luft im Glas ist das Volumen im Glas konstant, da während des Erwärmungsvorgangs Luft entweicht. Ist der Sauerstoff im Glas aufgebraucht, so erlischt die Kerze und die Luft im Glas kühlt ab. Nach dem zweiten Gesetz von Gay-Lussac (Kapitel 3.2.5) ist der Druck proportional zur Temperatur, wenn das Volumen konstant ist. Es gilt:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (135)$$

Die Temperatur T_1 beschreibt die maximale Temperatur der Luft im Glas, während T_2 jene kältere Außentemperatur ist, an die sich die warme Luft im Glas nach dem Erlöschen der Kerze anpasst. Weiters herrscht im Moment der maximalen Temperatur T_1 der Druck p_1 , welcher im Wesentlichen dem Luftdruck entspricht. Der Druck p_2 , welcher nach Anpassung der Temperatur im Glas mit der Umgebungstemperatur vorherrscht, ist nach vollständiger Abkühlung geringer, da:

$$\frac{T_1}{T_2} > 1, \text{ da } T_1 > T_2. \text{ Mit } \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ folgt daraus: } p_2 < p_1 \quad (136)$$

Es entsteht also ein Unterdruck im Glas. Aufgrund des höheren Luftdrucks wird Wasser in das Glas gedrückt. Weitere Ursachen für die Erhöhung des Wasserpegels sind, dass beim Brennvorgang Sauerstoff in Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid umgewandelt wird. Der Wasserdampf kondensiert und das Kohlenstoffdioxid ist wasserlöslich, wodurch in beiden Fällen weniger Volumen im Glas benötigt wird (Hilscher et al., 2010, S. 383).



Abbildung 187: Glas über brennender Kerze – Münze liegt im Wasser



Abbildung 188: Wasseranstieg aufgrund von Unterdruck – die Münze wird „trockengelegt“

Material

1 Metaldose
1 Glasschüssel (groß)
1 Kerze
1 Grillzange
5-10 Eiswürfel
Feuerzeug
kaltes Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

In die leere Dose wird ein wenig Wasser eingefüllt. Weiters wird die Schüssel mit kaltem Wasser befüllt, in welches zur zusätzlichen Kühlung Eiswürfel gelegt werden. Das Wasser in der Dose wird mit Hilfe der Grillzange gehalten und mit der brennenden Kerze zum Kochen gebracht (Abbildung 189). Sobald Dampf aus der Dose strömt, dreht man diese um 180°, sodass sie kopfstellt und taucht sie so in das kalte Wasser. Man hört ein Zischen, dann einen Knall und die Dose ist implodiert (Abbildung 190).



Anmerkung: Die Eiswürfel zur Kühlung sind nicht unbedingt notwendig. Es reicht kaltes Wasser, jedoch sieht man so den Effekt ausgeprägter.

Physikalische Erklärung

Beim Erwärmen fängt das Wasser an zu kochen und es bildet sich Wasserdampf. Dieser füllt den Raum in der Dose und kann durch die Öffnung entweichen, wodurch in der Dose ein Druck herrscht, der dem Luftdruck entspricht. In der Dose herrscht dabei eine Temperatur, welche im Vergleich zur Eiswassertemperatur sehr hoch ist. Dreht man die Dose um 180°, so ist das Volumen beim Berühren der Wasseroberfläche konstant. Damit greift das zweite Gesetz von Gay-Lussac, wonach der Druck proportional zur Temperatur ist. Verringert sich die Temperatur des Wasserdampfes in der Dose, was beim Eintauchen geschieht, so kondensiert er und der Druck in der Dose verringert sich. Die Dose implodiert letztlich aufgrund des hohen Druckunterschieds zwischen dem Innenbereich und dem Luftdruck.



Abbildung 189: Erhitzen der Dose über einer Kerzenflamme



Abbildung 190: Durch das Eintauchen der Dosenöffnung in kaltes Wasser implodiert diese aufgrund des Druckunterschieds

Material

1 Glasflasche
1 Luftballon
2 Schüsseln (groß)
Trinkglas (klein)
heißes Wasser
kaltes Wasser
Eiswürfel



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Bei diesem Versuch gibt es zwei Varianten mit denselben Materialien. Für die erste Variante wird eine leere Glasflasche, welche über ein relativ großes Volumen verfügen sollte, mit Hilfe von Eiswasser gekühlt. Dazu legt man diese in eine, mit Eis und Wasser gefüllte Schüssel. Zusätzlich wird die Flasche mit dem kalten Wasser befüllt. Währenddessen wird in eine andere Schüssel heißes Wasser geschüttet. Anschließend nimmt man die Flasche aus dem kalten Wasser, leert sie und stülpt den Luftballon darüber (Abbildung 191). Diese stellt man nun in das vorbereitete Wärmebad. Der Luftballon wird aufgeblasen (Abbildung 192). Zur zusätzlichen Erwärmung kann man das Wasser aus der Schüssel mit Hilfe eines Trinkglases immer

wieder über die Flasche gießen. Bei der zweiten Variante des Experiments folgen dieselben Schritte mit dem Unterschied, dass die Flasche zuerst mit heißem Wasser erwärmt wird, und anschließend in das Eiswasser gestellt wird. Der Luftballon wird diesmal in das Innere der Flasche gezogen und scheint sich innerhalb dieser aufzublasen (Abbildung 193).

Physikalische Erklärung

Bei diesem Experiment verändern sich alle drei Zustandsgrößen der Luft. Nach dem allgemeinen Gasgesetz gilt:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant} \quad (137)$$

Betrachtet man nun den Fall mit der Ausdehnung des Luftballons, so wird die anfangs sehr kalte Luft im System erwärmt. Steigt die Temperatur, so müssen Druck und/oder das Volumen steigen, damit der Wert konstant bleibt. Aufgrund der höheren Temperatur steigert sich die Geschwindigkeit der Luftmoleküle, wodurch sie kräftiger aneinanderstoßen und somit ihren Abstand untereinander vergrößern. Dadurch entsteht ein Überdruck, wodurch sich der flexible Luftballon ausdehnt und sich das Volumen der Luft somit vergrößert.

Für den Fall, bei welchem sich der Luftballon in das Innere der Flasche bewegt, trifft dasselbe physikalische Phänomen zu. Wird die in der Flasche eingesperrte Luft abgekühlt, so verringert sich die Geschwindigkeit der Luftmoleküle und der Druck lässt nach. Der äußere Luftdruck ist größer als der Innendruck und drückt den Luftballon in die Flasche (Diekmann, 2014, S. 33).



Abbildung 191: Der Luftballon wird über eine leere Glasflasche gestülpt



Abbildung 192: Im warmen Wasser dehnt sich der Luftballon aufgrund von einem Druckunterschied aus



Abbildung 193: Im kalten Wasser wird der Luftballon aufgrund von einem Druckunterschied in das Flascheninnere gezogen

3.2.6 Phasenübergänge

Dampfdruck

Damit eine Flüssigkeit verdampfen kann, müssen die einzelnen Moleküle die gegenseitigen Anziehungskräfte überwinden. Dazu muss die kinetische Energie der Moleküle entsprechend hoch sein. Da diese mit der Temperatur zunimmt, wächst die Anzahl der Moleküle, welche in einer bestimmten Zeit die Flüssigkeitsoberfläche verlassen, ebenfalls mit steigender Temperatur. Gleichzeitig gibt es Dampfmoleküle, welche sich in die Flüssigkeit zurückbewegen, d. h. sie kondensieren. Betrachtet man nun einen abgeschlossenen Raum, so gehen Flüssigkeitsmoleküle in den Dampfraum über, während Dampfmoleküle in die Flüssigkeit überlaufen. Befindet sich Dampf über der Flüssigkeit, so üben die Moleküle des Dampfes den sogenannten Dampfdruck auf die Flüssigkeit aus. Bei einem bestimmten, stoffabhängigen Dampfdruck stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein, bei dem die gleiche Anzahl an Molekülen von der Flüssigkeit in den Dampfraum übergehen und umgekehrt. Dieser bestimmte Dampfdruck wird Sättigungsdampfdruck genannt. Der Sättigungsdampfdruck ist zwar von der Temperatur abhängig, jedoch vom Raumvolumen unabhängig. Wird beispielsweise das Volumen vergrößert, so sinkt zunächst der Dampfdruck, wodurch erneut solange Flüssigkeit verdampft, bis ein Gleichgewicht herrscht. Dies geschieht ebenfalls wieder beim Erreichen des Sättigungsdampfdrucks. Wird der Raum jedoch so stark vergrößert, dass die komplette Flüssigkeit verdampft, so entsteht ungesättigter Dampf mit einem niedrigen Druck. Im Gegensatz zu einem idealen Gas ist die Temperatur des Sättigungsdampfdrucks, bei konstantem Volumen (Kapitel 3.2.5) nicht proportional zum Druck. Der Druck nimmt mit wachsender Temperatur immer stärker zu, wodurch immer weniger Moleküle aus der Flüssigkeit austreten können. Dies ist in der sogenannten Dampfdruckkurve dargestellt (Kapitel 2.2.2) (Stuart & Klages, 2010, S. 110). Weiters haben andere Gase bzw. Dämpfe keinen Einfluss auf die Dampfbildung einer Flüssigkeit. Dabei wird der durch die verdunstende Flüssigkeit entstehende Dampfdruck als Partialdruck bezeichnet. Es gilt das Gesetz von Dalton, wobei der Gesamtdruck eines Gasgemisches der Summe der Partialdrücke entspricht (Kuchling, 2011, S. 276-277). Hat der Sättigungsdampfdruck einer Flüssigkeit den gleichen Wert wie der Druck eines anderen, auf die Flüssigkeit drückenden Gases, so fängt die Flüssigkeit an zu siedend. Beim Siedevorgang bildet sich der Dampf nicht nur an der Grenzfläche zum anderen Gas, sondern auch im Inneren der Flüssigkeit, in Form von Blasen. Wäre der Dampfdruck der Blasen geringer als der Druck des umgebenden Gases, so würde die

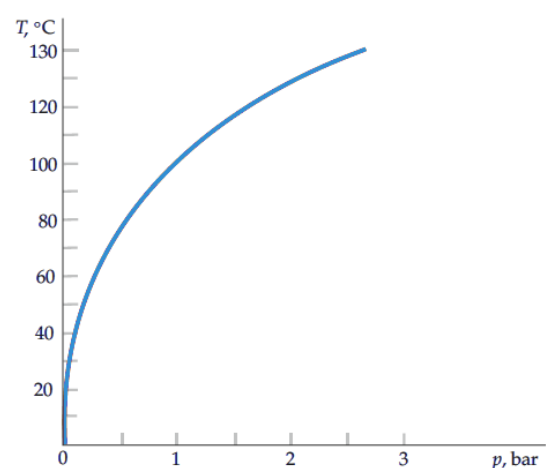


Abbildung 194: Die Siedetemperatur von Wasser in Abhängigkeit zum Luftdruck

Quelle: Tipler & Mosca, 2008, S. 560

Dampfblase in der Flüssigkeit an der Oberfläche wieder kondensieren. Aufgrund dieser Tatsache siedet Wasser beispielsweise nur unter Normaldruck $p_0 = 1013 \text{ mbar}$ bei 100°C . Aufgrund des geringeren Luftdrucks bei zunehmender Höhe (Kapitel 3.1.2), siedet Wasser über dem Meeresniveau unterhalb von 100°C (Abbildung 194) (Tipler & Mosca, 2008, S. 546; Stuart & Klages, 2010, S.110-111).

Verdampfungswärme

Wie bereits erwähnt, benötigen die Moleküle Energie, um aus der Flüssigkeit austreten zu können. Dies geschieht in Form von Wärme. Fügt man keine zusätzliche Wärmeenergie hinzu, so kann diese aus der Flüssigkeit genommen werden, wodurch sich die Flüssigkeit aufgrund von Verdampfungskälte abkühlt. Umgekehrt wird diese Energie beim Kondensieren frei. Möchte man nun 1 kg einer Flüssigkeit verdampfen, wobei die Temperatur T der Flüssigkeit konstant bleiben soll, so muss man dieser, die spezifische Verdampfungswärme λ hinzufügen. Diese lässt sich mit Hilfe der Clausius-Clapeyron-Gleichung berechnen:

$$\lambda = T \cdot \frac{dp}{dT} \cdot (v_D - v_{Fl}) \quad (138)$$

Dabei handelt es sich bei v_D um das spezifische Volumen von dem betrachteten Dampf und bei v_{Fl} um das spezifische Volumen von der betrachteten Flüssigkeit (Meschede, 2010, S. 299-300). Betrachtet man nun 100°C warmes Wasser bei Normaldruck, so beträgt die spezifische Verdampfungswärme $\lambda = 2257 \frac{\text{J}}{\text{g}}$. Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von $c_w = 4,18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$. Erwärmt man Wasser von 0°C auf 100°C , so benötigt man $4,18 \cdot 100 = 418 \frac{\text{J}}{\text{g}}$. Somit benötigt man zur Umwandlung von 100°C warmem Wasser in 100°C warmen Wasserdampf in etwa das fünffache an Energie, welche benötigt wird, um das Wasser von 0°C auf 100°C zu erwärmen. Da das Verdampfen so viel Energie benötigt, bleibt in der Natur keine Wärmeenergie für die Temperaturerhöhung übrig, wodurch das Wasser üblicherweise nicht über den Siedepunkt hinaus erwärmt wird (Stuart & Klages, 2010, S. 111-112; Tipler & Mosca, 2008, S. 568).

Schmelzwärme

Ebenso wie die Siedetemperatur ist auch die Schmelztemperatur vom Druck abhängig, wenn auch nicht so stark. Weiters benötigt man analog zum Verdampfen eine spezifische Schmelzenergie λ' um einen Stoff von der festen Phase in die flüssige Phase zu bringen. Diese berechnet sich ebenso aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung:

$$\lambda' = T \cdot \frac{dp}{dT} \cdot (v_{Fl} - v_{Fest}) \quad (139)$$

Dabei ist v_{Fest} das spezifische Volumen des betrachteten Festkörpers. Wird die zum Schmelzen benötigte Energie dem System entzogen, so kühlt sich dieses ab. (Meschede, 2010, S. 301).

Material

1 Rundkolben aus Glas

1 Stopfen

Becherglas

Hitzeschutz für Hände

Herdplatte

Kochtopf

Auffangbehälter

Trichter

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Wasser wird im Kochtopf erhitzt. Währenddessen wird der Rundkolben in das Wasser gelegt, sodass sich dieser ebenso erwärmt. Wenn das Wasser schließlich kocht, wird es mit Hilfe des Trichters in den Rundkolben eingefüllt (Abbildung 196). Dieser sollte dann in etwa halbvoll sein und wird darauffolgend mit dem Stopfen verschlossen. Das Wasser hat mittlerweile aufgehört zu siedeln. Hält man nun den Kolben über dem Auffangbehälter und übergießt ihn mit kaltem Wasser, so fängt das Wasser im Inneren des Kolbens erneut an zu kochen (Abbildung 195). Im Anschluss an das Experiment kann man sehen, dass es den Stopfen weiter nach innen gezogen hat.



Anmerkung: Achtung! Bei diesem Experiment herrscht Verbrennungsgefahr!

Physikalische Erklärung

Wenn der Sättigungsdampfdruck des Wassers dem Luftdruck entspricht, so fängt das Wasser an zu siedeln. Schüttet man das heiße Wasser in den Rundkolben, so entsteht dort Wasserdampf, welcher die Luft verdrängt. Wird der Kolben anschließend mit dem Stopfen verschlossen, so wird das Volumen, in welchem sich der Wasserdampf befinden kann, konstant. Durch das Übergießen des Kolbens mit kaltem Wasser wird der Dampf abgekühlt und kondensiert. Da flüssiges Wasser weniger Raum einnimmt als der Wasserdampf, entsteht ein Unterdruck. Entspricht der Unterdruck dem Dampfdruck des heißen Wassers im Kolben, so beginnt dieses erneut zu siedeln. In diesem Experiment wurde der Stopfen aufgrund des Unterdrucks sogar etwas in Richtung des Glasinneren gezogen.



Abbildung 196: Der Rundkolben wird mit kochendem Wasser befüllt
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 195: Durch das Übergießen mit kaltem Wasser, fängt das Innere aufgrund des Unterdrucks erneut an zu kochen
Apparatur: TU-Graz

Material

1 Dosierspritze (20 ml)

Trinkglas

Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Trinkglas wird mit lauwarmem Leitungswasser befüllt. Raumtemperatur (22°C) reicht hier vollkommen aus. Man taucht die Düse der Dosierspritze in das Wasser. Durch das Zurückziehen des Kolbens saugt man Wasser in die Spritze. Die Spritze hält man anschließend senkrecht, mit der Düse nach oben. Durch Hinaufschieben des Kolbens drückt man noch die letzten Luftblasen aus dem Hohlraum. Dichtet man daraufhin die Düse mit dem Finger ab und zieht den Kolben mit etwas Kraft nach unten, so fängt das Wasser an, bei Zimmertemperatur, zu kochen (Abbildung 197).

Physikalische Erklärung

Entspricht der Dampfdruck des Wassers dem Umgebungsdruck, so fängt es an zu kochen. Auf Meereshöhe bei Normaldruck $p_0 = 1013 \text{ mbar}$ siedet Wasser bei 100°C . Befindet sich das Wasser in der Spritze, so herrscht anfangs der Umgebungsdruck über dem Wasser, welcher den Dampfdruck des Wassers deutlich übertrifft. Durch Verschließen der Öffnung sowie Herabziehen des Kolbens verringert man den Luftdruck deutlich. Durch den geringeren Luftdruck über der Flüssigkeit ist ein geringer Dampfdruck des Wassers erforderlich um es zum Kochen zu bringen. Dies wurde in diesem Experiment erreicht.



Abbildung 197: Wasser kocht fängt bei Zimmertemperatur in der Spritze aufgrund von verringertem Luftdruck an zu kochen

Material

1 Kryophor

Flüssiger Stickstoff

Dewar-Gefäß



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experimentes wird darauf geachtet, dass sich sowohl unten im Zylinder als auch oben in der Kugel flüssiges Wasser befindet (Abbildung 198). Das zylindrische Ende des Kryophors wird in flüssigen Stickstoff gehalten. Dadurch gefriert das Wasser im Zylinder und kurze Zeit später auch oben in der Glaskugel (Abbildung 199).

Anmerkung: Im Video erkennt man, dass der flüssige Stickstoff beim Eintauchen des Kryophors zu sieden beginnt. Die Siedetemperatur t von Stickstoff liegt mit $t = -195,8^\circ\text{C}$ sehr niedrig. Da das Kryophor Raumtemperatur hat, wird dem Flüssigstickstoff genügend Wärmeenergie zugefügt, sodass dessen Dampfdruck den Luftdruck übertrifft und somit zu sieden anfängt.

Physikalische Erklärung

Das Kryophor wurde evakuiert, wodurch sich im Inneren lediglich Wasser sowie Wasserdampf befinden. Das Wasser steht mit dem Wasserdampf in einem dynamischen Gleichgewicht. Der Wasserdampf hat somit den Sättigungsdampfdruck erreicht, bei welchem gleich viele Wassermoleküle aus dem Wasser in den Dampfraum übergehen, während Moleküle aus dem Dampfraum in die Flüssigkeit übergehen. Taucht man das Kryophor nun in den flüssigen Stickstoff, so wird das Wasser im Zylinder stark gekühlt. Dabei sinkt die Bewegungsenergie der Wassermoleküle, wodurch mehr Wasser kondensieren als verdampfen kann. Somit herrscht kein dynamisches Gleichgewicht mehr und der Wasserdampfdruck sinkt. Demzufolge entsteht ein Wasserdampfdruckunterschied zwischen dem oberen und unteren Bereich, welcher dadurch ausgeglichen wird, dass vom oberen Wasser Wasserdampfmoleküle nach unten diffundieren, wodurch auch der über dem oberen Wasser liegende Wasserdampfdruck sinkt. Aufgrund des niedrigeren Drucks im oberen Wasser, verdampfen dort mehr Wassermoleküle als vom Wasserdampf kondensieren. Da das Verdampfen Energie benötigt, muss das Wasser diese aus sich selbst nehmen. Gefriert letztlich das untere Wasser, so gefriert kurz darauf auch das obere Wasser.

Der Flüssigstickstoff befindet sich in einem sogenannten Dewar-Gefäß. Das Gefäß ist doppelwandig konstruiert und dessen Zwischenraum ist evakuiert. Somit kann keine Wärmeleitung stattfinden. Wird das Gefäß verspiegelt, so kann keine Wärmestrahlung stattfinden. Wird das Gefäß letztlich mit einem Deckel verschlossen, so tritt keine Konvektion auf. Somit werden alle drei Varianten des Wärmetransports verhindert. Dadurch bleibt der Flüssigstickstoff für mehrere Tage kalt.



Abbildung 198: Kryophor mit flüssigem Wasser oben und unten

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 199: Wasser gefriert im oberen Teil des Kryophors ohne direkten Kontakt zu kaltem Flüssigstickstoff

Apparatur: TU-Graz

Material

1 Hypsoneter
1 Quecksilberthermometer
(Hypsoneterthermometer)
Spiritus
Feuerzeug
Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Teleskoparm des Hypsoneters wird ausgefahren und anschließend wird über dessen Öffnung ein wenig Wasser eingefüllt. Der Spiritusbrenner wird angezündet und am dafür vorgesehenen Platz am Hypsoneter befestigt. Über dieselbe Öffnung, in der zuvor das Wasser eingefüllt wurde, wird das Thermometer im Hypsoneter platziert. Fängt das Wasser an zu kochen, so wird die Temperatur im Dampfraum gemessen. Damit das Thermometer währenddessen nicht herausgenommen werden muss und die Messung somit ungenau wird, kann man den Teleskoparm wieder einfahren. Mit der abgelesenen Temperatur und mit Hilfe der barometrischen Formel kann im Anschluss die Höhenangabe des Ortes bestimmt werden.

Anmerkung: Das Hypsoneterthermometer hat einen eingeschränkten Skalenbereich von $95,7^{\circ}\text{C}$ – $100,2^{\circ}\text{C}$ und ist daher genauer ablesbar.

Physikalische Erklärung

Wasser fängt dann an zu kochen, wenn der Dampfdruck des Wassers dem des Luftdrucks entspricht. Da der Luftdruck mit zunehmender Höhe sinkt, fängt das Wasser mit steigender Höhe früher an zu kochen. Aufgrund der gemessenen Temperatur, bei welcher das Wasser zum Kochen anfängt, kann man über die Dampfdruckkurve (Kapitel 3.2.6) den entsprechenden Druck p ablesen. Setzt man diesen in die barometrische Höhenformel (Formel (29)) ein, so kann man die Höhe h berechnen, auf der man sich gerade befindet:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{h}{H}} \quad (140)$$

Dabei ist $p_0 = 1013 \text{ mbar}$ der Normaldruck und $H \approx 8000 \text{ m}$ die Skalenhöhe. Fängt das Wasser beispielsweise bei 80°C an zu kochen, so kann man in der Tabelle einen Druck p von $p = 473 \text{ mbar}$ ablesen. Setzt man in die barometrische Höhenformel ein und formt um, so erhält man die Höhe h (Meschede, 2010, S. 297):

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{h}{H}} \Leftrightarrow \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{h}{H} \Leftrightarrow -H \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = h \quad (141)$$

$$h = -8000 \cdot \ln\left(\frac{473}{1013}\right) \Leftrightarrow h = 6092 \text{ m} \quad (142)$$

Man würde sich somit 6092 m über dem Meeresniveau befinden. Aufgrund von klimatechnischen Vorgängen kann die tatsächliche Höhe jedoch abweichen.



Abbildung 200: Bestandteile eines Hypsometers
Apparatur: TU-Graz



Abbildung 201: Hypsometer zur Höhenbestimmung
Apparatur: TU-Graz

Material

1 trinkende Ente

1 Becherglas

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die trinkende Ente wird auf eine waagrechte Fläche gestellt.

Das bis zum Rand mit Wasser gefüllte Becherglas wird in etwa 1 cm Abstand vor die Ente gestellt. Dieses sollte in etwa hüfthoch, bemessen auf die Maße der Ente, sein.

Anschließend wird der Filzkopf der Ente mit Wasser befeuchtet. Es dauert eine Weile, doch die blaue Flüssigkeit beginnt im Röhrchen hochzusteigen, bis die Ente schließlich

nach vorne in das Wasser kippt (Abbildung 202). Während sich der Kopf im Wasser befindet, fließt die blaue Flüssigkeit aus dem Kopf hinunter (Abbildung 203). Die Ente stellt sich wieder auf und der Ablauf beginnt von vorne (Abbildung 204). Ab diesem Zeitpunkt schwingt sie.

Physikalische Erklärung

Die trinkende Ente besteht aus zwei Glaskugeln, welche durch ein Rohr miteinander verbunden sind. Die obere Kugel ist mit etwas Filz überzogen, welcher zu Beginn befeuchtet wird. In der unteren Kugel befindet sich eine Flüssigkeit, bei der es sich um Methylalkohol handelt, eine bei Zimmertemperatur schnell verdunstende Flüssigkeit. Über dem flüssigen Methylalkohol befindet sich der entsprechende Dampf. Durch das Befeuchten des Filzes mit Wasser beginnt dieses sogleich zu verdampfen. Die dafür benötigte Energie wird der Umgebung des Filzes entzogen, wodurch sich die obere Kugel abkühlt. Der Methylalkohol-Dampf im Kopf der Ente kühlt ab und kondensiert, wodurch ein Unterdruck entsteht. Aufgrund des Unterdrucks steigt der flüssige Alkohol nach oben, wodurch die Ente in weiterer Folge nach vorne kippt. Durch das Kippen verschiebt sich die Flüssigkeit in der unteren Kugel so, dass das untere Ende des Steigrohrs aus dieser herausragt (Abbildung 203). Da der Dampf eine geringere Dichte hat als die Flüssigkeit, steigt dieser nach oben, um den Druck auszugleichen, während die Flüssigkeit nach unten sinkt. Im Wasserglas angekommen, wird der Filzkopf erneut befeuchtet und der Kreislauf beginnt von vorne (Leifi Physik, 2019).

Würde man die Ente mit dem Wasserglas in ein abgeschlossenes Aquarium stellen, so würde sich die Bewegung nach einiger Zeit einstellen, da sich beim Wasser der Sättigungsdampfdruck einstellen würde und somit kein Wasser mehr verdunsten könnte.



Abbildung 202: Beginn des Flüssigkeits- sowie Dampfaustausches

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 203: Fortgeschrittener Austausch – das Gewicht der Ente verlagert sich nach hinten

Apparatur: TU-Graz



Abbildung 204: Durch ständige Verlagerung des Schwerpunktes, beginnt die Ente zu wippen

Apparatur: TU-Graz

Material

1 Thermometer
1 Glasgefäß (mittel)
1 Löffel
Salz
Schnee oder Eis
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Schnee wird in das Glasgefäß gefüllt. Zur Demonstration zeigt man die Temperatur des Schnees bevor man mit dem Experiment fortfährt (Abbildung 205). Diese liegt ungefähr bei 0°C oder auch leicht darunter. Nun fügt man dem Schnee etwa zwei bis drei Kochlöffel Salz hinzu und rührt den Inhalt anständig um. Da der Schnee während des Rührens in sich zusammenfällt, kann man zwischendrin wieder etwas Schnee beimengen. An der Außenseite des Glases bildet sich nach einiger Zeit eine Eisschicht, bei welcher es sich um gefrorene Luftfeuchtigkeit handelt. Dieser Vorgang ist die Resublimation von Wasser

aus dem gasförmigen Zustand in den festen Zustand (Kapitel 2.2.2). Bereits daran merkt man, dass die Temperatur gesunken ist. Misst man folglich die Temperatur des Schnee-Salz-Gemisches, so wird bestätigt, dass die Temperatur deutlich gesunken ist (Abbildung 206). Bei der dargestellten Mischung konnten Temperaturen von bis zu -17°C gemessen werden.

Anmerkung: Hat man keinen Schnee zur Verfügung, so kann man dieses Experiment mit einem Eiskwürfel-Wasser-Gemisch durchführen.

Physikalische Erklärung

Beim Mischen von Salz mit Schnee entsteht eine Salzwasserlösung mit sehr niedriger Temperatur. Einerseits wird Wärmeenergie für das Lösen von Salz im Wasser benötigt, andererseits benötigt man Energie für den Übergang von der festen in die flüssige Phase. In beiden Fällen wird die Energie dem System entzogen, wodurch die starke Abkühlung zustande kommt. Mit 100 g Wasser/Eis und 31 g Kochsalz lässt sich laut Literatur eine Temperatur von -21°C erreichen (Kuchling, 2011, S. 272; Stuart & Klages, 2010, S. 109). Dieser Wert wurde in vorliegender Durchführung mit -17°C annähernd erreicht.



Abbildung 205: Schnee in einem Glasgefäß – Die Temperatur liegt in etwa bei 0°C



Abbildung 206: Durch Hinzufügen von Salz kühlt sich das Gemisch auf -17°C ab

Material

1 Becherglas
1 Stahlkugel mit Stab
1 Laborgasbrenner
Sicherheitshandschuhe
Wasserkocher
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zu Beginn des Experiments wird das Wasser mit dem Wasserkocher zum Sieden gebracht und anschließend in das Becherglas gefüllt. Im Anschluss erhitzt man die Stahlkugel in etwa fünf Minuten lang mit dem Laborgasbrenner. Wenn die Kugel ausreichend erhitzt ist, hält man sie in das Wasser. Man kann beobachten, wie sich um die Metallkugel eine Wasserdampfschicht bildet, welche die Wasserschicht von der Metallkugel trennt (Abbildung 208). Nach kurzer Zeit wird die Dampfschicht labil und das Wasser fängt an der Kugel an zu kochen. Weiters erkennt man, dass die Dampfschicht silbern, glänzend erscheint (Exp. [75]).

Physikalische Erklärung

Durch das Erhitzen der Stahlkugel hat diese eine Temperatur, welche weit über dem Siedepunkt von Wasser liegt. Beim Eintauchen der Kugel wird das anliegende Wasser derart schnell erhitzt, dass es augenblicklich verdampft. Die Kugel wird von einer Dampfschicht umschlossen, welche das außerhalb liegende Wasser von der heißen Kugel trennt. Da es sich bei Gasen um deutlich schlechtere Wärmeleiter handelt als bei Flüssigkeiten, wird das umliegende Wasser deutlich langsamer erhitzt als dies ohne Dampfschicht der Fall wäre. Nach einer Weile wird das angrenzende Wasser dennoch so weit erwärmt, dass auch dieses zu sieden anfängt, wodurch sich die Dampfschicht nach und nach auflöst (Stuart & Klages, 2010, S. 118).

Dieses Phänomen ist auch im Alltag des Öfteren zu beobachten, wenn ein Tropfen Wasser in eine heiße Pfanne oder auf eine heiße Herdplatte gelangt. Dabei bildet sich unter diesem eine Dampfschicht, welche nicht entweichen kann. Aufgrund der Dampfschicht kann sich der Tropfen beinahe reibungsfrei in der Pfanne bewegen (Abbildung 207).



Abbildung 207: Leidenfrosteffekt in einer erhitzten Pfanne



Abbildung 208: Leidenfrosteffekt – es bildet sich eine Wasserdampfschicht um die Stahlkugel

Material

1 Wasserbehälter

Wasserkocher

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment sind sehr geringe Außentemperaturen notwendig. Bei folgender Durchführung betrug die Außentemperatur -14°C . Mit Hilfe des Wasserkochers wird das Wasser erwärmt. Dieses wird schnellstmöglich in einen Wasserbehälter umgefüllt und in das Freie gebracht. Nun wird das Wasser mit einer schnellen Bewegung nach oben aus dem Behälter katapultiert (Abbildung 209) oder auch durch eine Halbkreisbewegung über dem Körper ausgeschüttet (Abbildung 210). Sobald das Wasser aus dem Behälter geschüttet wird, gefriert es schlagartig in der Luft. Versucht man dasselbe Experiment mit kaltem Wasser, so geschieht nichts und das Wasser bleibt weiterhin flüssig. Vergleicht man das warme und heiße Wasser, welches am Boden aufgekommen ist, so stellt man fest, dass das kalte Wasser weiterhin flüssig bleibt, während das heiße Wasser sofort gefriert.



Anmerkung: Achtung! Bei diesem Experiment herrscht Verbrennungsgefahr!

Physikalische Erklärung

Im Gegensatz zum Wasser bei Raumtemperatur verdampft hier das heiße Wasser in einem deutlich höheren Ausmaß. Für das Verdampfen wird Wärmeenergie benötigt. Da diese nicht extern zugeführt wird, muss die Wärme aus dem eigenen System entnommen werden, wodurch sich das wenig verbleibende Wasser so stark abkühlt, dass es gefriert. Das verdampfte Wasser kondensiert an der kalten Außenluft und gefriert anschließend, wodurch die Wolke in Erscheinung tritt.

Im Vergleich dazu verdampft das kalte Wasser kaum, wodurch deutlich weniger Wärmeenergie entnommen wird. Weiters befinden sich dadurch beinahe alle Moleküle im flüssigen Zustand und sind somit stets kompakter beieinander wodurch das Wasser nicht stark genug abgekühlt werden kann.



Abbildung 209: Mpemba-Effekt mit kochendem Wasser und besonders niedrigen Außentemperaturen



Abbildung 210: Gefrierender Wasserdampf mit nach oben hin entstehenden gefrorenen Wassertropfen

3.2.7 Wirkung von Siede- und Kristallisationskeimen

[66] DER SIEDEVERZUG

Material

1 Trinkglas (klein)

Hitzeschutz für Hände

Destilliertes Wasser

1 Holzstab

Mikrowelle



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment benötigt man ein sehr sauberes, beinahe keimfreies Glas. Dieses wird mit destilliertem Wasser befüllt und für ca. zwei Minuten in die Mikrowelle gestellt. Mit Hilfe von Schutzhandschuhen stellt man das erhitzte Glas vorsichtig auf die Arbeitsfläche. Das Wasser kocht nicht (Abbildung 211). Haltet man nun einen Holzstab in das Wasser, so fängt es plötzlich an zu siedend.

Anmerkung: Die Zeit in der Mikrowelle kann je nach Wassermenge und Wattanzahl abweichen. Die in diesem Experiment verwendete Mikrowelle hat 800 W. Als Hilfestellung kann neben das Glas mit destilliertem Wasser auch ein Glas mit Leitungswasser in die Mikrowelle gestellt werden. Fängt das Leitungswasser an zu kochen, sollte das destillierte Wasser kurz davor sein und somit aus der Mikrowelle entnommen werden.



Anmerkung: Achtung! Bei diesem Experiment herrscht Verbrennungsgefahr!

Physikalische Erklärung

Das physikalische Phänomen hinter diesem Experiment ist der sogenannte Siedeverzug. Wie bereits in Kapitel 3.2.6 beschrieben, siedet Wasser bei 100°C unter Normaldruck. Geht ein Stoff in einen anderen Aggregatzustand über, so handelt es sich dabei um einen Keimbildungsprozess. Solch ein Prozess wird durch einen zufällig gebildeten Keim in Gang gesetzt. Bei diesem Keim handelt es sich um eine Ansammlung winziger Dampfblasen. Einzeln sind diese kleinen Dampfblasen so klein, dass sie nicht überlebensfähig sind. In diesem Experiment wird das Wasser, aufgrund seines Dipolcharakters, durch die elektromagnetische Strahlung der Mikrowelle in Bewegung versetzt, was wiederum zur Erwärmung führt. Obwohl das Wasser über die Siedetemperatur erhitzt wird, kommt es zu keiner Verdampfung. Dies wird Siedeverzug genannt. Es können sich keine Siedekeime bilden, wodurch sich die Flüssigkeit über die Siedetemperatur erhitzt. Beim Siedeverzug entstehen durch das Zuführen eines Fremdkörpers, Siedekeime, welche zum explosionsartigen Verdampfen der Flüssigkeit führen. Der Siedeverzug wird wie in diesem Experiment durch glatte Wände des Glases, geringe Durchmischung sowie einen hohen Reinheitsgrad der Flüssigkeit begünstigt (Schatz & Tammer, 2015, S. 198; Baehr & Stephan, 2013, S. 558-559; Povh & Soergel, 2014, S. 272).



Abbildung 211: Wasser wird über die Siedetemperatur hinaus erhitzt und es kommt zum Siedeverzug



Abbildung 212: Durch Zuführen eines Fremdkörpers entstehen Siedekeime, welche zum Verdampfen der Flüssigkeit führen

Material

1 Flasche stilles Wasser

Gefrierschrank

Geschirrtuch



Variante 2

1 Flasche stilles Wasser

1 Eiswürfel

Gefrierschrank



Variante 3

1 Flasche stilles Wasser

1 Trinkglas (klein)

1 Eiswürfel

Gefrierschrank



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für jedes Experiment wird eine Flasche stilles Wasser in den Gefrierschrank gelegt. Bei -14°C bleiben die Flaschen, je nach Größe drei bis vier Stunden darin gelagert. Für die erste Variante wird die Flasche (das Wasser darf noch nicht gefroren sein) mit ruhiger Hand aus dem Gefrierschrank entnommen und das Kondenswasser abgewischt (siehe Abbildung 213). Der Flaschenboden wird kräftig gegen die Arbeitsfläche geschlagen. Man kann beobachten, wie das Wasser langsam gefriert (Abbildung 214 und Abbildung 215). Bei der zweiten Variante wird die Flasche ebenso ruhig aus dem Gefrierschrank genommen und anschließend geöffnet. Ein Eiswürfel wird auf der Arbeitsfläche platziert (Abbildung 216). Über diesen wird das gekühlte Wasser langsam ausgegossen. Es beginnt ein Eiszapfen empor zu wachsen (Abbildung 217).

Bei Variante drei wird das, ebenso mit Vorsicht gehandhabte Wasser, in ein Trinkglas geleert. In dieses wirft man nun einen Eiswürfel (Abbildung 218). Sofort beginnen sich von diesem weg Eiskristalle zu bilden (Abbildung 219 und Abbildung 220).

Physikalische Erklärung

Beim Erstarren einer Flüssigkeit handelt es sich um einen Keimbildungsprozess. In diesem Experiment wurde stilles Wasser deutlich unter 0°C abgekühlt. Üblicherweise gefriert Wasser unter 0°C , wenn sich darin Keime bilden, bei welchen es sich um eine Ansammlung winziger Eiskristalle handelt. Beim Bilden von Keimen wird Energie frei, wodurch das Wasser eine geringfügige Unterkühlung erreichen muss. Erreicht der Eiskristall keine Minimalgröße, so ist er labil und verschwindet wieder. Erst ab einer gewissen Größe ist solch ein Keim stabil und das Wasser kann gefrieren. Da es sich beim stillen Wasser um reines Wasser mit wenig Verunreinigungen handelt, kann das Wasser weit unter den Gefrierpunkt abgekühlt werden, da sich keine Kristallisationskeime bilden. Dies wird durch die glatte Flaschenwand begünstigt. Durch das Zuführen von Verunreinigungen oder auch Eiskristallen, erstarrt das umliegende Wasser, von dem Keim ausgehend. Wird die Flasche kräftig auf einen Tisch gestoßen, so können mehrere winzige Eiskristalle aneinandergeraten und das Wasser gefriert. Dabei wird Energie freigesetzt. Auf diesem Prinzip basiert beispielsweise ein Handwärmekissen (Schatz & Tammer, 2015, S. 198; Kopitzki & Herzog, 2004, S. 431).



Abbildung 213: Unterkühltes Wasser im flüssigen Zustand



Abbildung 214: Eindeutige Eis- und Kristallbildung aufgrund beträchtlicher Unterkühlung



Abbildung 215: Erkennbare Kristallstruktur im unterkühlten, gefrorenen Wasser



Abbildung 216: Eiskwürfel vor dem Übergießen mit unterkühltem Wasser



Abbildung 217: Durch das Übergießen des Eiskwürfels mit unterkühltem Wasser bildet sich Eis



Abbildung 218: Ein Eiswürfel wird in unterkühltes Wasser gegeben



Abbildung 219: Durch das Einwerfen bilden sich Kristallisationskeime und Eiskristalle entstehen



Abbildung 220: Eiskristalle bilden sich an den Eiswürfeln

Material

Seifenblasenflüssigkeit

Strohhalme

Glasplatte



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Glasplatte wird eine halbe Stunde vor Durchführung des Experiments, gemeinsam mit der Seifenblasenflüssigkeit nach draußen zum Abkühlen gestellt. Nach dem Abkühlen wird die Platte waagrecht hingelegt und mit der Seifenblasenflüssigkeit bedeckt. Nun taucht man eine Seite des Strohhalmes in die Mischung und bläst anschließend so auf die Glasplatte, dass sich dort eine Seifenblasen-Halbkugel bildet. Je nach Außentemperatur gefriert die

Seifenblase mit variierender Geschwindigkeit. Ebenso fällt auf, dass die Eiskristalle bei unterschiedlicher Temperatur verschiedenartige Formen annehmen.

Anmerkung: Für dieses Experiment werden kalte Außentemperaturen benötigt. Folgende Versuche konnten nur bei Temperaturen unterhalb von -4°C durchgeführt werden.

Physikalische Erklärung

Damit das Wasser der Seifenblase gefrieren kann, muss es unterkühlt sein. Durch die geringe Temperatur entstehen kleine Eiskristalle, die ab einer bestimmten Größe wachstumsfähig sind. Dies sind die sogenannten Kristallisationskeime, die notwendig sind, damit eine Flüssigkeit erstarren kann. Im Video ist gut erkennbar, wie sich die Eiskristalle von den Keimen ausbreiten. Aufgrund der hexagonalen Molekülstruktur von Eis, ist die Grundstruktur eines Eiskristalls sechseckig. Abhängig von Umgebungsfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und anderen Störungen bildet sich ein Kristall unterschiedlich aus. Beispiele für die Formen sind hexagonale Plättchen, Prismen, Dendriten usw. Die Form der Kristalle kann so stark variieren, dass es bis zu $10^{5 \cdot 10^6}$ Möglichkeiten gibt. Bei den Eisblumen, wie sie in Abbildung 221 und Abbildung 222 zu sehen sind, breiten sich die hexagonalen Strukturen unterschiedlich schnell in diverse Richtungen aus (Hopp, 2016, S. 70 ff.). Unterschiedlichste Kristallformen kann man ebenfalls beobachten, wenn man Schneeflocken betrachtet.



Abbildung 221: Gefrorene Seifenblase auf Glasplatte mit sich ausbreitendem Muster einer Eisblume



Abbildung 222: Gefrorene Seifenblase auf Schnee mit sich ausbreitendem Muster einer Eisblume



Abbildung 223: Gefrorene Seifenblase auf Glasplatte mit sechseckigem Eiskristallmuster

3.2.8 Wasser und Feuer

[69] UNTER WASSER BRENNENDER STERNSPRITZER

Material

1 Trinkglas (mittel)

6 Sternspritzer

Isolierband

Feuerzeug

Feuerlöscher

Schutzbrille

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Trinkglas wird mit Wasser gefüllt. Ein einzelner Sternspritzer wird angezündet (Abbildung 224) und in das Wasser getaucht. Dieser brennt ganz kurz weiter, erlischt jedoch sehr schnell nach dem Eintauchen (Abbildung 225). Dabei erkennt man auch, dass ein paar Bläschen aufsteigen. Im nächsten Schritt wickelt man fünf Sternspritzer mit dem Isolierband so zusammen, dass nur noch der oberste Zentimeter der Wunderkerzen herausragt. Zündet man diese an und taucht sie unter Wasser, so erlöschen diese nicht (Abbildung 226). Die Sternspritzer brennen unter Wasser weiter, es entzündet sich sogar eine Flamme oberhalb des Wasserpegels (Abbildung 227).



Anmerkung: Dieses Experiment ist gefährlich und sollte keinesfalls leichtfertig vorgezeigt werden. Es besteht Brandgefahr! Es muss unbedingt ein Feuerlöscher bereitstehen, sowie eine Schutzbrille getragen werden.

Physikalische Erklärung

Damit ein Material zu brennen anfängt, muss eine sogenannte Entzündungstemperatur erreicht werden. Weiters wird für den Brennvorgang Sauerstoff benötigt. Ein Sternspritzer besteht aus einem Draht, um welchen das Brennmaterial mit Hilfe von Stärke befestigt wird. Beim Brennmaterial handelt es sich um Aluminiumpulver, Eisenpulver sowie Bariumnitrat. Beim Entzünden von Bariumnitrat wird Sauerstoff freigesetzt. Mit Hilfe dieses Sauerstoffs kann das Aluminiumpulver verbrennen, wodurch eine so große Hitze entsteht, dass die Eisenteilchen zu glühen anfangen.

Befindet sich nur ein Sternspritzer im Wasser, so wird dieser soweit vom Wasser gekühlt, dass die Zündtemperatur unterschritten wird. Befinden sich mehrere Wunderkerzen nebeneinander unter Wasser, umwickelt mit einem Klebeband, so werden diese nicht ausreichend gekühlt um zu erlöschen. Der Sauerstoff bildet sich aus der Reaktion des Bariumnitrats. Weiters entsteht Wasserstoff, welcher anfängt zu brennen. (Kuhnen & Luck-Haller, 2016, S. 8; Martin & de Vries, 2004, S. 19).

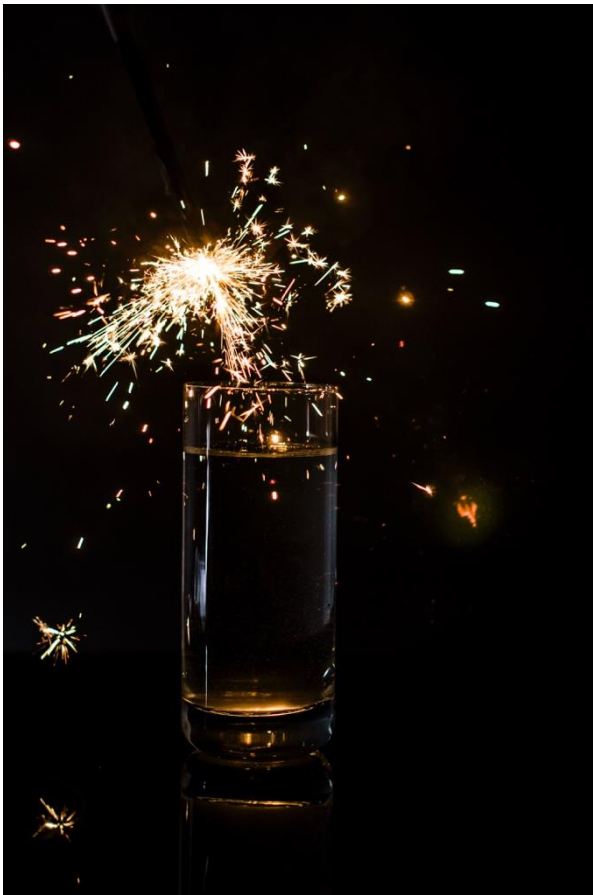


Abbildung 224: Entzündeter Sternspritzer

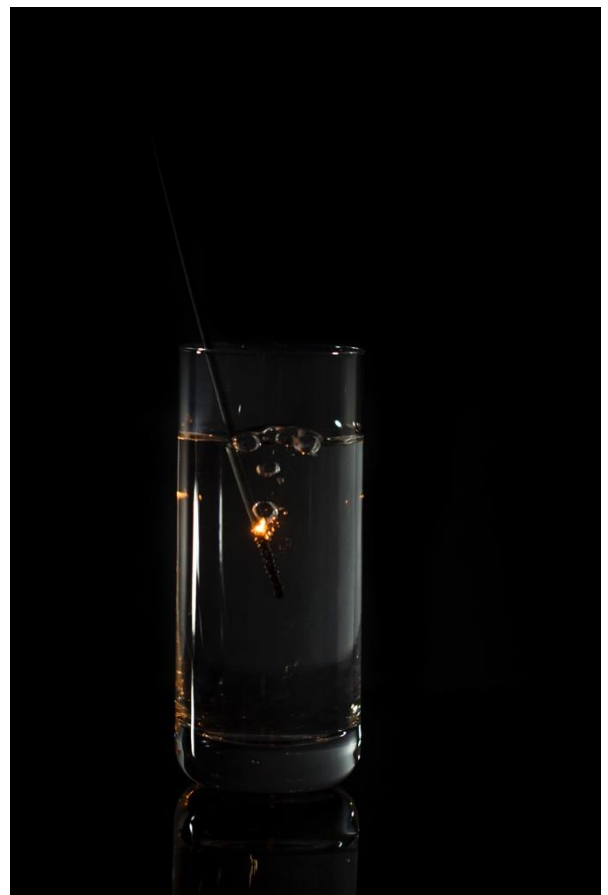


Abbildung 225: Entzündeter Sternspritzer wird in ein Wasserglas gehalten und erlischt sofort



Abbildung 226: Fünf entzündete Sternspritzer, welche unter Wasser weiterbrennen

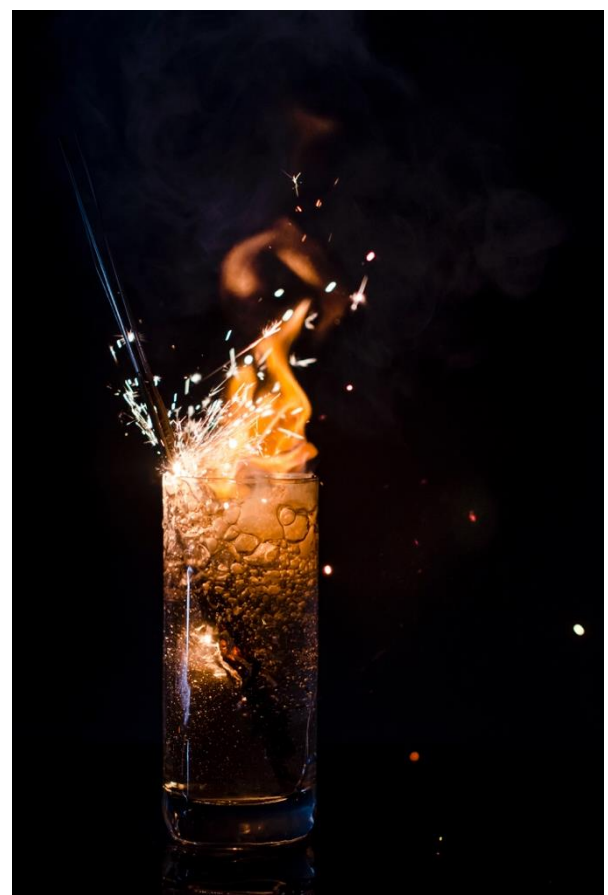


Abbildung 227: Wasserstoff entzündet sich an der Oberfläche des Wasserglases

Material

1 Glasgefäß (groß)

1 Löffel

1 Flasche Butan

Spülmittel

Feuerzeug

Feuerlöscher

Schutzbrille

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das Glasgefäß wird ca. 2 cm hoch mit Wasser befüllt. Diesem wird ein Spritzer Spülmittel hinzugefügt. Mit dem Löffel wird alles gut miteinander vermengt. Das Ventil der Butanflasche wird so gegen den Boden des Behälters gedrückt, dass das Gas entweichen kann. Es entstehen Schaumblasen, gefüllt mit Butan. Die Hand wird nun mit kaltem Wasser befeuchtet. Anschließend greift man sich etwas Schaum aus dem Behälter (Abbildung 228) und zündet diesen auf der Hand an (Abbildung 229).



Anmerkung: Dieses Experiment ist gefährlich. Es muss unbedingt ein Feuerlöscher bereitstehen, sowie eine Schutzbrille getragen werden. Die Hand muss auf jeden Fall zuvor ausreichend befeuchtet werden. Des Weiteren darf auch nicht zu viel Schaum angezündet werden, da es ansonsten zu einer zu großen Stichflamme und somit hoher Verbrennungsgefahr kommt.

Physikalische Erklärung

Butan hat bei 20°C als Gas eine Dichte von $\rho_{Butan} = 2,54 \frac{kg}{m^3}$ (Gossing, 1997, S. 65). Diese ist deutlich geringer als die Dichte von Wasser, welche bei knapp $1000 \frac{kg}{m^3}$ liegt. Somit treibt das Gas aufgrund des Archimedischen Prinzips (Kapitel 3.1.3) nach oben und schwimmt an der Oberfläche, da es eine höhere Dichte hat als Luft mit $\rho_{Luft} = 1,20 \frac{kg}{m^3}$ (Synwoldt, 2016, S. 140). Beim Durchdringen der Wasseroberfläche, welche mit Tensiden besetzt ist, bilden sich mit Butan gefüllte Seifenblasen. Zündet man diese an, so verbrennt das Butan. Man kann die Flammen in der Hand halten, da der Verbrennungsvorgang nur sehr kurz andauert. Weiters bestehen die Seifenblasen zum Teil aus Wasser, welches zum Verdampfen Energie benötigt. Diese Energie kommt aus dem Verbrennungsvorgang, wodurch weniger Wärmeenergie auf die Haut übertragen wird. Dasselbe gilt für das Wasser auf der Haut, welches beim Befeuchten zurückbleibt.



Abbildung 228: Schaum bestehend aus Wasser, Spülmittel und Butan



Abbildung 229: Entzündeter Butan-Schaum

3.3 Versuche zur Optik

3.3.1 Reflexion, Brechung und Absorption

Licht

Die Beschreibung von Licht ist sehr komplex, da es einerseits Welleneigenschaften aufweist und auf der anderen Seite einen Teilchencharakter besitzt. Dies ist bekannt als Wellen-Teilchen-Dualismus (Gerhard, 2016, S. 6). Betrachtet man sichtbares Licht mit seinen Welleneigenschaften, so versteht man darunter elektromagnetische Strahlung, die vom Menschen wahrgenommen werden kann. Dieser wahrgenommene Bereich liegt bei 380 nm bis 780 nm (Abbildung 230) (Tipler & Mosca, 2008, S. 1007).

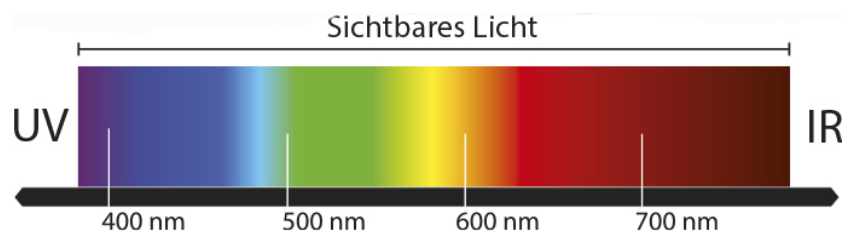


Abbildung 230: Sichtbares Licht im Wellenbereich von 380 nm bis 780 nm

Quelle: <https://www.inspect-online.com/topstories/vision/uv-und-ir-beleuchtungen-erweitern-die-sichtbarkeit>

Mit Hilfe der Wellentheorie lassen sich eine Vielzahl von Phänomenen, wie beispielsweise die Reflexion oder auch die Interferenz beschreiben. Aufgrund der sehr geringen Wellenlänge kann man Licht sehr oft durch Strahlen beschreiben. Dadurch lassen sich beispielsweise Reflexion oder die Brechung von Licht beschreiben, jedoch nicht die Interferenz. Der Strahl zeigt dabei in die Ausbreitungsrichtung der Wellenfront und steht senkrecht auf der Wellenfront. Betrachtet man die Erscheinungen, die durch die Welleneigenschaft zu erklären sind, so befindet man sich im Teilgebiet der Wellenoptik. Wird das Licht jedoch als Strahl betrachtet, so befindet man sich im Teilgebiet der Strahlenoptik. Wird Licht letztlich als masseloses Photon und somit Teilchen betrachtet, so umfasst dies das Teilgebiet der Quantenoptik. Mit Hilfe der Teilcheneigenschaft, lässt sich zum Beispiel der Photoelektrische Effekt beschreiben, wie er bei einer Solarzelle vorkommt (Tipler & Mosca, 2008, S. 1011).

Brechungsindex

Licht breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von $c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ geradlinig aus.

Die Lichtgeschwindigkeit ist im Vakuum am schnellsten und somit in anderen, durchsichtigen Medien vergleichsweise langsamer. Der Geschwindigkeitsunterschied in einem optisch dichteren Medium lässt sich durch den sogenannten Brechungsindex n eines Mediums beschreiben:

$$n = \frac{c}{c_n} \quad (143)$$

Dabei ist der Brechungsindex definiert als Quotient der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im gegebenen Medium. Vakuum hat einen Brechungsindex n_{Vakuum} von 1, während Wasser mit einem Brechungsindex $n_{\text{Wasser}} = 1,33$ optisch dichter ist (Gerhard, 2016, S. 28-29).

Das Prinzip von Huygens

Das Prinzip von Huygens besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront der Ausgangspunkt einer neuen Welle ist. Die Überlagerung dieser neuen Wellen, auch Elementarwellen genannt, bildet eine neue Wellenfront (Abbildung 231). Die Elementarwellen breiten sich mit gleicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung wie die Ausgangswelle aus, so lange sich diese im gleichen Medium befindet (Tipler & Mosca, 2008, S. 515).

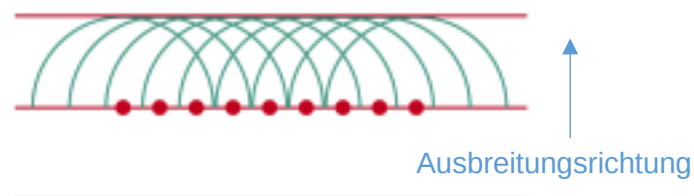


Abbildung 231: Prinzip von Huygens-Fresnel
Quelle: <https://psi.physik.kit.edu/english/147.php>

Brechung

Trifft nun eine solche Wellenfront schräg auf eine Grenzfläche zweier unterschiedlicher Medien, so breiten sich die Elementarwellen beim Aufttrittspunkt mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Da die Wellenfront jedoch nicht gleichzeitig bei der Grenzfläche eintrifft, ändert sich somit die Richtung der überlagerten und dadurch entstandenen neuen Wellenfront (Abbildung 232) (Gerhard, 2016, S. 30).

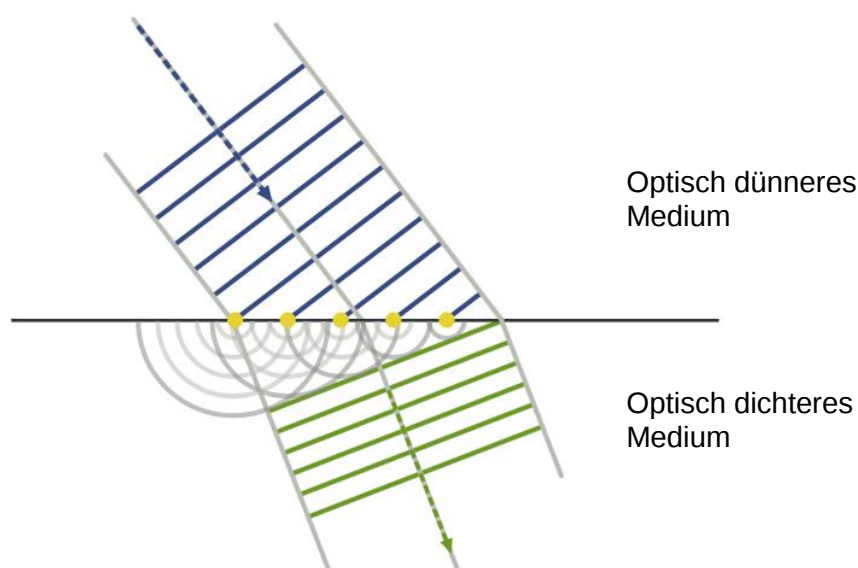


Abbildung 232: Brechung einer Wellenfront an der Grenzfläche zweier Medien
Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Huygenssches_Prinzip#/media/File:Refraction_-_Huygens-Fresnel_principle.svg

Im Folgenden wird die Brechung zur Vereinfachung in der Strahlenoptik betrachtet. Dazu denkt man sich ein Lot senkrecht zur Grenzfläche. Fällt nun ein Lichtstrahl schräg auf diese Grenzfläche, so wird er beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium zum Lot hin gebrochen. Findet jedoch ein Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium statt, so wird er der Lichtstrahl vom Lot weg gebrochen. Beschrieben wird der Übergang anhand des Snellius'schen Brechungsgesetzes von Willebrod Snellius (1581-1626):

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2) \quad (144)$$

Dabei ist n_1 das Medium, aus dem der Lichtstrahl kommt, und n_2 das Medium, in welches er sich hineinbewegt. α_1 beschreibt den Winkel zwischen Lot und einfallendem Lichtstrahl und α_2 beschreibt den Winkel zwischen Lot und gebrochenem Lichtstrahl (Abbildung 234) (Gerhard, 2016, S. 30; Kistner, 1919, S. 125).

Reflexion

Trifft ein Lichtstrahl auf eine glatte Oberfläche, so wird er reflektiert. Dabei ist der Winkel α_1 zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und dem Lot gleich dem Winkel α_1 zwischen dem reflektierten Lichtstrahl und dem Lot (Abbildung 234). Trifft der Lichtstrahl auf eine raue Oberfläche, so wird das Licht diffus reflektiert. Dabei gilt jedoch ebenso, dass der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht (Abbildung 233).

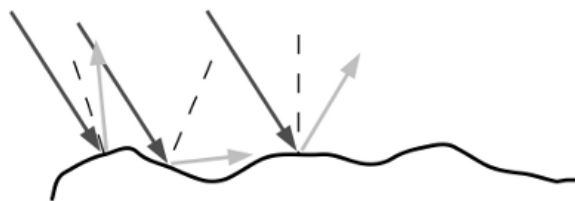


Abbildung 233: Reflexion an einer rauen Oberfläche

Quelle: <https://physik.wissenstexte.de/refdiffus.png>

Fällt ein Lichtstrahl auf eine Grenzschicht zweier durchsichtiger Medien, so wird ein Teil des Lichtes reflektiert und ein Teil des Lichtes gebrochen (Abbildung 234).

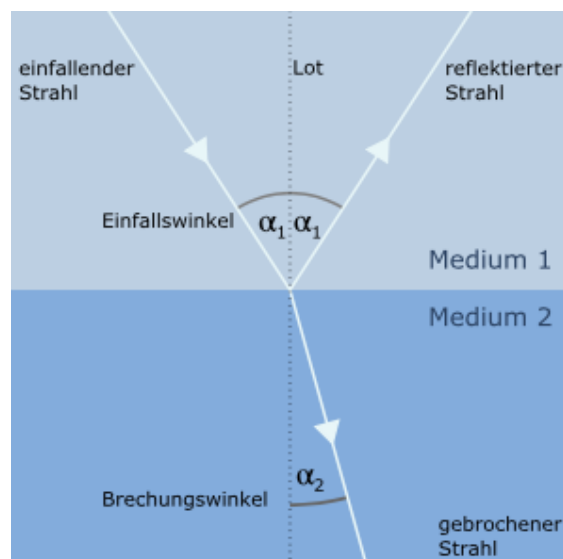


Abbildung 234: Reflexion Und Brechung am Übergang von Luft zu Wasser

Quelle: <https://www.leifiphysik.de/optik/lichtbrechung>

Betrachtet man den Übergang von einem optisch dichteren zu einem optisch dünneren Medium, so gibt es einen Grenzwinkel α_G zwischen Lot und Lichtstrahl, bis zu welchem der Lichtstrahl das dichtere Medium verlassen kann. Wird der Winkel überschritten, so findet nur noch Reflexion statt. Dies wird als Totalreflexion bezeichnet. Der Grenzwinkel lässt sich berechnen durch:

$$\sin(\alpha_G) = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (145)$$

Dabei ist n_1 der Brechungsindex des optisch dichteren Mediums mit dazugehöriger Lichtgeschwindigkeit c_1 und n_2 ist der Brechungsindex des optisch dünneren Mediums mit dazugehöriger Lichtgeschwindigkeit c_2 (Kuchling, 2011, S. 361 & 366).

Absorption

Bewegt sich ein Lichtstrahl durch ein durchsichtiges Medium, so verliert er dabei einen Teil seiner Intensität. Diese Abschwächung wird durch Absorption verursacht und ist material-, als auch wellenlängenabhängig. Die Absorption wird für monochromatisches Licht durch das Lambert-Beersche-Gesetz beschrieben:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (146)$$

Dabei ist $I(x)$ die Intensität nach der Schichtdicke x , $I(0)$ ist die Anfangsintensität und α ist der Absorptionskoeffizient. Der Absorptionskoeffizient α berechnet sich aus der Konzentration c und dem wellenlängenabhängigen Extinktionskoeffizienten ε (Gerhard, 2016, S. 37; Meschede, 2010, S. 574):

$$\alpha = c \cdot \varepsilon \quad (147)$$

Die Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie dem Material rührt daher, dass wenn sich das Licht durch ein Material bewegt, die Elektronen der Moleküle von diesem angeregt werden können. Da die Energiezustände von Atomen jedoch diskret sind, benötigt man immer eine bestimmte Energie E :

$$E = h \cdot f \quad (148)$$

Dabei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ und f die Frequenz der Strahlung. Mit $c = \lambda \cdot f$ folgt die von der Wellenlänge λ abhängige Energie:

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (149)$$

Die dabei absorbierte Energie wird beispielsweise in Wärmeenergie umgewandelt (Kuchling, 2011, S. 537-574; Meschede, 2010, S. 104).

Material

1 rechteckiges Glasgefäß
1 Sprühflasche
1 Löffel
Spülmittel
Laserpointer

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Das rechteckige Glasgefäß wird ca. dreiviertel voll mit Wasser befüllt. Dem Wasser wird noch etwas Spülmittel beigelegt und mit Hilfe des Löffels wird alles gut miteinander vermengt. Leuchtet man nun mit dem Laserpointer von schräg unten in das Becken, so kann man erkennen, dass der Lichtstrahl sowohl an der Wasseroberfläche, als auch am Boden des Gefäßes reflektiert wird (Abbildung 235).

Sprüht man Wasser mit Hilfe einer Sprühflasche über das Gefäß, so erkennt man, dass ein Teil des Lichts am Glas reflektiert wird und weiters ein Teil des Lichts aus der Wasseroberfläche austritt (Abbildung 236). Hier kann man den Winkel des einfallenden Lichts so lange variieren, bis kein Licht mehr austritt. Lässt man den Laserstrahl nun von schräg oben in das Wasser einfallen und nimmt die Sprühflasche zu Hilfe, so erkennt man, dass der Lichtstrahl geknickt wird. Des Weiteren erkennt man, dass die Reflexion des Lichtes an der Wasseroberfläche sowie der doppelt gebrochene Strahl parallel zueinander sind (Abbildung 237).

Anmerkung: An den Ecken des Behälters ist der Lichtstrahl gebogen, da auch der Behälter dort gebogen ist.

Physikalische Erklärung

Der Laserstrahl wird durch die Beigabe von Tensiden, aufgrund des Tyndall-Effekts, sichtbar (Kapitel 3.3.3). In Abbildung 235 erkennt man die Reflexion, bei welcher der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht. Spritzt man Wasser mit der Sprühflasche in die Umgebung des Gefäßes, so wird sichtbar, dass nur ein Teil des Lichtes reflektiert wird. Sichtbar werden die austretenden Strahlen, da diese an den kleinen Wassertropfen gestreut werden. Jener Teil des Strahls, der nicht an der Wasseroberfläche reflektiert wird, wird gebrochen. Da es sich beim Übergang von Wasser zu Luft um einen Übergang von einem dichteren zu einem dünneren Medium handelt, wird der Laserstrahl vom Lot weg gebrochen (Abbildung 236). Betrachtet man den Übergang von Luft zu Wasser, so handelt es sich um einen Übergang von einem optisch dünneren zu einem optisch dichteren Medium und der ein Teil des Lichtstrahls wird zum Lot gebrochen. Dieser Lichtstrahl wird in Abbildung 237 anschließend reflektiert (Einfallswinkel ist Ausfallswinkel) und beim Übergang von Wasser zu Luft erneut gebrochen, diesmal vom Lot weg. Betrachtet man den zweifach-gebrochen Strahl, so ist dieser parallel zum reflektierten Anteil, da das Licht laut Snellius stets im gleichen Winkel zum Lot bzw. vom Lot weg gebrochen wird.

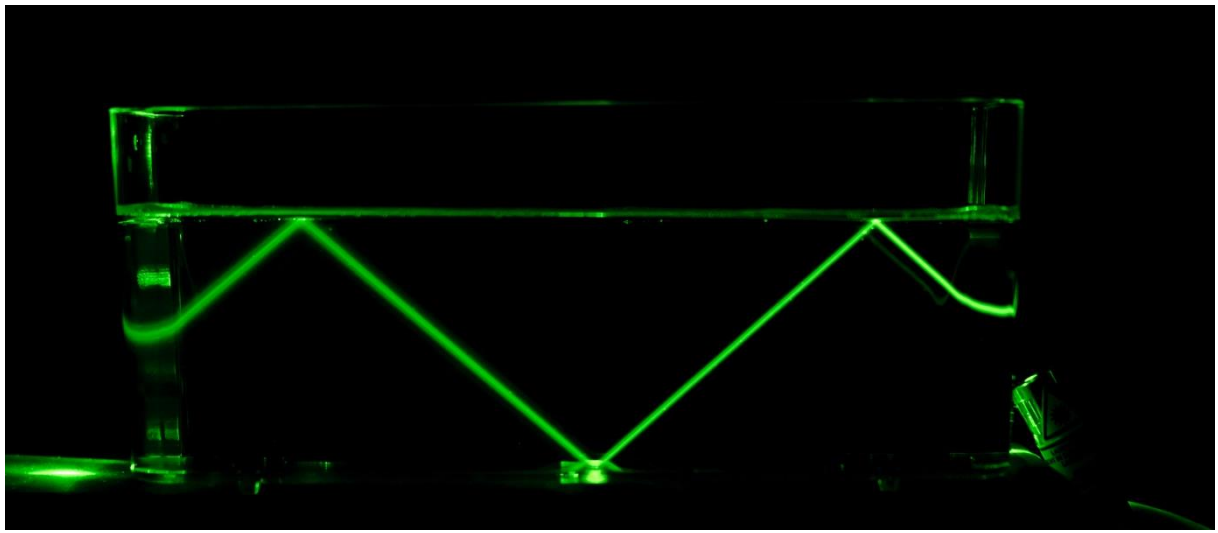


Abbildung 235: Brechung des Laserstrahls an der Wasseroberfläche sowie am Boden des Gefäßes

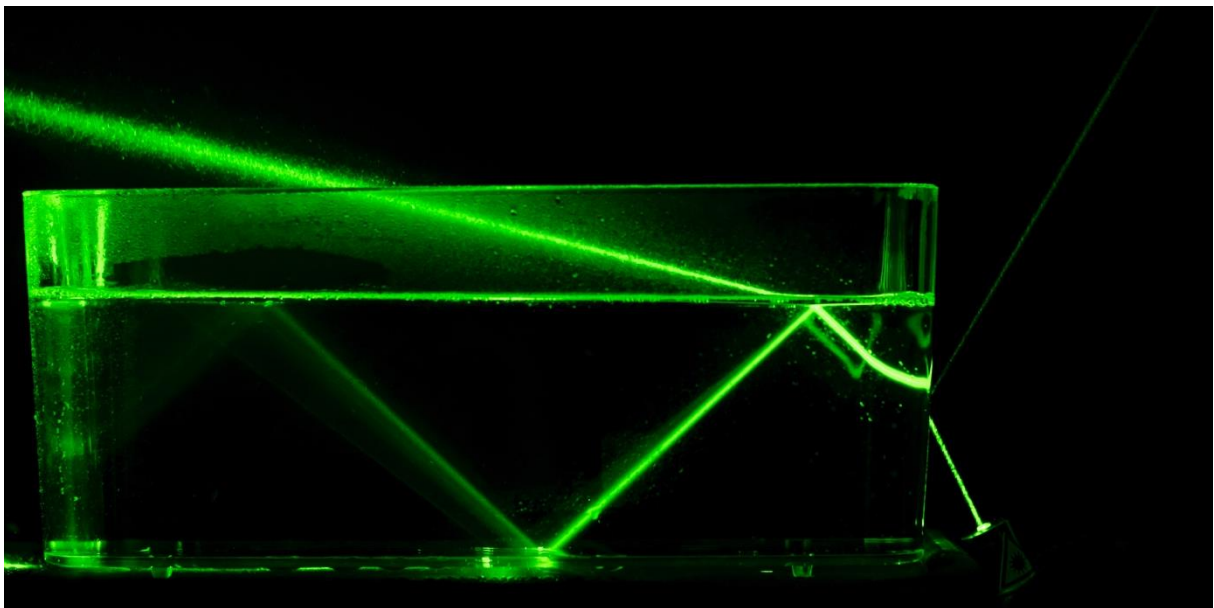


Abbildung 236: Durch eine Sprühflasche wird zusätzlich der Teil des Lichtes sichtbar gemacht, welcher aus der Wasseroberfläche austritt

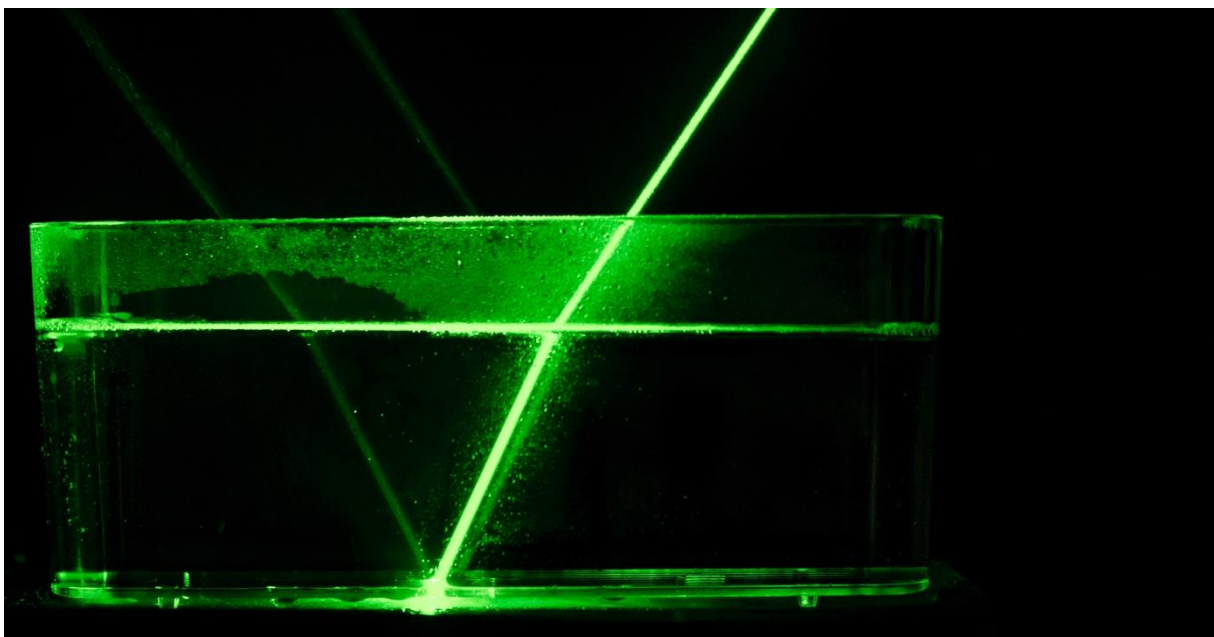


Abbildung 237: Zweifach-gebrochener Strahl parallel zum einfallenden Strahl

Material

1 rechteckiges Glasgefäß
1 Sprühflasche
1 Esslöffel
1 Wasserkrug
Spülmittel
Zucker
Schüssel
Laserpointer



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Wasser wird mit zwei Esslöffel Zucker vermengt. Das Gemisch wird in das rechteckige Glasgefäß umgefüllt. Dort wird noch etwas Spülmittel hinzugefügt und alles nochmals gut umgerührt. Das Glasgefäß sollte in etwa zur Hälfte befüllt sein. In einem Wasserkrug wird dem Wasser ebenfalls Spülmittel beigemischt. Der Esslöffel wird anschließend so gehalten, dass er gerade noch die Wasseroberfläche des Zuckerwassers im rechteckigen Glasgefäß berührt. Das Wassergemisch aus dem Krug wird nun langsam und mit Gefühl über den Esslöffel in den Glasbehälter eingefüllt (siehe Video). Durch diese Herangehensweise vermischt sich das Zuckerwasser mit dem Wasser aus dem Krug nur minimal. Man kann nach dem Einfüllen eine Grenzschicht zwischen den beiden unterschiedlichen Wassergemischen

erkennen (Abbildung 238). Zur besseren Sichtbarkeit wird das Licht ausgeschaltet. Lässt man den Lichtstrahl des Laserpointers nur durch jeweils eine Schicht gleiten, so bleibt er gerade (siehe Video). Leuchtet man relativ flach von unten nach oben, so wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche nach unten gebogen (Abbildung 239). Der Lichtstrahl, der an der Wand des Behälters reflektiert wird, ist jedoch gerade. Leuchtet man in einem steileren Winkel von oben nach unten so wird er gebogen, geht jedoch durch die Grenzschicht hindurch.

Physikalische Erklärung

Der Laserstrahl wird durch den Tyndall-Effekt (Kapitel 3.3.3) sichtbar, welcher durch die Tenside verursacht wird. Durch Beigabe von Zucker wird das Wasser optisch dichter. Da sich im unteren Teil des Gefäßes Zuckerwasser befindet ist dort die Brechzahl am höchsten. Wird anschließend darüber das Wasser mit Hilfe des Esslöffels eingefüllt, so vermischt es sich etwas mit dem Zuckerwasser und es entsteht ein Brechungsgefälle. Beim Übergang von einem Medium in das andere wird ein Lichtstrahl einmal gebrochen. Da es sich hier aber um ein Gemisch handelt, bei dem die Brechzahl nach obenhin stets abnimmt, wird der Lichtstrahl so oft gebrochen, dass er gebogen erscheint. Befindet sich der Lichtstrahl tief genug im Gefäß, so ist er gerade, da dort kein Brechungsgefälle vorherrscht. In diesem Experiment tritt dies nach der Reflexion an der Gefäßwand in Erscheinung (Abbildung 239).

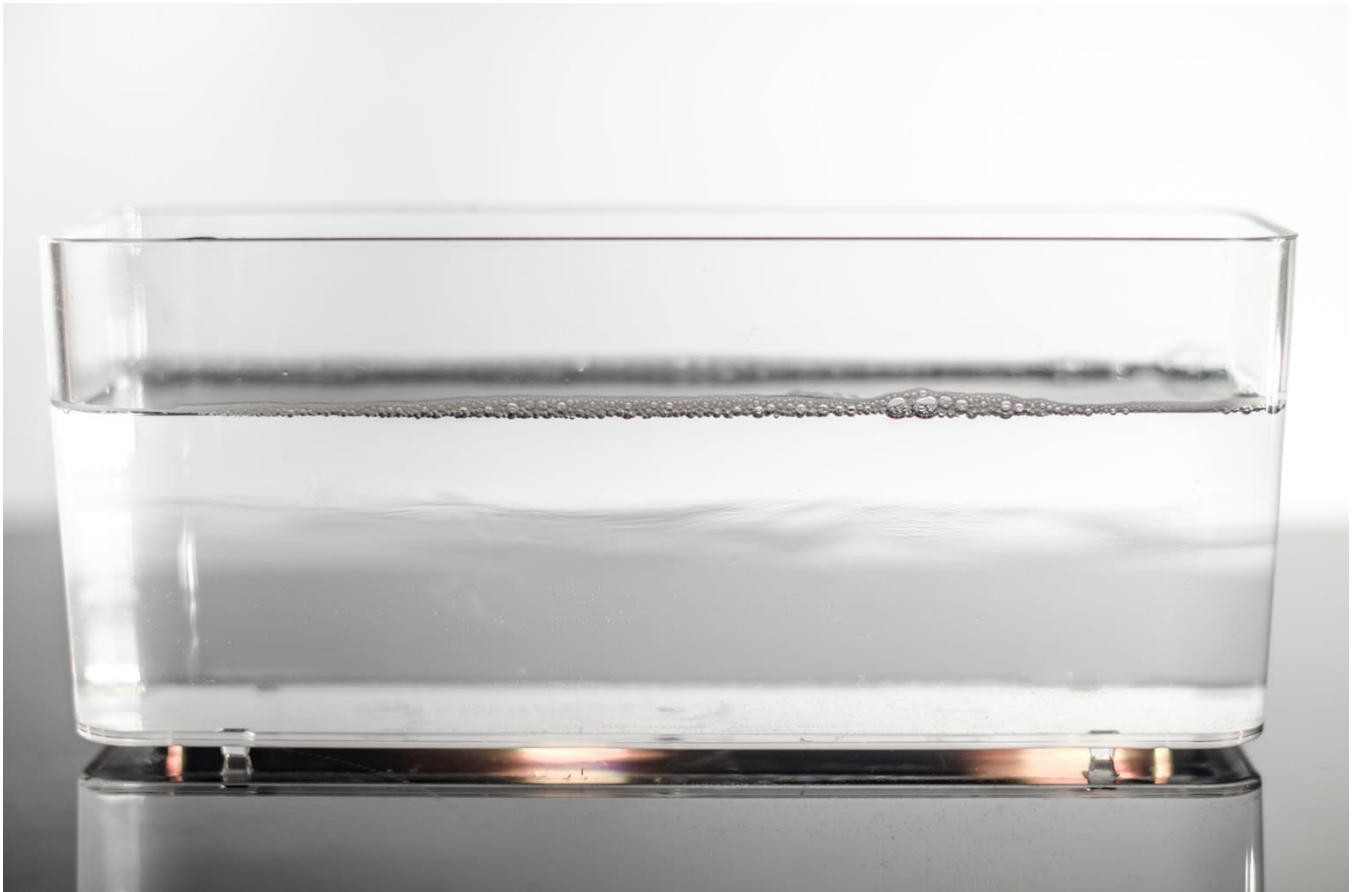


Abbildung 238: Wasser-Zucker-Gemisch befindet sich im unteren Teil des Gefäßes, reines Wasser im oberen Teil

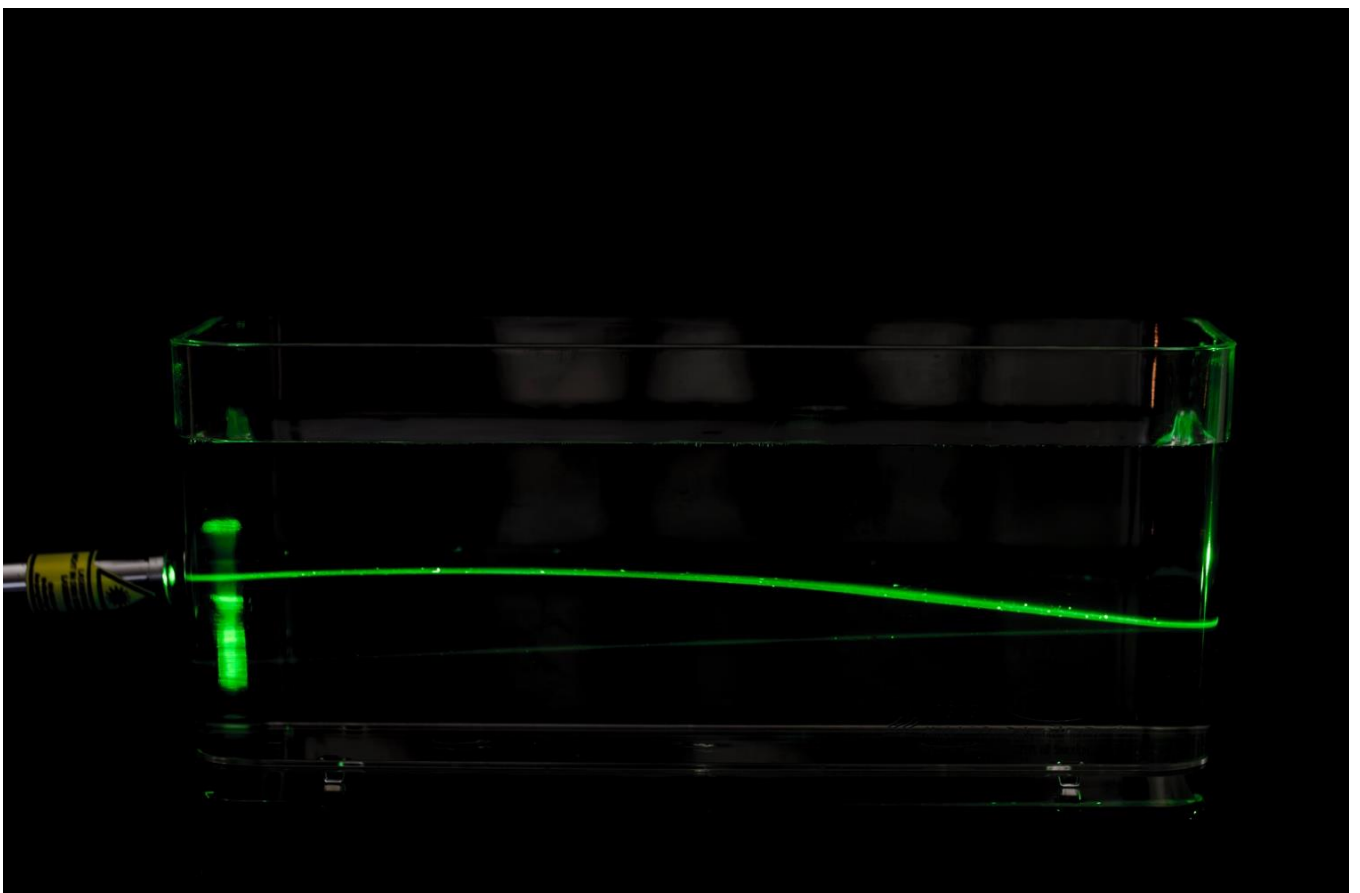


Abbildung 239: Lichtstrahl des Laserpointers wird an der Grenzfläche nach unten gebogen; gerader, schwacher Lichtstrahl von der Wand reflektiert

Material

- 1 Trinkglas (klein)
- 2 Teelicht
- 1 Glasplatte
- 1 Wasserkrug
- Knetmasse
- Feuerzeug
- Klebeband
(doppelseitig)
- Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Eines der beiden Teelichter wird mit doppelseitigem Klebeband am Boden des Trinkglases befestigt. Im Abstand von ca. 15 cm wird eine Glasplatte im 45° Winkel zum Trinkglas aufgestellt. Dies geschieht beispielsweise mit Hilfe der Knetmasse. Dazu werden Kugeln geformt, in welche die Glasplatte gesteckt wird. Im selben Abstand dazu wird das zweite Teelicht aufgebaut. Dieses wird mit Hilfe von Knetmasse so angehoben, dass es sich auf derselben Höhe befindet wie das andere Teelicht. Die gedachte Verbindungslinie zwischen den beiden Teelichtern sollte orthogonal zur Glasplatte sein. Nun wird das äußere Teelicht

angezündet. Es sieht so aus, als würde die Kerze im Glas brennen (Abbildung 241). Füllt man nun Wasser in das Trinkglas, so brennt die Kerze scheinbar unter Wasser weiter (Abbildung 242). Der komplette Aufbau ist in Abbildung 243 ersichtlich.

Anmerkung: Zeigt man bei diesem Experiment zuerst das Video, so kommt das Phänomen besser zur Geltung, da man den Aufbau nicht sofort erkennt.

Physikalische Erklärung

Bei der Glasplatte handelt es sich insbesondere für helle Objekte, wie der Flamme, um einen halbdurchsichtigen, ebenen Spiegel. Dabei werden die Lichtstrahlen so reflektiert, dass der Ausfallswinkel dem Einfallswinkel entspricht. Das besondere an einem ebenen Spiegel ist, dass dieser virtuelle Bilder erzeugt. Virtuelle Bilder lassen sich nicht auf einem Schirm abbilden, da von ihnen kein Licht kommt. Sie entstehen durch die geradlinige Verlängerung der reflektierten Strahlen (Abbildung 240). Dadurch ist das virtuelle Spiegelbild symmetrisch zum Original. Als Betrachter hat man den Eindruck, dass das Kerzenlicht von der Kerze hinter der Glasscheibe erzeugt wird, wodurch es scheint, als würde die Kerze in weiterer Folge unter Wasser brennen (Tipler & Mosca, 2008, S. 1042).

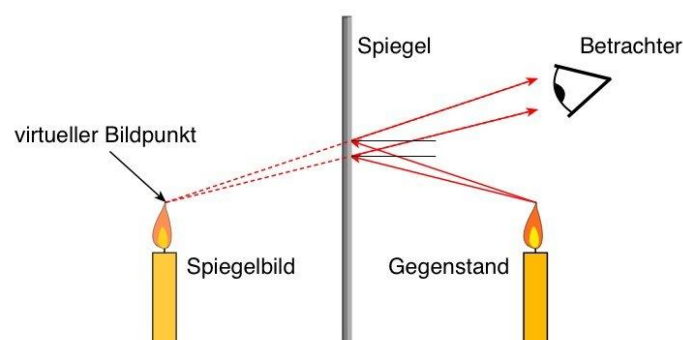


Abbildung 240: Entstehung eines virtuellen Bildes

Quelle: <https://physikunterricht-online.de/wp-content/uploads/2018/02/Spiegelbild.jpg>



Abbildung 241: Brennende Kerze in einem leeren Glas



Abbildung 242: Scheinbar brennende Kerze unter Wasser



Abbildung 243: Versuchsaufbau zur Entstehung eines virtuellen Bildes

Material

2 Trinkgläser (klein)

2 Löffel

2 Reagenzgläser

Messbecher

Sonnenblumenöl

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Eines der beiden Trinkgläser wird mit Wasser, das andere mit Öl befüllt. In beide Gläser legt man möglichst diagonal einen Löffel. Man kann beobachten, dass der Löffel im Öl (Abbildung 245) abgeknickter erscheint, als im Wasserglas (Abbildung 244).

Stellt man anstelle der Löffel Reagenzgläser auf dieselbe Weise in die Gläser, so kann man ebenso den Knick beobachten. Füllt man das im Wasser liegende Reagenzglas mit Wasser, so verschwindet der spiegelnde Effekt an den Seitenrändern und das Reagenzglas erscheint durchsichtiger (Abbildung 246). Wird nun Öl in das im Öl liegende Reagenzglas geschüttet, so verschwindet es scheinbar zur Gänze (Abbildung 247).

Physikalische Erklärung

Der Löffel wirkt sowohl im Wasserglas als auch im Ölgas gebrochen, da sich der Brechungsindex der Luft jeweils vom Brechungsindex der beiden Flüssigkeiten unterscheidet. In beiden Fällen wird der Löffel in der Flüssigkeit scheinbar zum Lot hin gebrochen, da diese optisch dichter ist als Luft. Der Knick fällt beim Löffel im Öl stärker aus als im Wasser, da die Brechzahl $n_{\text{Öl}}$ von Sonnenblumenöl mit $n_{\text{Öl}} = 1,47$ größer ist als jene von Wasser mit $n_{\text{Wasser}} = 1,33$ (Hänsel et al., 1993, S. 414; Kuchling, 2011, S. 653).

Gleich verhält es sich, wenn man die mit Luft befüllten Reagenzgläser in die Flüssigkeiten stellt. Schüttet man Wasser in das im Wasser stehende Reagenzglas, so sieht man es weiterhin. Es verschwindet lediglich der spiegelnde Effekt (Exp. [75]) am Rand, da sich der Grenzwinkel für die Totalreflexion beim Einfüllen des Wassers deutlich erhöht (Exp. [76]). Das Reagenzglas sieht man jedoch, da sich der Brechungsindex des Glases von Wasser als auch Luft unterscheidet und somit ein Teil des Lichtes reflektiert bzw. gebrochen wird. Bei Betrachtung des Reagenzglases im Öl sieht man dieses anfangs, da sich die Brechzahl von Glas und Luft unterscheidet. Befüllt man das Reagenzglas mit Öl, so verschwindet es scheinbar. Der Grund liegt darin, dass der Brechungsindex des Reagenzglases (Borosilikatglas) mit $n_{\text{Reagenz}} = 1,47$ gleich ist, wie der Brechungsindex von Sonnenblumenöl (Schneider et al., 2016, S. 21). Dadurch geht das Licht ungebrochen durch das Öl sowie das Reagenzglas hindurch.



Abbildung 244: Gebrochener Löffel im Wasserglas



Abbildung 245: Stärker gebrochener Löffel im Ölglas



Abbildung 246: Mit Wasser befülltes Reagenzglas im Wasserglas ohne spiegelnden Effekt



Abbildung 247: Mit Öl befülltes Reagenzglas verschwindet scheinbar im Ölglas

Material

1 Trinkglas (klein)

1 Ei

1 Kerze

1 Quirl

Feuerzeug

Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Das rohe Ei wird in das Innere des Quirls eingeklemmt. Mit Hilfe von diesem wird das Ei über die brennende Kerze so gehalten, dass schwarzer Ruß auf der Eierschale haften bleibt. Dazu hält man die zu bedeckende Seite leicht seitlich der Flamme, sodass diese über die Außenseite des Eis hinaufreicht. Ist das Ei komplett von Ruß bedeckt, so füllt man das Trinkglas zur Gänze mit Wasser und taucht das Ei darin ein. War es zuvor noch mattschwarz, so wirkt es nun silberglänzend (Abbildung 248). Zieht man das Ei darauffolgend wieder aus dem Wasser, so ist es wieder mattschwarz.

Anmerkung: Dasselbe Phänomen kann man beobachten, wenn man die Hand mit Hilfe von Bärlappsporen in das Wasser taucht (Exp. [4]).

Physikalische Erklärung

Hält man die Kerze über das Ei, so bildet sich eine Rußschicht auf dessen Oberfläche. An dieser Rußschicht bleiben Luftmoleküle haften (Hilscher et al., 2010, S. 806). Dadurch ist das Ei von einer Luftschicht umgeben, welche beim Eintauchen in das Wasserglas bestehen bleibt. Somit muss das Licht im Wasserglas eine Wasser-Luft-Grenzschicht überwinden, bis es zum Ei gelangt. Da es sich hierbei um einen Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium handelt, gibt es einen Grenzwinkel α_G , ab dem das Licht nur noch reflektiert wird und nicht mehr bis zur Oberfläche des Eis gelangt. Beim Übergang von Wasser zu Luft wird dieser Winkel wie folgt berechnet:

$$\sin(\alpha_G) = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow \alpha_G = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,33}\right) = 48,75^\circ \quad (150)$$

Somit wird jeder Lichtstrahl, der schräger als mit $48,75^\circ$ auf das Ei trifft, reflektiert. Flachere Strahlen werden teilweise gebrochen und anschließend von der Oberfläche des Eis reflektiert. Für den Betrachter erscheinen die Bereiche flach reflektierter Strahlen schwarz, während jene die der Totalreflexion unterliegen, silbern erscheinen.



Abbildung 248: Die unter Wasser gehaltene Oberfläche des Eis wirkt durch Rußbeschichtung spiegelnd

Material

1 PET-Flasche

Flambierbrenner

Kreuzschraubenzieher

Laserpointer

Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Der Schraubenzieher wird mit dem Flambierbrenner erhitzt. Mit diesem wird in das untere Drittel der Flasche ein Loch hineingebrannt. Im Anschluss füllt man die Flasche komplett mit Wasser. Das Wasser tritt aus dem Loch aus. Vom Loch aus gesehen wird von der Rückseite der Flasche mit dem Laserpointer horizontal in das Loch und somit in den austretenden Wasserstrahl geleuchtet. Man kann beobachten, dass der Wasserstrahl bis zu seinem Auftreffen auf dem Boden leuchtet (Abbildung 249). Sieht man etwas genauer hin, so kann man den Strahlengang des Lichtes im Wasserstrahl beobachten (Abbildung 251).

Solch einen Strahlengang kann man mit Hilfe eines Reagenzglases simulieren. Dazu wird es mit Wasser, welches mit Spülmittel vermischt wurde, befüllt. Leuchtet man nun von oben schräg in das Reagenzglas, so kann man erkennen, wie der Lichtstrahl bis zum Ende an den Wänden des Glases reflektiert wird (Abbildung 250).

Versuch 2

1 Reagenzglas

Spülmittel

Laserpointer

Wasser

Physikalische Erklärung

Der Laserstrahl wird direkt auf das Loch in der Flasche gerichtet. Dadurch gelangt der Lichtstrahl sehr flach in den austretenden Wasserstrahl. Tritt der Lichtstrahl aus dem Wasserstrahl, so findet ein Übergang von einem optisch dichteren zu einem optisch dünneren Medium statt. Somit gibt es einen Grenzwinkel α_G , bis zu welchem ein Austritt möglich ist (Kapitel 3.3.1). Der Grenzwinkel α_G für einen Übertritt von Wasser zu Luft liegt bei $48,75^\circ$. Da der Winkel zwischen Lot und Lichtstrahl im Wasserstrahl den Grenzwinkel deutlich überschreitet, kommt es stets zur Totalreflexion und der Lichtstrahl wird bis zum Ende weitergeleitet. Nach demselben Prinzip funktioniert das Experiment im Reagenzglas. Dort liegt der Grenzwinkel α_G jedoch bei:

$$\sin(\alpha_G) = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow \alpha_G = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1,33}{1,47}\right) = 64,79^\circ \quad (151)$$

Somit kann das Licht bei einem mit Wasser gefüllten Reagenzglas in einem größeren Winkelbereich aus dem Glas austreten.



Abbildung 249: Lichtleitung mit Hilfe eines Wasserstrahls

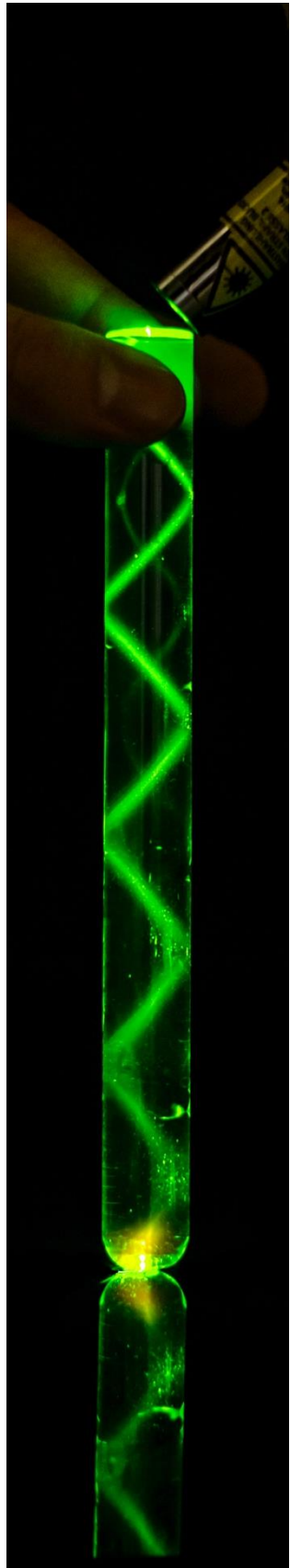


Abbildung 250: Totalreflexion im Reagenzglas

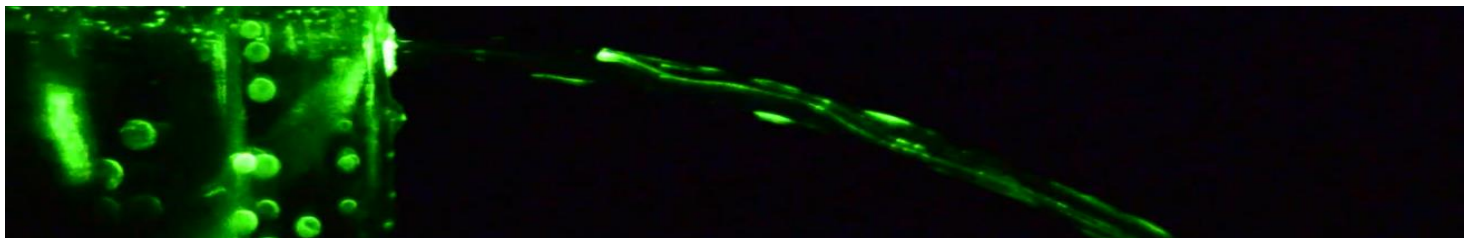


Abbildung 251: Erkennbare Totalreflexion im Wasserstrahl

Material

1 Metaldose
1 Taschenlampe
Kreuzschraubenzieher
Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Mit Hilfe des Kreuzschraubenziehers wird ca. 1 cm über dem Boden der Dose ein Loch hineingestanz. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass dieses schön rund ist. Füllt man die Dose anschließend mit Wasser, so tritt aus dem Loch ein Wasserstrahl aus. Leuchtet man nun mit einer Taschenlampe in die obere Öffnung der Dose, so beginnt der Wasserstrahl, bis zu seinem Auftreffen am Boden, zu leuchten (Abbildung 253). Hier empfiehlt es sich den Raum für eine besser Sichtbarkeit abzudunkeln.

Physikalische Erklärung

Dieses Experiment ist sehr ähnlich zum Experiment [76]. Der größte Unterschied liegt jedoch darin, dass das Licht nicht direkt auf den Wasserstrahl gerichtet ist. Da das Innere der Dose jedoch spiegelnd ist, werden die Lichtstrahlen so lange an der Innenwand gespiegelt, bis sie zum Austrittsloch gelangen. Jene Lichtstrahlen, die einen Grenzwinkel α_G von $48,75^\circ$ überschreiten, werden aufgrund der Totalreflexion bis zum Ende des Wasserstrahls weitergeleitet. Dort ist am Punkt des Auftreffens ein Lichtfleck erkennbar. Die Lichtstrahlen, welche sehr steil aus dem Loch in den Wasserstrahl treten, werden gebrochen und reflektiert. Der gebrochene Anteil tritt somit aus dem Wasserstrahl aus und ist als heller Fleck am Anfang des Wasserstrahls erkennbar.

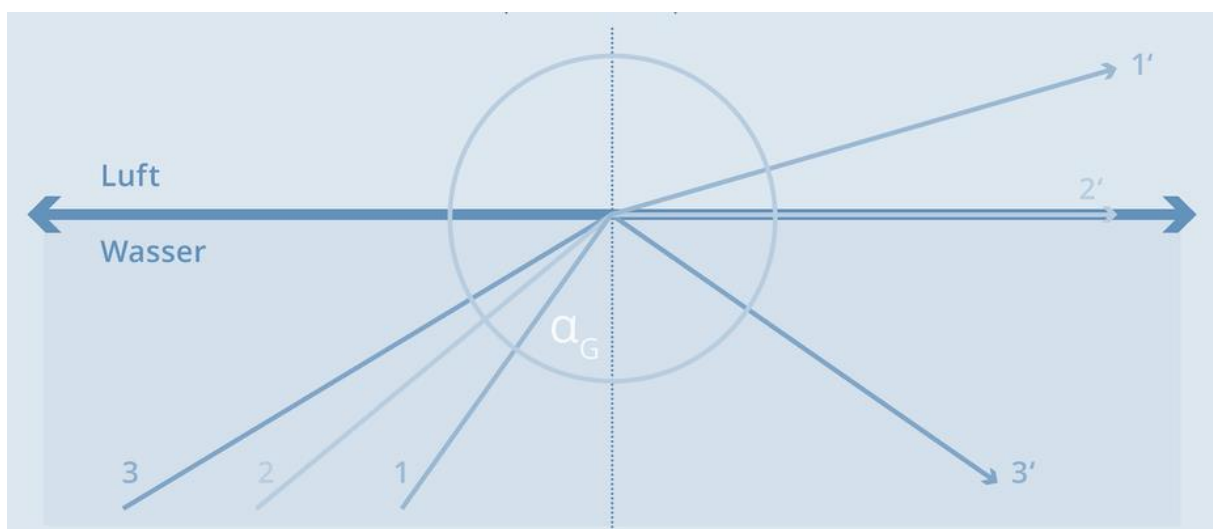


Abbildung 252: Totalreflexion am Übergang von Wasser zu Luft. Ist der Winkel kleiner als $48,75^\circ$ so kann der Lichtstrahl (1) austreten. Ist er größer so kommt es zur Totalreflexion (3)

Quelle: https://www.br.de/alphabetern/faecher/physik/reflexion-brechung-luft-wasser-totalreflexion-100~_v-img__16_9__xl_-d31c35f8186eb80b0cd843a7c267a0e0c81647.png?version=b6610



Abbildung 253: Wasser als Lichtleiter mit indirekter Beleuchtung

Material	Versuchsdurchführung und Beobachtung
1 rechteckiges Glasgefäß	Das Fluorescein wird in das rechteckige Glasgefäß gefüllt und zur besseren Betrachtung vor einem schwarzen Hintergrund platziert. Zur weiteren Steigerung der Sichtbarkeit wird der Raum abgedunkelt. Anschließend leuchtet man der Reihe nach mit den drei unterschiedlich färbigen Laserpointern durch das befüllte Gefäß. Man erkennt, dass der rote Laserstrahl entlang des gesamten Behälters sichtbar ist und am Ende durch diesen durchgeht (Abbildung 254). Sowohl das grüne Licht (Abbildung 255) als auch das blaue Licht (Abbildung 256) werden absorbiert. Beim blauen Laserpointer fällt auf, dass der Strahl ebenfalls grün erscheint.
Fluorescein	
Laserpointer blau	
Laserpointer grün	
Laserpointer rot	

Physikalische Erklärung

Natrium-Fluorescein bildet in Wasser gelöst, eine im Tageslicht grün fluoreszierende Flüssigkeit. Bei der Fluoreszenz werden die Photonen des Lichts, von den Elektronen der Atome des fluoreszierenden Stoffes absorbiert. Dadurch gelangt das Atom in einen Zustand höherer Energie, in welchem es nur kurz verweilt. Die Zeitdauer beträgt in etwa 10^{-8} s. Auf den Weg in den Grundzustand kann das Elektron den Weg über mehrere knapp beieinanderliegende Energieniveaus zurücklegen, welcher strahlungslos erfolgt. Der strahlungslose Übergang wird als Schwingungsrelaxation bezeichnet und erfolgt durch Stöße der Moleküle mit der Umgebung. Beim nächstliegenden Schwingungsgrundzustand angekommen, erfolgt ein Übergang in den Grundzustand, bei welchem ein Photon ausgesandt wird. Die Energie des emittierten Photons ist stets niedriger als die des absorbierten Photons. Die Energie eines Photons lässt sich berechnen durch:

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (152)$$

Dabei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, c die Lichtgeschwindigkeit und λ die Wellenlänge des Lichts. Da rotes Licht eine größere Wellenlänge hat als grünes und blaues Licht, ist seine Energie geringer. Die Energie reicht beim roten Licht nicht aus, um absorbiert zu werden wodurch es das Fluorescein ungeschwächt passieren kann. Der Strahl ist nicht aufgrund von Fluoreszenz, sondern wegen der Streuung an kleinen Partikeln erkennbar (Kapitel 3.3.3). Das grüne sowie blaue Licht werden absorbiert. Wie beschrieben, geht das angeregte Atom wieder in seinen Grundzustand über, wobei in beiden Fällen grünes Licht emittiert wird (Stuart & Klages, 2010, S. 248-249; Giancoli, 2006, S. 1353).

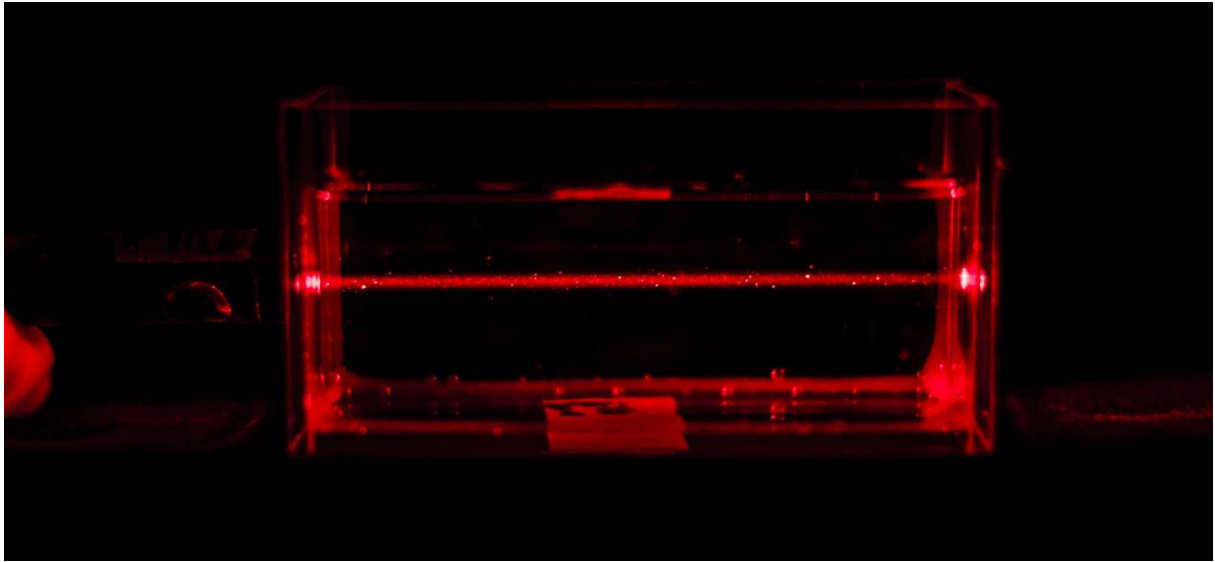


Abbildung 254: Rotes Licht wird in Fluorescein nicht absorbiert

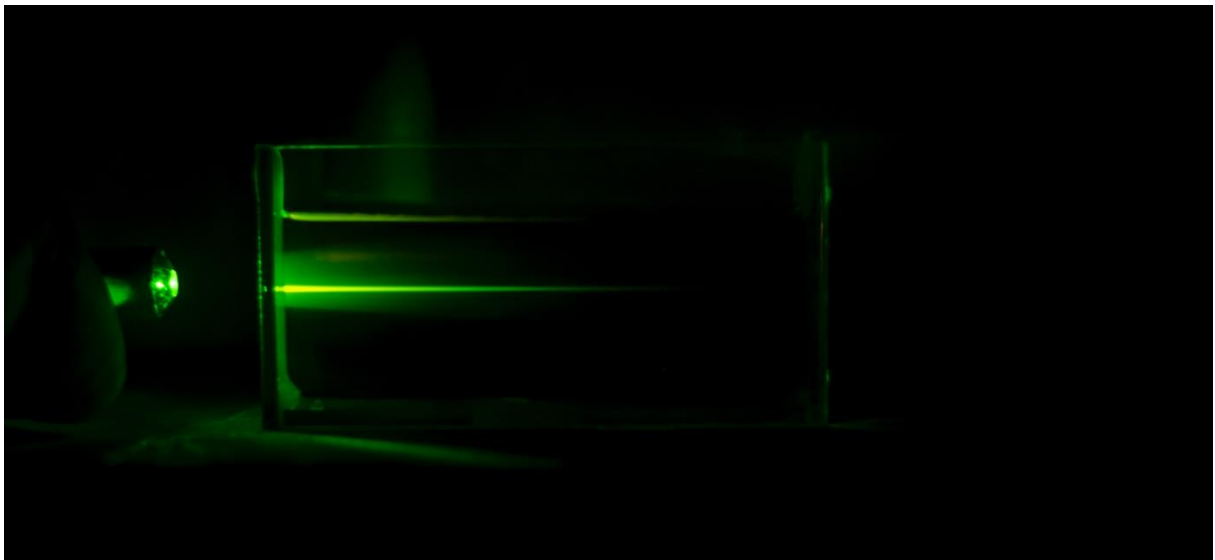


Abbildung 255: Grünes Licht wird in Fluorescein absorbiert

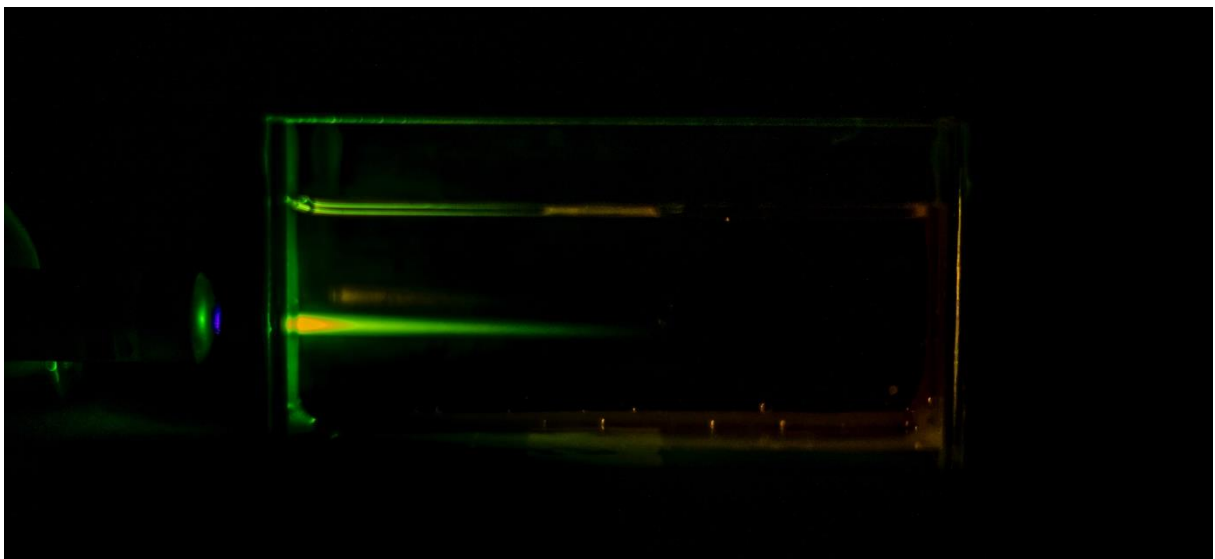


Abbildung 256: Blaues Licht wird in Fluorescein absorbiert. Angeregte Atome emittieren grünes Licht

3.3.2 Farbmischung

Dispersion

Bisher wurde diese Betrachtung vernachlässigt, jedoch ist der Brechungsindex eines Materials von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig. Dabei wird rotes, also langwelliges Licht, beim Übergang in ein optisch dichteres Medium weniger stark zum Lot hin gebrochen als violettes und somit kurzwelliges Licht. Die unterschiedliche Brechung des Lichtes, abhängig von der Wellenlänge, wird als Dispersion bezeichnet. Wird dabei das kurzwellige Licht stärker gebrochen als langwelliges Licht, so spricht man von normaler Dispersion. Der Unterschied des Brechungsindexes liegt dabei unter 0,03. Die Entstehung der Dispersion kann wie bereits in Kapitel 3.3.1 mit Hilfe des Huygens'schen Prinzip erklärt werden. Dabei entspricht der Abstand der ebenen Wellenfronten der Wellenlänge. Bei einer größeren Wellenlänge (Abbildung 257 links) liegt die Überlagerung der Elementarwellen, also die neue Wellenfront, steiler zur Grenzschicht als bei einer kürzeren Wellenlänge (Abbildung 257 rechts). Der Lichtstrahl liegt senkrecht zur Wellenfront und zeigt in Ausbreitungsrichtung. Somit erkennt man, dass das Licht mit einer längeren Wellenlänge weniger stark zum Lot hin gebrochen wird, als das einer kürzeren Wellenlänge (Meschede, 2010, S. 575; Gerhard, 2016, S. 35).

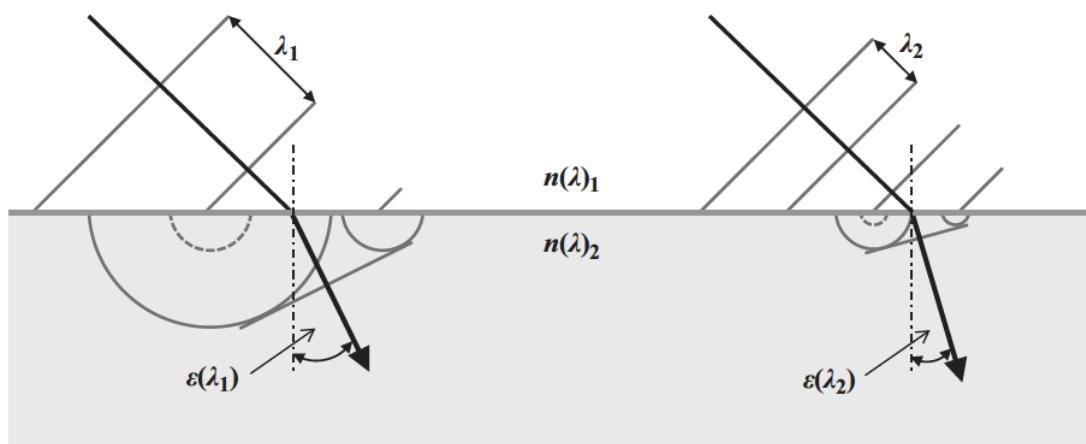


Abbildung 257: Entstehung der Dispersion nach dem Huygens'schen Prinzip

Quelle: Gerhard, 2016, S. 35

Wird nun weißes Licht mit Hilfe eines Prismas zerlegt, so werden die dabei entstehenden Farben als Spektralfarben bezeichnet, welche nicht weiter zerlegbar sind. Der gesamte Farbverlauf wird als Spektrum bezeichnet. Würde man das gesamte Spektrum zusammenführen, so würde dies wieder weiß ergeben (additive Farbmischung). Würde man zuvor jedoch eine Wellenlänge ausblenden, so wäre das Ergebnis kein weißes Licht mehr, sondern würde die Komplementärfarbe ergeben (Kuchling, 2011, S. 386-387).

Additive Farbmischung

Bei der additiven Farbmischung handelt es sich um die Mischung von farbigem Licht. Dabei spielt es keine Rolle, ob das farbiges Licht durch Emission bestimmter Wellenlängen oder durch herausfiltern (Subtraktion) bestimmter Anteile entsteht. Mit Hilfe der drei Grundfarben Rot, Blau und Grün lassen sich alle Farbtöne herstellen, wobei die Mischfarbe stets heller ist als ihre Komponenten. Mischt man die drei Grundfarben zusammen, so ergibt dies Weiß. Eine weitere Möglichkeit, weißes Licht darzustellen, ist die Mischung zweier Komplementärfarben nach dem Farbdreieck des CIE-Systems (Commission Internationale d'Eclairage) (Abbildung 258). Dabei verbindet eine Gerade, die durch das weiße Zentrum geht, zwei solcher Komplementärfarben (Meschede, 2010, S. 599). Mischt man zwei beliebige Farben miteinander, so liegt auch die daraus resultierende Mischfarbe auf der Verbindungslinie dieser Farben. Bei der additiven Farbmischung handelt es sich um eine Leistung des Gehirns, während die subtraktive Farbmischung ein physikalisches Phänomen ist.

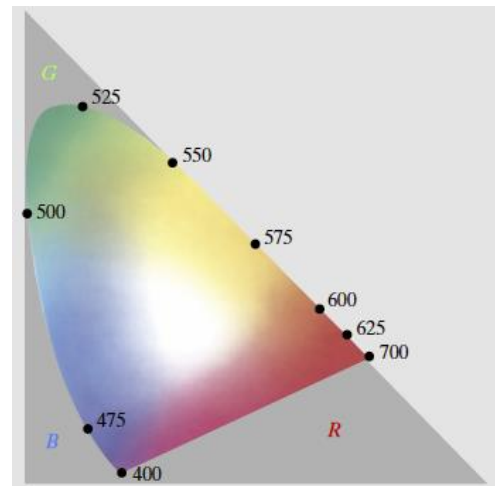


Abbildung 258: Farbdreieck des CIE-Systems

Quelle: Meschede, 2010, S. 599

Subtraktive Farbmischung

Bei der subtraktiven Farbmischung wird Licht mit bestimmter Wellenlänge absorbiert. Übrig bleiben die restlichen Wellenlängen des Ausgangslichtes, welche die Komplementärfarbe der absorbierten Farbe darstellen. Die drei Grundfarben bei der subtraktiven Farbmischung sind Cyan, Magenta und Gelb und sind somit die Komplementärfarben zu den Grundfarben der additiven Farbmischung. Mischt man die drei Farben Cyan, Magenta und Gelb zusammen, so ergibt dies Schwarz. Dies kann man sich so vorstellen, dass alle entsprechenden Wellenlängen absorbiert werden und somit kein Licht reflektiert werden kann. Ebenso ergeben zwei Komplementärfarben die Farbe Schwarz.

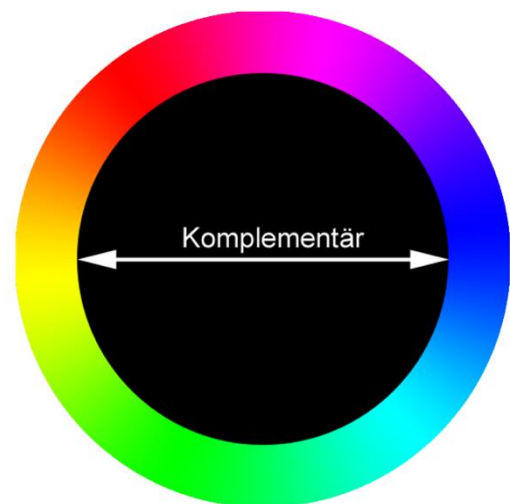


Abbildung 259: Komplementärfarben der subtraktiven Farbmischung

Quelle: <http://cg-photography.com/images/cgp/Blog/Photography/2017/20171007-kompl-farben/Komplementär-1200x800.png>

Dargestellt wird dies im sogenannten Farbkreis, wobei zwei gegenüberliegende Farben die Komplementärfarben zueinander sind (Abbildung 259) (Kuchling, 2011, S. 388).

Material

1 Schüssel (mittel)

1 Spiegel

1 Taschenlampe

Knetmasse

Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Spiegel wird mit Hilfe der Knetmasse schräg (zwischen 30° und 60°) in der Schüssel befestigt. Anschließend wird die Schüssel so mit Wasser befüllt, dass ein Großteil des Spiegels unter Wasser liegt. Die Schüssel stellt man nun im Abstand von ca. 2 m zur Wand, auf den Boden.

Anschließend leuchtet man im abgedunkelten Raum, bei der Wand stehend, von oben mit einer Taschenlampe auf die Schüssel. An der Wand sollte farbiges Licht (Abbildung 261 und Abbildung 262) erkennbar sein. Falls nicht, kann der Einfallswinkel des Lichtes variiert werden und gegebenenfalls die Schüssel etwas nach vorne oder hinten verschoben werden.

Physikalische Erklärung

Bei diesem Experiment tritt die wellenlängenabhängige Brechung des Lichts in Erscheinung. Das weiße Licht der Taschenlampe besteht aus den unterschiedlichsten Spektralfarben. Gelangt nun das weiße Licht der Taschenlampe auf die Wasseroberfläche, so findet ein Übergang in das optisch dichtere Medium statt (Abbildung 260). Dabei werden die Bestandteile des weißen Lichtes mit verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich stark zum Lot hin gebrochen. Im Wasser bewegen sich die einzelnen Lichtstrahlen mit verschiedenen Wellenlängen in einem unterschiedlichen Winkel geradlinig fort und werden am Spiegel reflektiert. Dabei gilt, dass der Einfallswinkel dem Austrittswinkel entspricht. Aufgrund der schiefen Lage des Spiegels werden die Lichtstrahlen somit wieder zur Grenzfläche Wasser-Luft gelenkt. Nun findet ein Übergang in das optisch dünnere Medium statt und die Lichtstrahlen werden wieder, von ihrer Wellenlänge abhängig, unterschiedlich stark vom Lot weg gebrochen. Aufgrund der unterschiedlichen Austrittswinkel der einzelnen Farben, kann man diese in entsprechender Entfernung gut beobachten. Dabei wird das rote Licht am schwächsten gebrochen und das bläulich-violette am stärksten und erklärt somit auch die Reihenfolge der Farben.

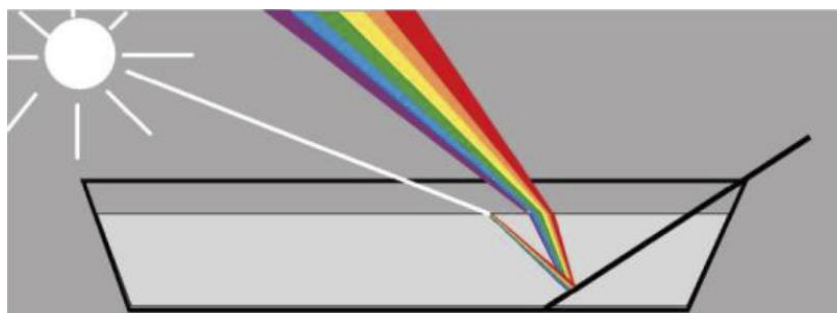


Abbildung 260: Dispersion von weißem Licht

Quelle: Schulbiologiezentrum Hannover, 2016, S. 22



Abbildung 261: Aufspaltung des Lichts mit Hilfe eines Spiegels und Wasser

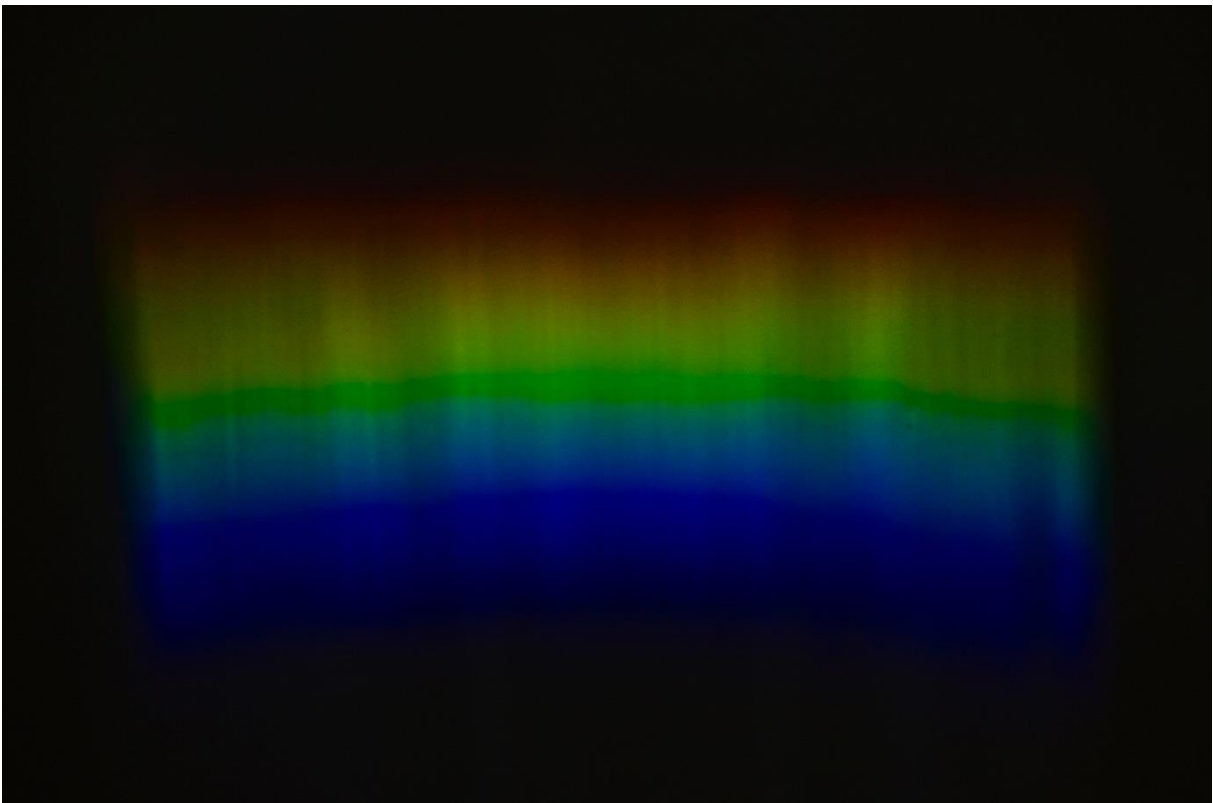


Abbildung 262: Lichtspektrum einer LED-Taschenlampe

Material

3 Trinkgläser (klein)

Tintenpatronen

(grün, blau und rot)

3 gleiche helle
Lichtquellen



Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die drei Trinkgläser werden mit Wasser befüllt und mit Tinte grün, blau und rot eingefärbt. Zu Beginn stellt man zwei der Trinkgläser auf eine Arbeitsfläche vor eine weiße Wand. Anschließend werden zwei gleich helle Lichtquellen nebeneinander platziert, sodass sie jeweils durch eines der Gläser leuchten. Somit wird farbiges Licht auf die dahinterliegende Wand projiziert. Nun muss man darauf achten, dass sich die eingefärbten Lichtstrahlen der beiden einzelnen Gläser in der Mitte etwas überschneiden.

Beim Überlappen vom roten und grünen Licht kann man ein gelbliches Licht beobachten (Abbildung 263). Durch das Übereinandersetzen von rotem und blauem Licht erscheint das daraus resultierende Licht in einem Magenta-Ton (Abbildung 264). Die letzte Farbkombination ergibt mit Grün und Blau einen Cyan-Ton (Abbildung 265). Versucht man

nun alle drei Farben durch entsprechende zusätzliche Beleuchtung zu kombinieren, erscheint das Licht bei genauer Positionierung weiß (Abbildung 266). Bei Variante zwei werden auf einem LCD-Bildschirm, welcher ein weißes Bild anzeigt, mit einer Dosierspritze Wassertropfen platziert. Die Pixel des Bildschirms erscheinen vergrößert und man kann die drei Grundfarben erkennen (Abbildung 267).

Physikalische Erklärung

Bewegt sich weißes Licht durch das eingefärbte Wasser, so werden einige Wellenlängen des Lichtes so absorbiert, dass das austretende Licht die entsprechende Farbe hat. Da das Licht nun die entsprechende Farbe hat, handelt es sich beim Überlagern mit einem anders eingefärbten Licht um eine additive Farbmischung (Kapitel 3.3.2). Werden zwei solcher farbigen Lichter überlagert, so nimmt die Helligkeit stets zu.

Die Funktionsweise von Farbd Displays basiert auf dem Prinzip der additiven Farbmischung. Die einzelnen Pixel bestehen aus drei Subpixel mit den Farben Rot, Blau und Grün. Werden alle drei Farben gleichzeitig angesteuert, so ergibt dies ein weißes Bild, da die Subpixel zu nahe aneinander liegen und zu klein sind, um vom Auge unterschieden zu werden (Kuchling, 2011, S. 388; Kessel, 2012, S. 15). In diesem Experiment werden die Pixel durch die Wassertropfen vergrößert (Exp. [84]) und die Subpixel sind somit erkennbar.



Abbildung 263: Additive Farbmischung mit grünem und rotem Licht – gelbliches Licht entsteht



Abbildung 264: Additive Farbmischung mit blauem und rotem Licht – Licht im Magenta-Ton entsteht



Abbildung 265: Additive Farbmischung mit blauem und grünem Licht – Licht im Cyan-Ton entsteht



Abbildung 266: Additive Farbmischung mit rotem und grünem Licht – weißes Licht entsteht

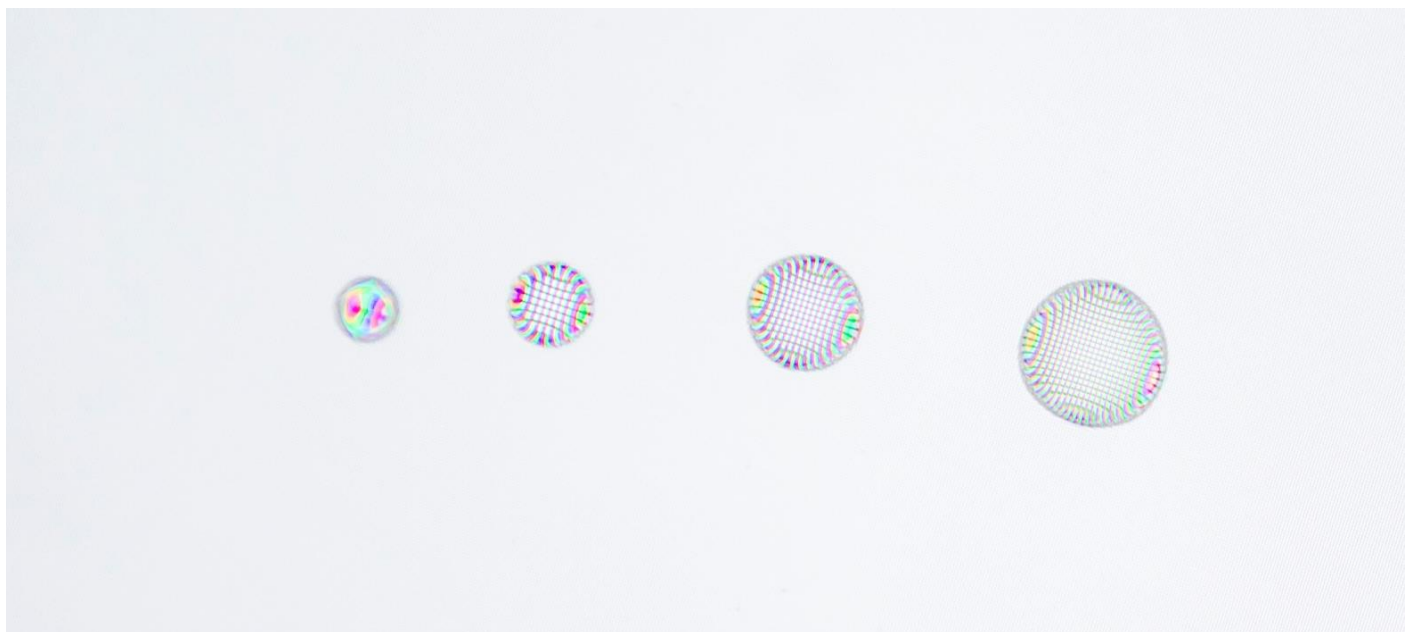


Abbildung 267: Wassertropfen auf Farbdisplay – erkennbare Subpixel in den Farben Rot, Grün und Blau

Material

3 Trinkgläser (klein)

Wasserfarben

(Gelb, Cyan, Magenta)

Pinzel

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zwei der drei Trinkgläser werden mit Wasser befüllt. Das Wasser wird je Glas mit einer der drei Wasserfarben mit Hilfe des Pinsels eingefärbt. Anschließend mischt man die zwei unterschiedlichen Farben zusammen, indem man von jedem der befüllten Gläser den gleichen Anteil in das bis dato leere Glas schüttet. Werden so Gelb und Cyan zusammen gemischt, wird das Produkt grün (Abbildung 268). Bei Magenta und Cyan entsteht ein violetter bis blauer Farbton (Abbildung 269). Je nach Mischverhältnis kann dies abweichen. Als dritte Kombination wird Gelb mit Magenta

vermischt und es entsteht ein oranger bis roter Farbton (Abbildung 270). Zu guter Letzt mischt man die drei erhaltenen Produkte Grün, Blau und Rot zusammen und erhält Grau (Abbildung 271).

Physikalische Erklärung

Betrachtet man beispielsweise das in der Grundfarbe Gelb eingefärbte Wasser, so erscheint dieses gelb, da der Blauanteil des weißen Lichtes herausgefiltert wurde und die Komplementärfarbe dazu übrigbleibt. Im Vergleich dazu, wird beim cyanfärbigen Wasser der Rotanteil des weißen Lichtes herausgefiltert. Mischt man nun diese beiden eingefärbten Wassergläser zusammen, so erscheint das Wasser grün, da sowohl der Blauanteil als auch der Rotanteil absorbiert werden. Nach demselben Prinzip wird bei Magenta der Grünanteil herausgefiltert. Mischt man nun zum grün-eingefärbten Wasser das magenta-eingefärbte Wasser, so wird das Resultat schwarz. Nach diesem Prinzip kann man sämtliche Farben dem Farbkreis entsprechend (Kapitel 3.3.2) mischen.

Anmerkung: Ob beim Mischen von Magenta und Cyan, Violett oder Blau entsteht, hängt von der Intensität der Farben ab.



Abbildung 268: Grün und Cyan ergibt Grün



Abbildung 269: Magenta und Cyan ergibt Violett bis Blau



Abbildung 270: Gelb und Magenta ergibt Orange bis Rot



Abbildung 271: Grün, Blau und Rot ergeben Schwarz

3.3.3 Farben in der Astronomie

Die Farben unseres Himmels

Betrachtet man den Himmel, so fällt auf, dass er auch auf der sonnenabgewandten Seite blau und hell erscheint. Dies liegt an der Streuung des Sonnenlichts an den Luftmolekülen der Atmosphäre, wodurch die geradlinige Bewegung des Lichtes verändert wird. Abhängig von der Größe der Teilchen breitet sich das gestreute Licht entweder kugelsymmetrisch oder kegelförmig vom Teilchen betrachtet, aus.

Bei den Luftmolekülen handelt es sich um Teilchen, die viel kleiner sind als die Wellenlänge des Lichtes und somit tritt dort die kugelsymmetrische Verteilung auf, bekannt unter der **Rayleigh-Streuung**. Die Luftmoleküle sind sphärisch und optisch dichter als die Umgebung. Weiters sind die Moleküle elektrisch neutral, bestehen jedoch aus einem positiven Kern und den negativen Elektronen. Trifft nun das Licht, eine elektromagnetische Welle, auf solch ein Molekül, so induziert dies ein Dipolmoment. Aufgrund dieses Dipolmoments wirken die Moleküle wie ein Hertz'scher Dipol und es wird somit elektromagnetische Strahlung mit derselben Frequenz und damit in derselben Wellenlänge ausgesandt, wie das ursprüngliche Licht, jedoch ist die maximale Streuintensität senkrecht dazu. Zudem ist die Streuintensität $I(\lambda)$ reziprok proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge, d. h.:

$$I(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (153)$$

Vergleicht man den blauen Anteil des Sonnenlichts mit dem Rotanteil, so hat das rote Licht fast eine doppelt so große Wellenlänge wie das blaue Licht. Somit ist die Streuintensität des blauen Lichtes um das 16-fache größer. Das Sonnenlicht besteht aus einem breiten Farbspektrum. Da das blaue Licht aber am stärksten gestreut wird, erscheint der Himmel tagsüber blau. In den Abend- und Morgenstunden liegt die Sonne sehr flach zum Horizont und das Licht muss einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen. Dadurch wird das blaue Licht schon zuvor weggestreut und der übrigbleibende Lichtanteil erscheint in der Komplementärfarbe, nämlich Orange (Kapitel 3.3.2). Am Rande erwähnt sei, dass die Sonne eigentlich weiß ist, nur aufgrund des fehlenden Blauanteils, gelblich erscheint (Hermans, 2014, S. 77-78; Klose, 2016, S. 214 ff.).

Sind die Teilchen, an denen das Licht gestreut wird in etwa so groß wie die Wellenlänge des Lichtes, so spricht man von **Mie-Streuung**. Bei der Mie-Streuung tritt hauptsächlich eine Vorwärtsstreuung des Lichtes in Erscheinung, mit kleiner seitlicher Streuung. Die Mie-Streuung ist nur schwach wellenlängenabhängig. Für kleine Teilchen ist die Rayleigh-Streuung der Grenzfall der Mie-Streuung (Hecht, 2016, S. 193).

Handelt es sich um eine Mie-Streuung in einer Flüssigkeit oder in einem Gas, so wird dies als **Tyndall-Effekt** beschrieben (Zobl, 2017, S. 15). Dies tritt beispielsweise in einem Seifenwassergemisch auf. Werden Tenside in das Wasser gemischt, so reichern sich diese an der Oberfläche so an, dass ihr hydrophober Teil vom Wasser weg zeigt (Exp. [2]). Ist die

Oberfläche zur Gänze belegt, so ordnen sich die weiteren Tenside in einem Teilchenverband von 50 bis 1000 Molekülen zu Micellen an (Wagner, 2010, S. 58-59). Wird nun mit einem Laserpointer in solch ein Seifenwassergemisch geleuchtet, so ist der Laserstrahl, aufgrund des Tyndall-Effekts, sichtbar (Exp. [71]), da das Licht an den Micellen gestreut wird.

Die Mondfinsternis

Eine Mondfinsternis kann nur dann stattfinden, wenn Vollmond vorherrscht und sich dieser in der Nähe des Mondknotens befindet. Bei den zwei Mondknoten handelt es sich um die Schnittpunkte zwischen der Mondumlaufbahn um die Erde, welche in etwa 5° zur Ekliptik geneigt ist. Die Knoten sind jedoch aufgrund der veränderlichen Mondbahnebene nicht konstant. Befinden sich Sonne, Erde und Vollmond auf einer Geraden, wobei der Mond nahe der Mondknoten liegt, so kommt es zu einer Mondfinsternis. Der Schatten der Erde wird dabei in drei Teile unterteilt: den Halbschatten, den Kernschatten und den absoluten Kernschatten. Aufgrund der Entfernung Erde-Mond, kann sich der Mond nie im absoluten Kernschatten befinden, welcher den Mond komplett abdunkeln würde. Liegt der Mond im Halbschatten, so spricht man von einer Halbschattenfinsternis und die Verdunkelung des Mondes ist so schwach, dass sie kaum merklich ist. Bewegt sich der Mond jedoch in den Kernschatten der Erde, so findet anfangs eine partielle Mondfinsternis statt, bis der Mond letztlich komplett in den Kernschatten eintaucht und eine totale Mondfinsternis vorherrscht (siehe Abbildung 272). Im Bereich des Kernschattens bekommt der Mond eine rötliche Färbung, da die Blauanteile des Sonnenlichts, aufgrund der Rayleigh-Streuung in der Atmosphäre der Erde stärker gestreut werden und somit nur die restlichen Farbanteile, vor allem der Rotanteil, in Richtung des Kernschattens gebrochen werden. Da es sich um den Schatten der Erde handelt, ist dieser rund (Kuphal, 2013, S. 169 ff.).

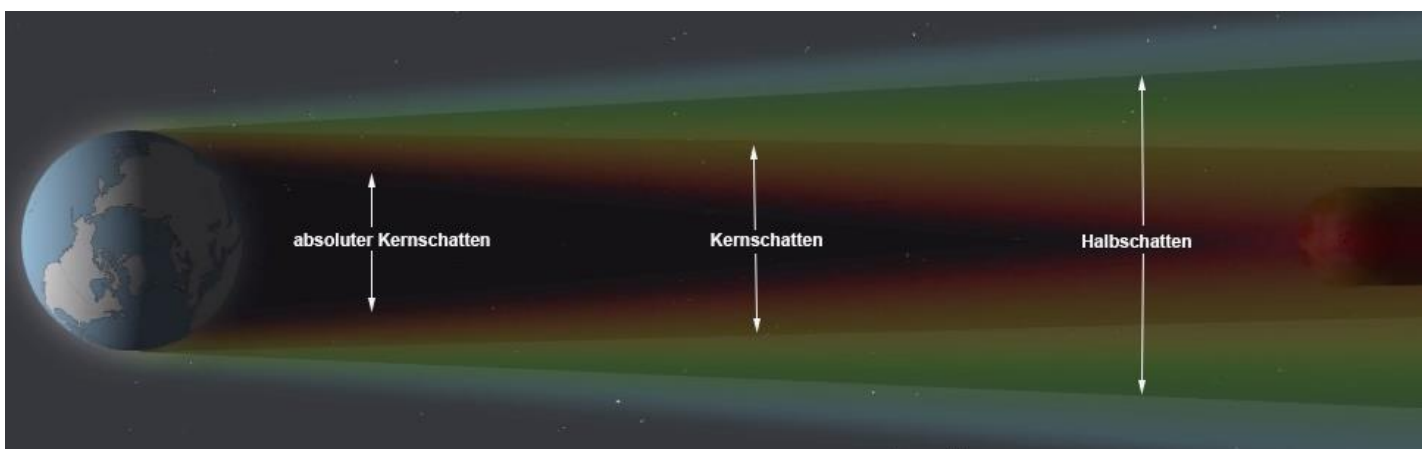


Abbildung 272: Nicht maßstabsgetreue Darstellung einer Mondfinsternis. Der Mond befindet sich in dieser Abbildung im Kernschatten
Adaptiert von: https://www.youtube.com/watch?v=yw_oHVFhaVY

Material

1 Glasschüssel
1 Taschenlampe
Teelöffel
Milch
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Glasschüssel wird mit Wasser vollgefüllt. In dieses werden, je nach Größe der Glasschüssel ein bis zwei Teelöffel Milch hinzugefügt. Mit dem Löffel wird alles gut miteinander vermischt. Betrachtet man die Schüssel von vorne (Abbildung 273 und Abbildung 274) und leuchtet nun mit einer Taschenlampe von oben, links oder rechts auf die Schüssel, so wirkt das Milch-Wasser-Gemisch bläulich (Abbildung 273). Leuchtet man jedoch von sich aus gesehen von hinten mit der Taschenlampe auf die Schüssel, so wirkt das Gemisch gelblich (Abbildung 274).

Anmerkung: Diese beiden Effekte kann man verstärken, wenn man für das blaue Lichtstimmung eine LED Taschenlampe (bläuliches Licht) benutzt und für die gelbliche Stimmung eine Taschenlampe mit Glühlampe (gelbliches Licht). In dieser Durchführung wurde jedoch beide Male eine LED-Taschenlampe verwendet.

Physikalische Erklärung

Milch ist eine Emulsion aus Wasser und Fett. Dabei schwimmen kleine Fetttropfen im Wasser. Mischt man nun die Milch mit dem Wasser in der Schüssel, so verteilen sich die Fetttropfen der Milch im gesamten Wasservolumen. Diese entsprechen in ihrer Größe in etwa der Wellenlänge des Lichts, und somit tritt in diesem Experiment Mie-Streuung in Erscheinung. Die Mie-Streuung ist weniger stark von der Wellenlänge abhängig als die Rayleigh-Streuung, aber dennoch spielt die Wellenlänge eine Rolle (Kapitel 4.3.3). Durch die von hinten angesetzte Lichtquelle erscheint das gerade auf einen zukommende Licht orange, da auf dem Weg durch das Wasser-Milch-Gemisch der Blauanteil herausgestreut wird. Betrachtet man das Gemisch durch Ansetzen der Lichtquelle an der Seite, so erscheint es bläulich, da man hauptsächlich das kurzwellige und somit stärker gestreute, blaue Licht sieht (Meschede, 2010, S. 579).



Abbildung 273: Simulation der Farben des Himmels bei Tag



Abbildung 274: Simulation der Farben des Himmels bei Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergang

Material

1 runde Glasschüssel
(groß)
1 Holzstab
1 Taschenlampe
1 Tischtennisball (weiß)
1 undurchsichtige Flasche
Teelöffel
Knetmasse
Milch
Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die runde Glasschüssel wird mit Wasser vollgefüllt. Zu dem Wasser werden ein bis zwei Teelöffel Milch gemischt. In ca. 30 cm Entfernung wird ein Holzstab mit Hilfe von Knetmasse stehend fixiert. Auf diesen wird ebenfalls mit Knetmasse ein weißer Tischtennisball montiert. Leuchtet man nun mit einer Taschenlampe, von der gegenüberliegenden Seite des Balls, auf die gefüllte Glasschüssel in Richtung Tischtennisball, so verfärbt sich die runde Schüssel blau und der Tischtennisball bekommt eine orange Farbe (Abbildung 276). Dieses Experiment simuliert eine Mondfinsternis (Abbildung 275), wobei der Tischtennisball die Rolle des Mondes und die Glasschüssel, die der Erde einnimmt. Stellt man wie im Video ersichtlich eine undurchsichtige Flasche in die Glasschüssel, so kann man klar erkennen, dass das Licht nicht geradlinig durch die Schüssel läuft, sondern gebrochen wird, um schließlich beim Ball anzugelangen.

Anmerkung: Mit Hilfe eines Blatt Papiers kann man die Position für den Ball herausfinden, indem man beobachtet, wo der orange Lichtfleck sein Intensitätsmaximum hat.

Physikalische Erklärung

Dieses Experiment simuliert die Entstehung einer Mondfinsternis. Während bei einer echten Mondfinsternis der blaue Anteil des Sonnenlichts beim Durchgang durch die Atmosphäre gestreut wird und die rötliche Färbung als Komplementärfarbe übrigbleibt, sind bei diesem Experiment die Fetttropfen der Milch dafür verantwortlich (Exp. [82]). An diesen Fetttropfen findet die sogenannte Mie-Streuung statt. Diese ist zwar schwächer von der Wellenlänge abhängig als die Rayleigh-Streuung, welche für die Streuung des Lichtes in der Atmosphäre verantwortlich ist, aber dennoch wird das blaue Licht auch hier stärker gestreut (Kapitel 3.3.3). Bewegt man den Tischtennisball nach links und rechts, so kann man eine partielle Mondfinsternis simulieren.



Abbildung 275: Mondfinsternis am 27. Juli 2018



Abbildung 276: Modell einer Mondfinsternis

3.3.4 Linsen

Linsen

Optische Linsen bestehen aus einem durchsichtigen Material, wie zum Beispiel Glas oder Kunststoff. Handelt es sich bei den Begrenzungsflächen der Linsen um Teile einer Kugel, so spricht man von sphärischen Linsen. Im Vergleich zur Luft, handelt es sich bei einer Linse stets um ein optisch dichteres Medium. Bewegt sich nun ein Lichtstrahl durch eine Linse, so wird dieser zweimal, an der jeweiligen Oberfläche, gebrochen. Zuerst findet ein Übergang in ein dichteres Medium statt und anschließend ein Übergang in ein dünneres Medium. Anstelle der Brechungen an den Oberflächen, ersetzt man dies in Zeichnungen und Rechnungen häufig durch Brechung an zwei Hauptebenen. Dies gilt insbesondere bei dicken Linsen, während bei dünnen Linsen die zwei Hauptebenen zu einer zusammengefasst und in der Mittelebene der Linse eingezeichnet werden. Die infolge betrachteten Abstände beziehen sich stets auf die Hauptebenen.

Prinzipiell unterscheidet man zwei Arten von Linsen (siehe Abbildung 277). Einerseits gibt es die Sammellinsen, auch **Konvexlinsen** genannt. Diese sind in der Mitte am dicksten und am Rand am dünnsten. Sie brechen parallele, einfallende Lichtstrahlen so, dass sich diese nach der Konvexlinse in einem Punkt schneiden. Die zweite Art von Linsen bezeichnet man als Streulinsen, auch **Konkavlinsen** genannt. Diese sind in der Mitte am schmalsten und am Rand am breitesten. Durch Konkavlinsen werden parallel einfallende Lichtstrahlen hinter der Linse so gestreut, als würden sie von einem Punkt vor der Linse ausgehen.

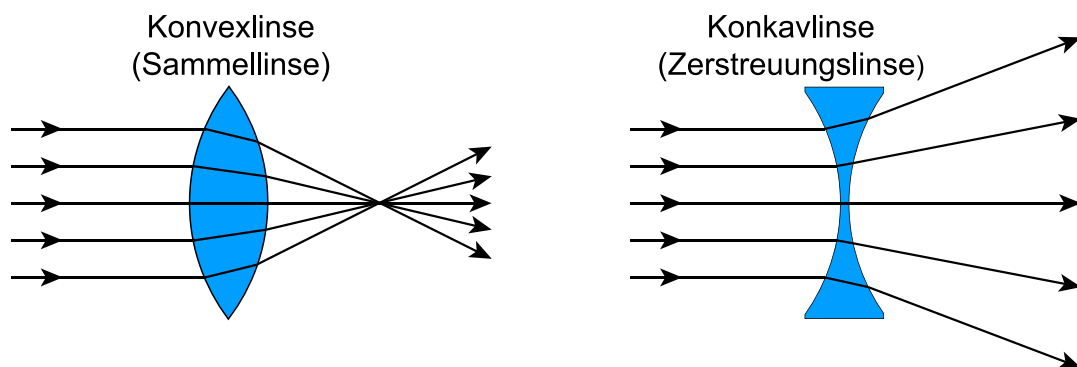


Abbildung 277: Konvex- und Konkavlinse

Quelle: <https://www.leifiphysik.de/optik/optische-linsen>

Bildkonstruktion durch Linsen

Für die Konstruktion von Bildern durch Linsen kann man mindestens zwei von drei Hauptstrahlen verwenden. Bei diesen Hauptstrahlen ist der Verlauf sowohl vor als auch nach der Brechung an der Hauptebene bekannt. Die drei Hauptstrahlen sind der Parallelstrahl, der Mittelpunktstrahl und der Brennpunktstrahl.

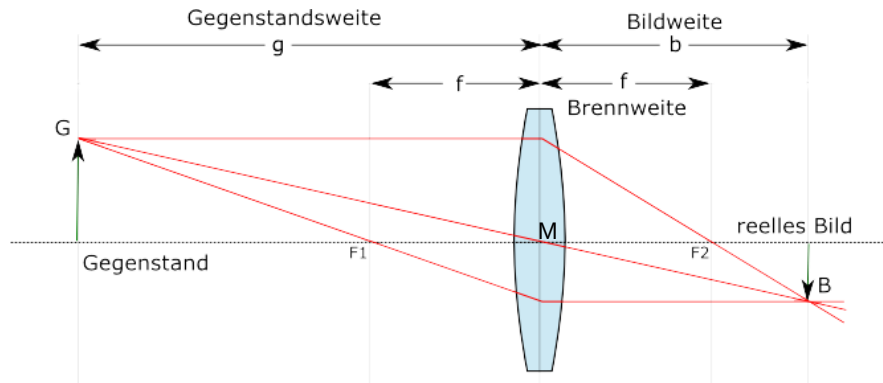


Abbildung 278: Bildkonstruktion am Beispiel einer Sammellinse

Quelle: <https://www.optowiki.info/de/glossary/newtonsche-abbildungsgleichung/>

Der Verlauf der Hauptstrahlen sieht wie folgt aus (Abbildung 278):

- Der Parallelstrahl (rote, oberste Linie), welcher parallel zur optischen Achse ist (schwarze Linie, welche horizontal durch den Mittelpunkt M geht), wird zum Brennpunktstrahl und verläuft somit durch einen Brennpunkt F_2 .
- Der Mittelpunktstrahl, welcher durch den Mittelpunkt M läuft, bewegt sich ohne Richtungsänderung geradlinig weiter.
- Der Brennpunktstrahl, welcher sich durch einen Brennpunkt F_1 bewegt, wird zum Parallelstrahl.

Der Schnittpunkt mindestens zweier Hauptstrahlen nach ihrer Brechung, ergibt einen Bildpunkt. Befindet sich der entstehende Schnittpunkt auf derselben Seite wie der Gegenstand, so handelt es sich um ein virtuelles Bild, welches nicht auf einen Schirm projiziert werden kann. Dies geschieht beispielsweise, wenn sich der Gegenstand bei einer Sammellinse innerhalb des Brennpunktes F_1 befindet (Lupe) oder bei einer Streulinse.

Abbildungsgleichung

Man kann die Gegenstandsweite g , die Bildweite b und die Brennweite f in Relation zueinander setzen. Dazu betrachtet man den Mittelpunktstrahl, sowie die optische Achse mit Hilfe des Strahlensatzes, was zum folgenden Verhältnis führt:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (154)$$

Dabei ist B die Bildhöhe und G die Gegenstandshöhe. Betrachtet man den Brennpunktstrahl auf der Bildseite mit Hilfe des Strahlensatzes, so ergibt dies folgendes Verhältnis:

$$\frac{B}{G} = \frac{b-f}{f} \quad (155)$$

Setzt man nun die beiden Verhältnisse gleich, so ergibt sich durch geschickte Umformung die Abbildungsgleichung (Kuchling, 2011, S. 369 ff.):

$$\frac{b}{g} = \frac{b-f}{f} \Leftrightarrow \frac{b}{g} = \frac{b}{f} - 1 \Leftrightarrow \frac{b}{g} + 1 = \frac{b}{f} \Leftrightarrow \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (156)$$

Material

1 Weinglas

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Man stellt das Weinglas auf eine Fläche und betrachtet durch dieses die Umgebung. Der Bildausschnitt durch das Glas erscheint aufrecht jedoch minimal verkleinert. Füllt man das Glas im Anschluss mit Wasser, so dreht sich das betrachtete Bild um und wird deutlich verkleinert. Links und rechts scheinen ebenso vertauscht zu sein.

Physikalische Erklärung

Das leere Glas wirkt anfangs wie eine Konkavlinse, bei welcher ein virtuelles, aufrechtes und verkleinertes Bild entsteht. Betrachtet man den Strahlengang durch einen dicken Glasrand, so erkennt man, dass die Lichtstrahlen gestreut werden (Abbildung 279). Beim Weinglas ist das Glas jedoch sehr dünn, wodurch der gestreute Effekt weniger stark auftritt. Befüllt man weiters das Glas mit Wasser, so ist der Unterschied der Brechzahlen zwischen Glas und Wasser geringer als bei Glas und Luft, wodurch die Brechung soweit vom leeren Glas abweicht, dass das befüllte Glas als Sammellinse funktioniert.

Bei einer Sammellinse hat die Gegenstandsweite g einen Einfluss auf das Bild. Um den Einfluss genauer zu bestimmen, vergleicht man die Gegenstandsweite g mit der Brennweite f :

- Ist die Gegenstandsweite kleiner als die Brennweite, also $g < f$, so entsteht ein aufrechtes, vergrößertes und virtuelles Bild (Lupe).
- Ist die Gegenstandsweite gleich der Brennweite, also $g = f$, so kreuzen sich die austretenden Lichtstrahlen niemals und es entsteht somit kein Bild.
- Ist die Gegenstandsweite größer als die Brennweite, jedoch kleiner als die zweifache Brennweite, also $2f > g > f$, so entsteht ein reelles, vergrößertes aber verkehrtes Bild.
- Ist die Gegenstandsweite gleich der zweifachen Brennweite, also $g = 2f$, so wird der Gegenstand verkehrt, reell und in Originalgröße dargestellt.
- Ist die Gegenstandsweite größer als die doppelte Brennweite, also $g > 2f$, so entsteht ein verkleinertes, verkehrtes und reelles Bild (Abbildung 280). Dieser Fall trifft auf das vorliegende Experiment zu.



Abbildung 279: Strahlengang durch ein leeres dickwandiges Glas

Quelle: Erb & Schön, 1990, S. 293

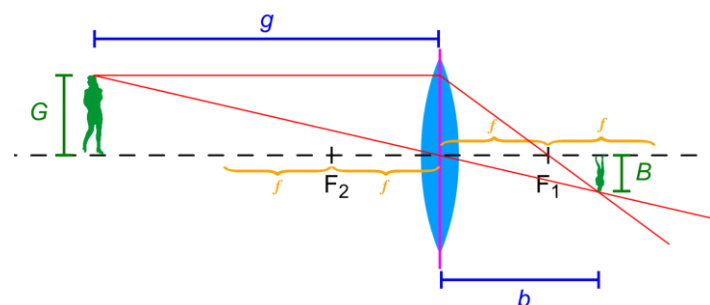


Abbildung 280: Strahlengang eines Gegenstands, welcher sich in größerer Entfernung befindet, als der doppelten Brennweite

Quelle: <https://www.leifiphysik.de/optik/optische-linsen>



Abbildung 281: Leeres Weinglas wirkt wie eine Konkavlinse



Abbildung 282: Mit Wasser befülltes Trinkglas wirkt wie eine Sammellinse

Material

1 Kerzenständer
1 Stabkerze
1 Schusterkugel
1 Folie mit Gittermuster
Feuerzeug
Destilliertes Wasser

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Schusterkugel wird mit destilliertem Wasser befüllt und auf ihrem Stopfen auf eine Arbeitsfläche, nahe einer Wand gestellt. Die Kerze wird am Stativ angebracht und angezündet. Die Flamme sollte auf Höhe der breitesten Stelle der Schusterkugel liegen. Nun wird die Kerze vor der Kugel platziert. Anschließend werden die Abstände so variiert, dass ein verkehrtes und scharfes Bild der Flamme auf der Wand erkennbar ist (Abbildung 283). Führt man nun mit der Kugel näher zur Kerze, so wird das Abbild der Flamme größer, unschärfer und die Intensität lässt nach.

Bei einem zweiten Experiment wird die Schusterkugel bis knapp unter dem Rand mit destilliertem Wasser befüllt. Anschließend legt man die Kugel auf eine Folie mit Gittermuster. In der eingeschlossenen Luftblase erkennt man eine tonnenförmige Verzeichnung (in Abbildung 284 durch blauen Rand hervorgehoben), während man in der Umgebung der Luftblase eine kissenförmige Verzeichnung erkennt. Unterhalb der Kugel befindet sich eine Zylinderlinse, welche das Bild vergrößert und verzerrt.

Physikalische Erklärung

Während sich eine leere Schusterkugel wie eine Konkavlinse verhält, so verhält sich die mit Wasser befüllte Kugel wie eine kurzbrennweitige Konvexlinse (Exp. [84]). Dies diente Handwerkern in früheren Zeiten als Beleuchtung. In diesem Experiment wurden Gegenstandsweite und Bildweite so gewählt, dass ein scharfes reelles Bild entsteht. Um es als Schusterkugel zu verwenden, wurde jedoch eine größere Bildweite gewählt. Somit hatte man zwar kein scharfes Abbild der Kerzenflamme, jedoch ein größeres Bild und dadurch eine größere ausgeleuchtete Fläche.

Die Verzerrungen des Gitters entstehen sowohl im kugelförmigen als auch im zylinderförmigen Teil der Linse aufgrund der stark abgerundeten Linsenform. Wie in Experiment [84] hängt es vom Brechungsindex ab, ob die Lichtstrahlen am Rand der Kugel bzw. Luftblase gestreut oder gesammelt werden, weshalb man einmal eine tonnenförmige und einmal eine kissenförmige Verzeichnung erkennt.



Abbildung 283: Kerzenlicht betrachtet durch eine Schusterkugel

Apparatur: TU-Graz

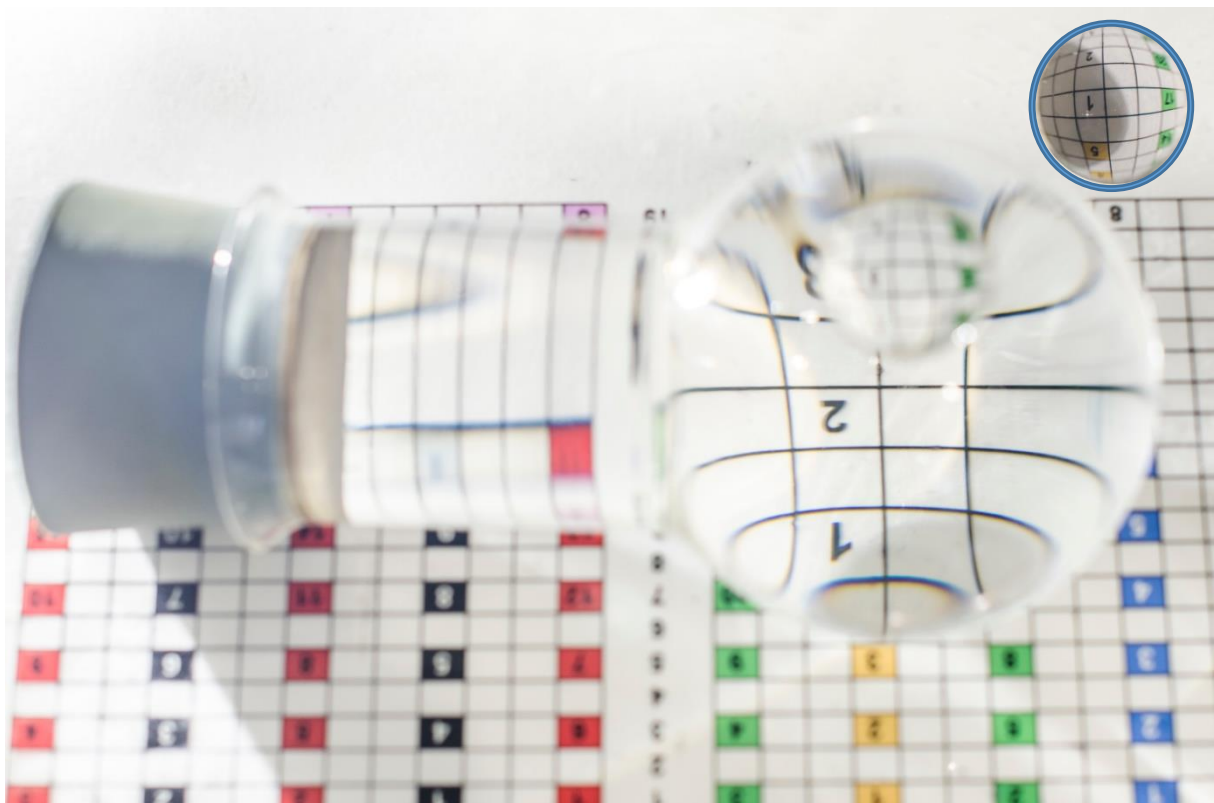


Abbildung 284: Kissenförmige Verzeichnung beim Wasser. Tonnenförmige Verzeichnung in der Luftblase (rechts oben, blau umrandet)

Apparatur: TU-Graz

Material

1 Trinkglas (zylindrisch)

1 Baustrahler

Wasser

**Versuchsdurchführung und Beobachtung**

Das zylindrische Trinkglas wird mit Wasser befüllt und auf die Arbeitsfläche gestellt. Leuchtet man nun mit dem Baustrahler von schräg oben in Richtung Glas, so kann man im Glas ein Lichtmuster erkennen, dessen Einschluss an ein

Herz erinnert. Umso niedriger man den Baustrahler hält, umso flacher ist der Einfallswinkel des Lichtes im Glas und umso stärker und größer erscheint der Lichtkegel im Schatten des Glases (Abbildung 287).

Physikalische Erklärung

Bei diesem Lichtmuster handelt es sich um Brennflächen, welche Kaustiken genannt werden. Prinzipiell unterscheidet man Kaustiken nach ihrer Entstehungsart. Sind sie das Resultat von Spiegelungen, wie jene herzförmige Brennfläche im Glas, so handelt es sich um eine Katakaustik. Ist die Kaustik das Resultat einer Brechung an einer optischen Fläche so handelt es sich dabei um eine Diakaustik. Weiters unterscheidet man zwischen einer Kaustik 1. Art und 2. Art. Bei einer Kaustik 1. Art handelt es sich um eine punktförmige Lichtquelle, während bei der Kaustik 2. Art parallel einfallende Lichtstrahlen betrachtet werden (Kloos, 2007, S.24). In diesem Experiment handelt es sich um eine Kaustik 2. Art, da eine weit entfernte, große Lichtquelle verwendet wurde.

Bei vorliegender Katakaustik werden die parallel einfallenden Lichtstrahlen stets so am Glas reflektiert, dass der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht. Dadurch schneiden sich bei einem kreisförmigen Hohlspiegel, in diesem Fall beim Trinkglas, nur die zur optischen Achse nahen Lichtstrahlen im Brennpunkt $F = \frac{r}{2}$. Umso ferner die einfallenden Lichtstrahlen von der optischen Achse sind, umso näher liegt ihr Schnittpunkt am Spiegel (Abbildung 285). Beim entstehenden Muster handelt es sich um eine Epizykloide, welche durch das Abrollen eines Kreises mit dem Radius $\frac{r}{4}$ auf dem Kreis mit dem Radius $\frac{r}{2}$ um den Mittelpunkt entsteht (Meschede, 2010, S. 509).

Bei der Diakaustik werden Strahlen, die weiter von der optischen Achse entfernt sind, außerordentlich stärker gebrochen, als Strahlen, die näher zur optischen Achse liegen (Abbildung 286). Dies führt ebenso dazu, dass kein Bildpunkt, sondern eine Brennfläche entsteht. Sowohl bei der Diakaustik als auch bei der Katakaustik liegt die Ursache in der sphärischen Aberration, einem Abbildungsfehler (Tipler & Mosca, 2008, S. 1066).

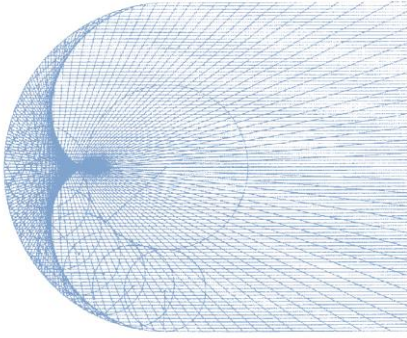


Abbildung 285: Entstehung Katakaustik
Quelle: Meschede, 2010, S. 509

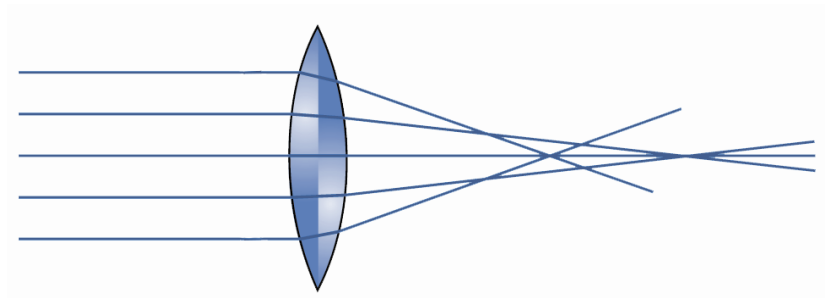


Abbildung 286: Entstehung Diakaustik
Quelle: Meschede, 2010, S. 510

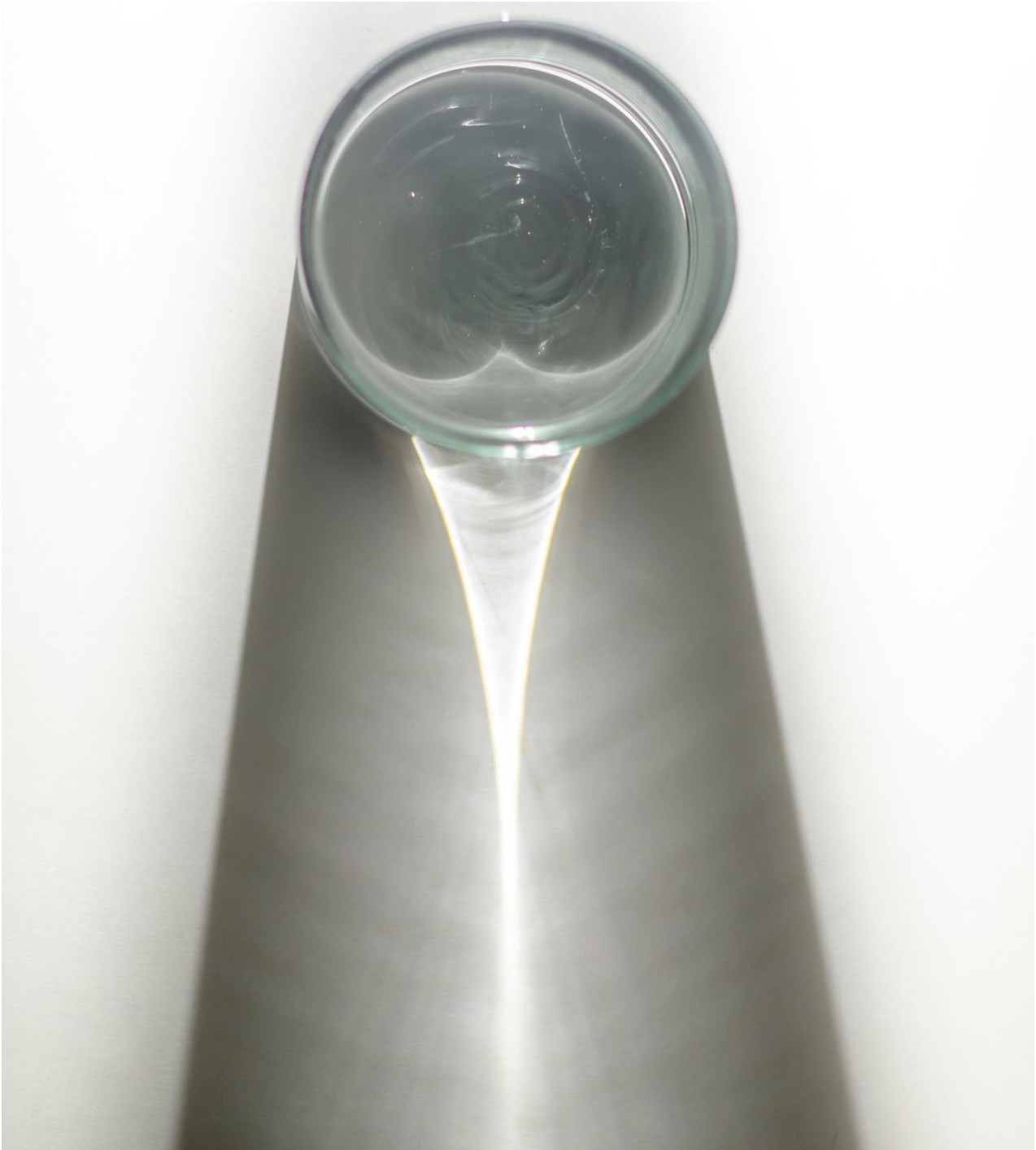


Abbildung 287: Entstehung einer Katakaustik sowie Diakaustik mit Hilfe eines Wasserglases

3.3.5 Interferenzfarben

Interferenz

Zwei Wellen, welche sich mit gleicher Wellenlänge λ und gleicher Amplitude in dieselbe Richtung bewegen, weisen einen Gangunterschied δ zueinander auf. Da sich die Wellen in dieselbe Richtung bewegen, überlagern sie sich gegenseitig. Diese Überlagerung wird Interferenz genannt. Die Interferenz unterliegt dem Superpositionsprinzip und kann sowohl destruktiv als auch konstruktiv sein. Man betrachte nun einfachheitshalber zwei Wellen mit gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude bei unterschiedlichem Gangunterschied δ :

- Ist der Gangunterschied $\delta = 0$, so liegen zwei idente Wellen übereinander. Diese interferieren vollständig konstruktiv. Dabei bleibt die Wellenlänge der resultierenden Welle gleich, jedoch ist deren resultierende Amplitude doppelt so groß.
- Entspricht der Gangunterschied der halben Wellenlänge, also $\delta = \frac{\lambda}{2}$, so löschen sich die beiden Wellen gegenseitig aus. Die Interferenz ist somit vollständig destruktiv.

Je nach Lage der beiden Wellen zueinander, können die Wellen so konstruktiv oder destruktiv interferieren, dass die Amplitude der resultierenden Welle zwischen null und der doppelten Amplitude der Ausgangswellen ist.

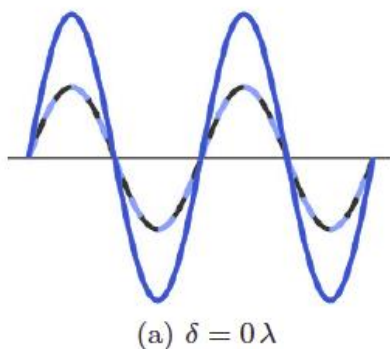


Abbildung 288: Konstruktive Interferenz zweier Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge. Gangunterschied $\delta = 0$

Quelle: Kommer et al., 2015, S. 531

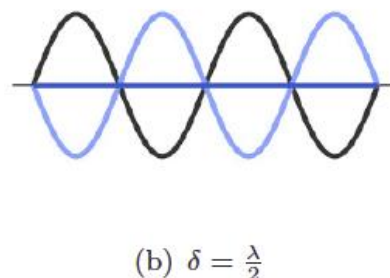


Abbildung 289: Destruktive Interferenz zweier Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge. Gangunterschied $\delta = \frac{\lambda}{2}$

Quelle: Kommer et al., 2015, S. 530

Die Wellen haben eine Periodizität, die der Wellenlänge λ entspricht. Somit lassen sich für die vollständig destruktive als auch konstruktive Interferenz allgemein gültige Bedingungen für den Gangunterschied aufstellen:

- Konstruktive Interferenz: $\delta = n \cdot \lambda$
- Destruktive Interferenz: $\delta = (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

Dabei ist $n \in \mathbb{N}_0$ eine natürliche Zahl.

Interferenzfarben

Üblicherweise lassen sich Farben durch die Absorption von bestimmten Wellenlängen aus dem weißen Sonnenlicht erklären. Wird beispielsweise der Magentaanteil des Lichtes an einem Objekt absorbiert, so erscheint dieses in der Komplementärfarbe Grün (Kapitel 3.3.2). Farben können jedoch aufgrund der Struktur eines Objektes entstehen. Ein Beispiel dafür sind die leuchtend, schillernden Interferenzfarben, wie sie zum Beispiel bei einer Pfauenfeder oder einem Ölfilm vorkommen. Betrachtet man eine dünne Schicht mit der Dicke d eines dichteren Mediums als Luft, mit der Brechzahl n , auf welche ein weißer Lichtstrahl unter dem Winkel α fällt, so wird ein Teil des Lichtes an der Oberfläche reflektiert, wobei ein Phasensprung von 180° auftritt. Durch den Phasensprung findet eine Verschiebung der Welle um $\frac{\lambda}{2}$ statt. Der andere Teil des Lichtstrahls wird zum Lot hin gebrochen (Abbildung 290). Der Winkel zwischen dem gebrochenen Lichtstrahl und dem Lot beträgt β . Auf der gegenüberliegenden Grenzfläche des Mediums angekommen, wird der gebrochene Teilstrahl wieder teilweise reflektiert. Erneut an der ersten Grenzfläche angekommen, wird wieder ein Teil dieses Lichtstrahls reflektiert und ein Teil wird vom Lot weggebrochen und verläuft parallel mit dem ersten reflektierten Lichtstrahl. Die beiden parallelen Strahlen haben somit einen Gangunterschied δ . Der beschriebene Strahlengang erfolgt jedoch nicht nur mit einem Lichtstrahl, sondern mit vielen parallelen Lichtstrahlen. Dadurch überlagert sich beispielsweise die erste Reflexion des zweiten Lichtstrahls mit dem an der zweiten Grenzfläche reflektierten Teilstrahl des ersten Lichtstrahls, wodurch abhängig vom Gangunterschied konstruktive oder destruktive Interferenz entsteht (Abbildung 291). Beträgt der Gangunterschied $\delta = k \cdot \lambda$, so findet destruktive Interferenz statt. Ist er jedoch $\delta = (2 \cdot k + 1) \cdot \lambda$, so ist die Interferenz konstruktiv. Dabei ist $k \in \mathbb{N}_0$ eine natürliche Zahl. Die Formeln sind aufgrund der Verschiebung um $\frac{\lambda}{2}$ vertauscht. Da die Interferenz von der Wellenlänge abhängt und weißes Licht aus einem Spektrum unterschiedlicher Wellenlängen besteht, welche unterschiedlich stark gebrochen werden, existieren verschiedenartige Interferenzen. Wird nun eine Wellenlänge durch destruktive Interferenz eliminiert, so sieht man deren Komplementärfarbe. Aufgrund der größeren Amplitude bei konstruktiver Interferenz, erscheinen die Farben schillernd (Kommer et al., 2015, S. 530 ff. ; Meschede, 2010, S. 554).

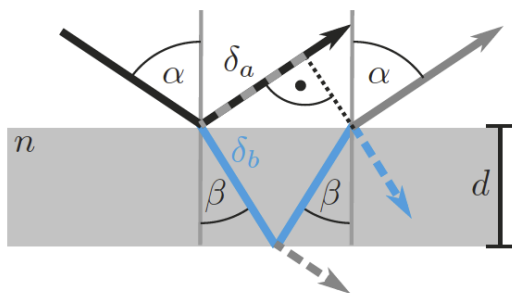


Abbildung 290: Strahlengang von Licht an einer dünnen Schicht. Quelle: (Kommer et al., 2015, S. 532)

Quelle: Kommer et al., 2015, S. 532

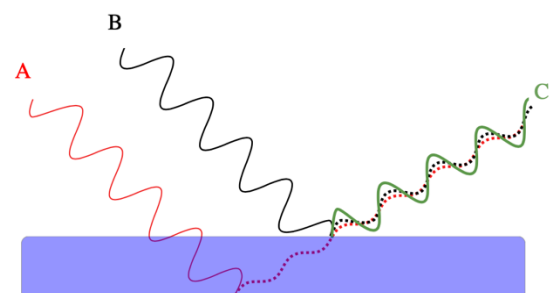


Abbildung 291: Konstruktive Interferenz zweier Teilstrahlen bei einer dünnen Schicht

Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_interference

Material

Seifenblasenflüssigkeit

Beleuchtung

Variante 2

Draht

Kombizange

Schüssel (klein)

Seifenblasenflüssigkeit

Blatt Papier (A4)

Baustrahler

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Bei der ersten Variante des Experiments werden einfach nur Seifenblasen beobachtet, welche von schräg hinten beleuchtet werden. Insbesondere soll der Fokus auf deren Farben gelegt werden. Es fällt auf, dass diese seitlich am buntesten sind, oben und unten etwas abgeschwächt aber immer noch farbig und mittig immer durchsichtig bzw. schwarz erscheinen. Die Farben ändern sich auch mit der Position der Seifenblasen (Abbildung 292).

Bei der zweiten Variante wird der Draht mit Hilfe der Kombizange zu einer runden Form gebogen. Die Seifenblasenflüssigkeit wird dann in die Schüssel geleert und der Draht anschließend in dieses Gemisch getaucht. Das A4

Papier wird so gefaltet, dass es von alleine vor dem Baustrahler stehen kann, welcher sogleich in Betrieb genommen wird. Hält man nun die Seifenlamelle im ca. 45° Winkel vor dem diffusen Licht, so kann man im obersten Bereich Turbulenzen beobachten, während darunter immer dünner werdende, bunte Schichten erkennbar sind (Abbildung 293). Abbildung 294 zeigt eine Makroaufnahme der Turbulenzen im oberen Bereich.

Physikalische Erklärung

Die Seifenblase sowie die Seifenlamelle bestehen aus einer dünnen Seifenschicht. Außerhalb und innerhalb dieser Schicht befindet sich Luft. Treffen nun Lichtstrahlen auf die Seifenblasen, so wird ein Teil des Lichtes an der äußeren Grenzfläche und ein Teil des Lichtes, welches zuvor wellenlängenabhängig gebrochen wurde, an der inneren Grenzfläche reflektiert. Diese zwei reflektierten Strahlen weisen einen von der Schichtdicke abhängigen Gangunterschied auf und können mit dem reflektierten Teilstrahl eines benachbarten Lichtstrahls interferieren. Aufgrund der Abhängigkeit von der Schichtdicke, kann dabei immer eine bestimmte Wellenlänge destruktiv interferieren und der Betrachter nimmt die Komplementärfarbe wahr (Kapitel 3.3.2). Die unterschiedlichen Farben rühren daher, dass die Seifenschicht nicht überall gleich dick ist. Weiters hängen die Farben auch vom Einfallswinkel des Lichtes ab, wodurch im Zentrum meist keine Farben zu bewundern sind. Betrachtet man die senkrecht stehende Seifenlamelle, so ist die Seifenschicht aufgrund der Schwerkraft, an der untersten Stelle am dicksten. Durch das Sinken nach unten, entstehen die Turbulenzen in höheren Regionen, welche sich jedoch mit zunehmender Tiefe auflösen. Da in den ruhigeren Regionen die Schichtdicke konstant zunimmt, sind dort horizontale Farbstreifen zu erkennen (Stuart & Klages, 2010, S. 229).



Abbildung 292: Seifenblasen schillern aufgrund von Interferenzfarben

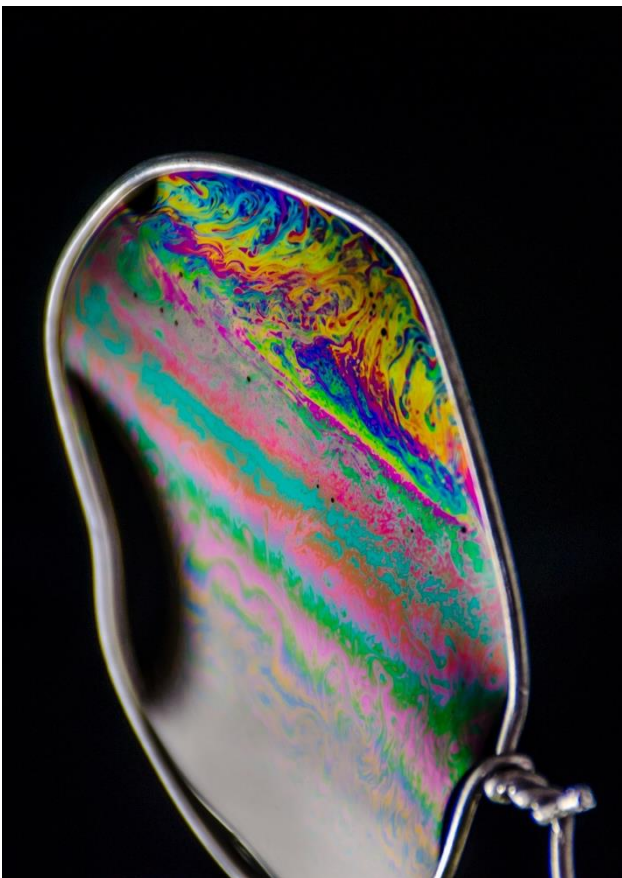


Abbildung 293: Senkrecht stehende Seifenlamelle mit farblichen Turbulenzen

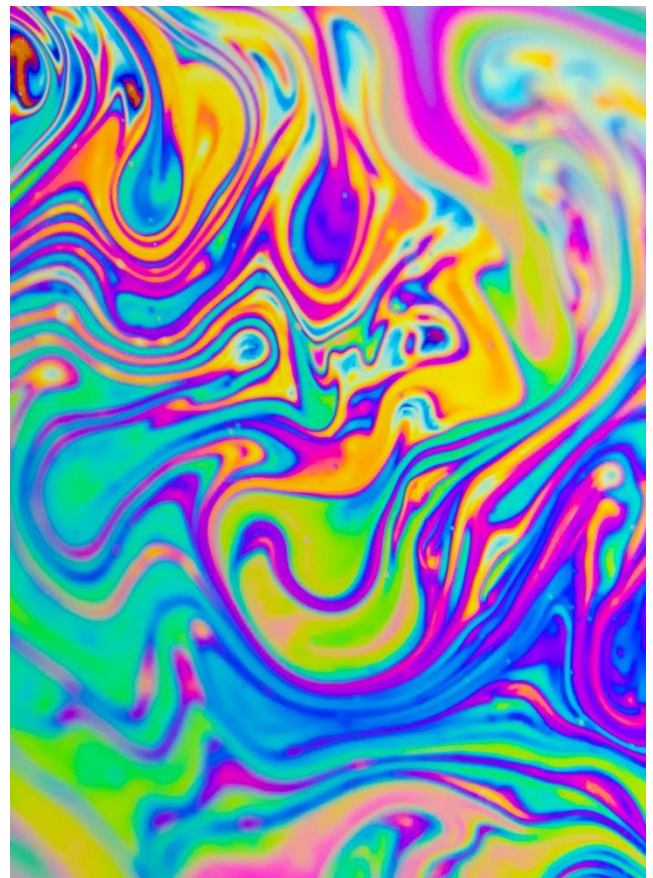


Abbildung 294: Ausgeprägtes Farbmuster der entstehenden Turbulenzen

3.4 Versuche zur Akustik

[88] DIE SINGENDEN GLÄSER

Material

2 Rotweingläser

6 Weißweingläser

Wasserkrug

Wasser

Dosierspritze

Stimmgerät

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Weingläser werden der Reihe nach aufgestellt, zuerst die zwei Rotweingläser und anschließend die sechs Weißweingläser. Nun werden die Gläser nacheinander mit Wasser aufgefüllt, beginnend beim ersten Rotweinglas, welches man ca. zu dreiviertel befüllt. Indem man einen Finger befeuchtet und mit diesem am Rand des Glases entlanggleitet (Abbildung 296), entstehen Schwingungen, die man sowohl hören als auch sehen kann (Abbildung 297).

In diesem Experiment wurde versucht, die G-Dur-Tonleiter nachzubilden. Mit einem geschulten Gehör oder mit einem Stimmgerät kann man überprüfen, ob der jeweilige Ton richtig ist. Beim ersten Rotweinglas sollte es das tiefe G sein. Ist der Ton zu tief, so kann man dem Glas mit der Dosierspritze etwas Wasser entnehmen, ist er zu hoch so fügt man dem Glas noch etwas Wasser hinzu. Hat man den Ton getroffen, so fährt man analog mit den anderen Gläsern fort, solange bis die G-Dur-Tonleiter komplett ist. Wie man in Abbildung 295 erkennt, sinkt der Wasserstand mit jedem weiteren Glas und der Ton wird dabei immer höher.

Physikalische Erklärung

Bewegt sich der Finger über den Rand des Glases, so sieht die Bewegung nur makroskopisch betrachtet, gleichmäßig aus. Betrachtet man jedoch die durch den Finger aufgebrachte Kraft genauer, so erkennt man, dass sich diese in zwei Kraftkomponenten aufteilen lässt. Eine Kraft drückt dabei vertikal auf das Glas, während die andere für die horizontale Bewegung verantwortlich ist. Beginnt die Bewegung, so drückt der Finger auf den Glasrand, während simultan die zweite Kraftkomponente nach vorne drückt. Dabei verformt sich der Finger bis die vorwärts gerichtete Kraft die Haftreibung übertrifft und eine Vorwärtsbewegung stattfindet. Dabei deformiert sich der Finger so schnell, dass die auf das Glas wirkende Kraft des Fingers abnimmt. Dadurch kann die Haftreibung nicht mehr überwunden werden, wodurch sich der Finger erneut verformt und der Prozess von vorne beginnt. Somit findet ein periodischer Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung statt, wodurch das Glas in Schwingung versetzt wird. Entspricht eine Frequenz des Frequenzspektrums dieser Schwingung der Eigenfrequenz des Glases, so kommt es zur Resonanz, wodurch die Amplitude der Schwingung erhöht wird. Die dabei entstehende Schwingung wird auf die Luft übertragen und es entsteht ein Ton. Durch

unterschiedliches Befüllen des Glases wird die Eigenfrequenz geändert und somit auch die Tonlage. Umso mehr Wasser sich im Glas befindet, umso tiefer ist die Frequenz und somit auch der Ton (Hilscher, 2010, S. 545-546). Sieht man genau hin, so erkennt man in einem vollen Glas die Schwingungen. Dort, wo sich viele Wellen befinden, überwiegt die Haftreibung, dort wo das Wasser ruhig erscheint, überwiegt die Gleitreibung.



Abbildung 295: Durch unterschiedliche Mengen an Wasser entsteht die Töne einer Tonleiter



Abbildung 296: Durch Bewegen des Fingers am Rand des Glases entsteht ein Ton



Abbildung 297: Haft- und Gleitreibung des Fingers erzeugen Schwingungen im Glas

Material

1 Bassbox

1 3,5 mm Klinkenstecker
(beidseitig)

1 Aquaristikschauch
(1,5 m lang; Wandstärke
1 mm; $\varnothing$ 1 cm)

1 Strohhalme

1 Trichter

1 Kamera (welche mit 24
fps filmen kann)

1 Stativ

1 Frequenzgenerator
(oder Smartphone mit
entsprechender App)

Stromquelle

Schere

Klebeband

Wasserkrug

Wasser



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Aufbau ist in Abbildung 301 ersichtlich. Zur Vorbereitung werden jegliche Abdeckungen der Bassbox abgenommen, sodass man freien Zugang zum Lautsprecher hat. Im nächsten Schritt schneidet man ca. 2 cm eines Strohhalmes ab und befestigt das abgeschnittene Ende mit Klebeband am Aquaristikschauch. Dadurch soll ein schmaler und gleichmäßiger Wasserstrahl ermöglicht werden. Am anderen Ende des Schlauchs wird der Trichter befestigt. Darauf folgend wird der Schlauch mit Hilfe des Klebebands an der Bassbox fixiert. Dabei ist darauf zu achten, dass der schmale Austritt etwas unterhalb der Box liegt. Der Schlauch darüber muss am Lautsprecher festgeklebt werden, sodass sich beides gemeinsam bewegen kann. Der restliche Schlauch wird so fixiert, dass die Konstruktion stabil bleibt. Die Box wird nun an die Kante eines Tisches gestellt, mit Strom versorgt und über den 3,5 mm Klinkenstecker wird ein Smartphone angeschlossen. Auf dem Smartphone wird eine Frequenzgenerator-App geöffnet und ein Ton mit 24 Hz eingestellt. Des Weiteren wird eine Kamera mit Stativ aufgestellt, bei welcher sogleich eine Aufnahme mit 24 fps (frames per second) gestartet wird. Füllt man nun Wasser in den Trichter, so beginnt das Wasser aus der verengten Öffnung zu fließen (Abbildung 298). Aktiviert man den Frequenzgenerator mit 24 Hz, so sieht man mehrere Wasserstrahlen austreten (Abbildung 300).

Betrachtet man das Geschehen jedoch am Bildschirm der Kamera, so erkennt man eine stehende Sinuswelle (Abbildung 299). Durch die Lautstärke kann man die Amplitude der Welle verändern. Ändert man die Frequenz auf 23 Hz, so fließt das Wasser rückwärts in den Schlauch, bei 25 Hz ändert sich die Richtung erneut und das Wasser fließt vorwärts aus dem Schlauch heraus.

Physikalische Erklärung

Der Ton, welcher mit der Frequenzgenerator-App generiert wird, hat 24 Hz . Dies bedeutet, dass in einer Sekunde 24 Schwingungen stattfinden, welche mechanisch an der Lautsprechermembran erzeugt werden. Dadurch wird der Schlauch in einer Sekunde 24 mal vor und zurück bewegt, wodurch eine Sinuswelle entsteht. Die Amplitude dieser Welle lässt sich durch Vergrößern der Lautstärke erhöhen. Diese Bewegung ist für das Auge zu schnell, wodurch man mehrere, teilweise miteinander verbundene Wasserstrahlen erkennt (Abbildung 300).

Betrachtet man das Geschehen durch die Kamera, so ist die Bildrate, mit welcher gefilmt wird sowie die Belichtungszeit, entscheidend. Die Belichtungszeit beschreibt die Dauer, in der das Licht auf den Sensor fällt. Betrachtet man, wie in diesem Experiment, eine schnelle Bewegung, so muss man eine kurze Belichtungszeit wählen, da die Bewegung ansonsten verschwommen erscheint. Bei Abbildung 300 wurde eine Belichtungszeit von $\frac{1}{30}\text{ s}$ gewählt, während bei Abbildung 299 die Belichtungszeit mit $\frac{1}{1000}\text{ s}$ deutlich kürzer gewählt wurde. Die Belichtungszeit ist auch beim Filmen relevant.

Die zweite wichtige Einstellung ist die Bildrate. Diese beschreibt beim Filmen, wie viele Bilder in der Sekunde erzeugt werden. Dieser Schritt kennzeichnet auch den entscheidenden Faktor in diesem Experiment. Filmt man mit 24 fps (frames per second), d. h. mit 24 Bildern in der Sekunde, so bewegt sich das Wasser bei 24 Hz zwischen zwei Bildern genau um eine Wellenlänge weiter. Da stets die gleiche Wellenlänge vorherrscht, wird die Wasserwelle im scheinbar gleichen Moment gefilmt und der Betrachter bekommt den Eindruck, dass das Wasser steht. Ändert man die Frequenz des Tons auf 23 Hz , so bewegt sich das Wasser beim Filmen mit 24 fps zwischen den Einzelbildern etwas weniger weit fort, als es einer Wellenlänge entspricht. Dadurch scheint es, als hätte sich die Wasserwelle ein kleines Stück zurückbewegt. Im Video sieht es daher aus, als würde die Wasserwelle nach oben in den Schlauch zurückfließen. Ändert man die Frequenz des Tons auf 25 Hz , so bewegt sich die Welle zwischen zwei Bildern etwas mehr fort als es einer Wellenlänge entspricht, wodurch es aussieht, als würde das Wasser langsam nach unten fließen.



Abbildung 298: Wasserstrahl bei ausgeschalteter Bassbox

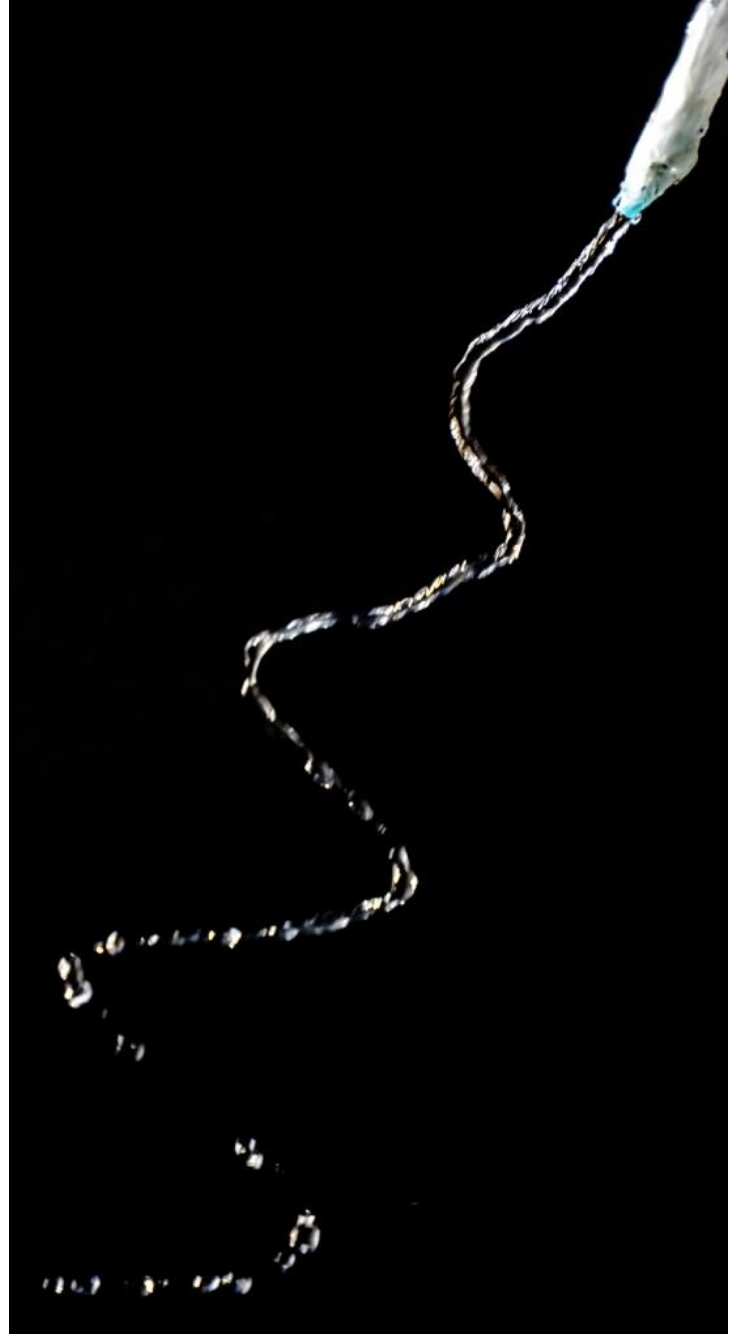


Abbildung 299: Erkennbare Sinuswelle bei eingeschalteter Bassbox und Aufnahme mit 24 fps



Abbildung 300: Für das freie Auge sichtbarer Wasserstrahl



Abbildung 301: Aufbau bestehend aus Trichter, Schlauch, Frequenzgenerator und Bassbox

Material

1 Tripelpunkt-Wasserzelle



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Tripelpunkt-Wasserzelle wird mit einem schnellen Ruck nach oben gezogen und wieder in ihre Ausgangslage bewegt. Dadurch entsteht ein Knall (siehe Video). Diese Bewegung kann des Öfteren wiederholt werden und jedes Mal erfolgt dabei der Ton.

Physikalische Erklärung

Die Physik hinter diesem Phänomen ist die Kavitation (Exp. [38]). Die Tripelpunkt-Wasserzelle ist im Wesentlichen ein mit Wasser befülltes Rohr, welches evakuiert wurde. Somit befinden sich lediglich Wasser und Wasserdampf in ihr, welche ein stationäres Gleichgewicht einnehmen. Bewegt man die Wasserzelle mit einem schnellen Ruck nach oben und anschließend wieder nach unten, so folgt das Wasser in der Zelle der Bewegung nach oben und möchte diese, aufgrund der Trägheit, auch dann fortsetzen, wenn die Flasche wieder nach unten bewegt wird. Dadurch entsteht ein hoher Geschwindigkeitsunterschied zwischen der Wasserzelle und dem Wasser. Dies ist gleichbedeutend mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit. Betrachtet man die Bernoulli-Gleichung, so erkennt man, dass eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit v eine Senkung des statischen Drucks p zur Folge hat.

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \textit{konstant} \quad (157)$$

Fällt der statische Druck unter einen Wert von $23,37 \text{ hPa}$, so verdampft Wasser bereits bei 20°C (Kapitel 3.2.6). Da von oberhalb der Wassersäule kein Wasserdampf nach unten gelangt, kann kein Druckausgleich stattfinden. Somit entstehen aufgrund des geringen Drucks unterhalb der Wassersäule Wasserdampfblasen. Sinkt anschließend die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers, so steigt der statische Druck wieder und die entstandenen Dampfblasen implodieren. Diesen Vorgang nennt man Kavitation. Durch den erneut hohen Druckunterschied kracht das Wasser mit hoher Geschwindigkeit auf den Boden, wodurch der Knall entsteht. Bevor das Wasser anfängt zu kochen, hört man ebenfalls Töne. Diese entstehen ebenso durch Implosion der Gasblasen beim Aufsteigen in kälteres Wasser. (Schlichting & Ucke, 2011, S. 44-45).



Abbildung 302: Wasserhammer – Durch schnelles Auf- und Abwärtsbewegen entsteht ein Knall
Apparatur: TU-Graz

3.5 Versuche zur Elektrik

3.5.1 Leitfähigkeit

[91] SALZWASSER ALS LEITER

Material

1 Schüssel (klein)

1 Blockbatterie 9 V

1 Batterieclip

2 leitende Drähte (isoliert)

2 Leuchtdioden

1 Lüsterklemme

Isolierband

destilliertes Wasser

Salz



Versuchsdurchführung und Beobachtung

An der Batterie wird der Batterieclip angebracht. Eines der beiden Kabeln des Batterieclips wird mit Hilfe der Lüsterklemme und eines weiteren leitenden Drahtes verlängert. Am anderen Ende der Verlängerung werden zwei Leuchtdioden, welche mit Isolierband miteinander verbunden sind, ebenfalls mit Isolierband fixiert. Auch am Ende der zweiten Leuchtdiode wird ein Draht angebracht. Dessen zweites Ende wird so befestigt, dass es in eine Schüssel ragt. Das zweite Kabel des Batterieclips wird ebenso befestigt, dass es in die Schüssel ragt, jedoch ohne das andere Kabel zu berühren. Füllt man nun destilliertes Wasser in diese Schüssel so bleiben die Leuchtdioden im ausgeschalteten

Zustand (Abbildung 303). Schüttet man im Anschluss etwas Salz zum destillierten Wasser dazu, so beginnen die Leuchtdioden zu leuchten (Abbildung 304).

Physikalische Erklärung

Damit ein Material elektrischen Strom leiten kann, müssen bewegliche Ladungsträger vorhanden sein. Dabei unterscheidet man zwischen Elektronenleitung und Ionenleitung. Eine Elektronenleitung kommt beispielsweise in Metallen vor. Die Ionenleitung tritt häufig in Flüssigkeiten und Gasen in Erscheinung. In diesem Experiment ist die Ionenleitung von Interesse. Destilliertes Wasser ist ein Nichtleiter, da es weder über freie Elektronen noch über Ionen verfügt. Mischt man nun das Kochsalz NaCl hinzu, so löst es sich im Wasser indem sich die Wassermoleküle zwischen die Ionen des Kochsalzes drängen. Das Salz hat eine dreidimensionale Gitterstruktur, deren Oberfläche elektrostatisch nicht ausgeglichen ist, da die Anziehung nur durch innenliegende Ionen verursacht wird. Aufgrund der Dipolwirkung von Wasser (Kapitel 2.2.1) wechselwirken die außenliegenden Ionen mit den Wassermolekülen und werden aus ihrer Gitterstruktur gelöst. Anschließend sind die herausgelösten Ionen von Wassermolekülen umgeben und verteilen sich gleichmäßig im Wasser. Die Ionen sind die positiv geladenen Natriumionen Na^+ und die negativ geladenen Chlorionen Cl^- . Wird eine Spannung angelegt, so wandern die Ionen zu dem Pol, der ihrer Ladung entgegengesetzt ist. So wandert das Na^+ zum Minuspol und das Cl^- zum Pluspol. Als Resultat wird Strom geleitet (Kuchling, 2011, S. 495; KICKELBICK, 2008, S. 156).

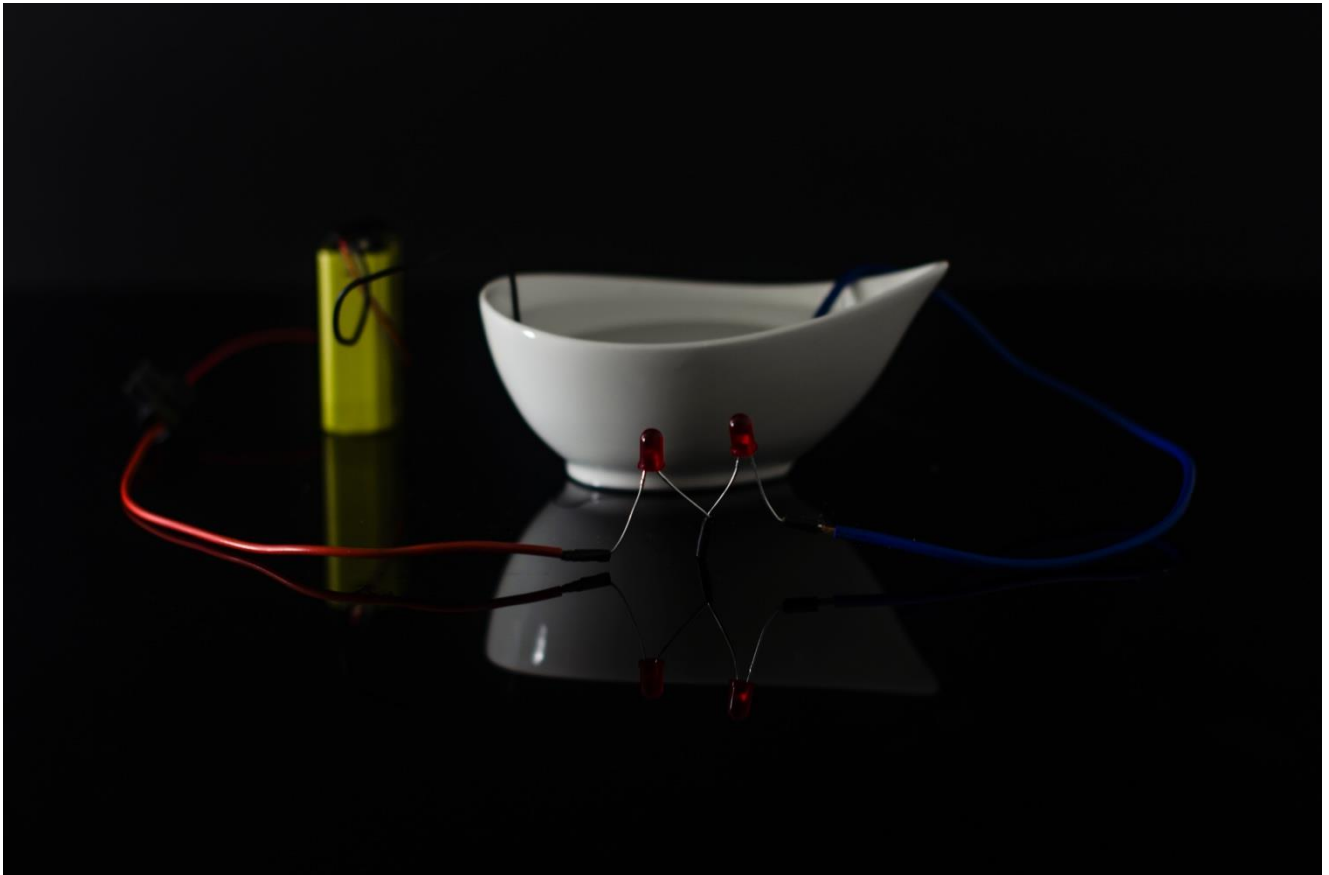


Abbildung 303: Destilliertes Wasser ist ein Nichtleiter

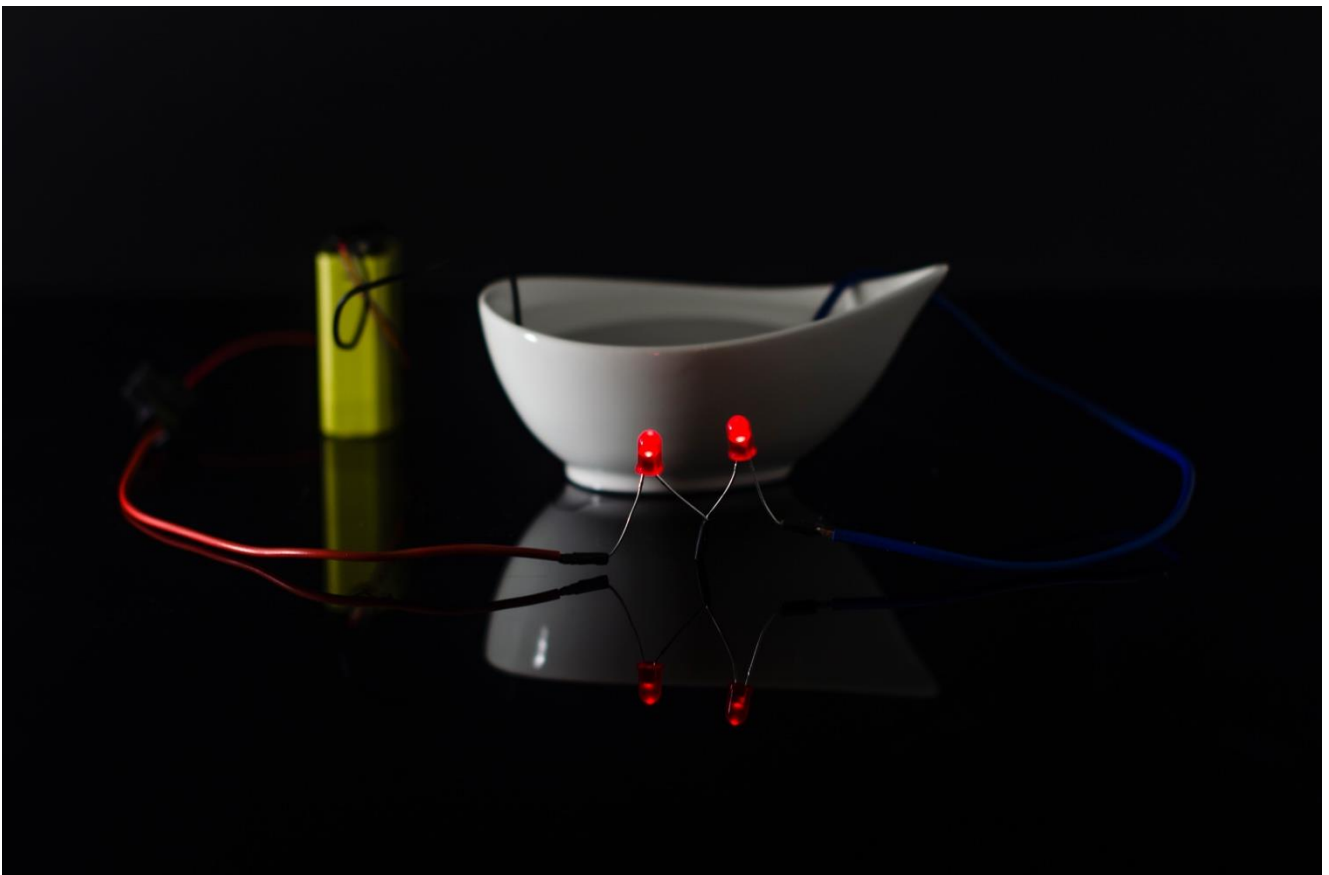


Abbildung 304: Durch die Ionen von Natriumchlorid entsteht ein Stromfluss

3.5.2 Elektrostatik

[92] DER KRUMME WASSERSTRAHL

Material

1 Lineal (30 cm)

1 Mikrofaserdecke

Wasserhahn



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Wasserhahn wird so aufgedreht, dass ein gerader und feiner Strahl austritt (Abbildung 305). Im Anschluss reibt man das Lineal kräftig an der Mikrofaserdecke. Hält man nun das Lineal in die Nähe des Wasserstrahls, so wird dieser vom Lineal angezogen und abgelenkt (Abbildung 306). Entfernt man das Lineal wieder, so fließt das Wasser wieder gerade weiter, bis man das Lineal erneut an den Strahl annähert. Bei Berührung des Wasserstrahls mit dem Lineal fließt das Wasser ebenso gerade.

Physikalische Erklärung

In der Elektrostatik beschäftigt man sich mit elektrischen Ladungen, welche sich in Ruhe befinden. Diese findet man in Nichtleitern. Ist ein Objekt elektrisch neutral, so besitzen seine Atome gleich viele Elektronen wie Protonen. Die Gesamtladung dabei ist null, da ein Proton eine Ladung von $+e$ hat, während ein Elektron eine Ladung von $-e$ hat. Dabei ist e die sogenannte Elementarladung, welche einen Wert von $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ hat. Die Einheit C heißt Coulomb. Die Ladungen treten immer nur als ganzzahlige Vielfache der Elementarladung in Erscheinung. Zwei Ladungen mit identen Vorzeichen stoßen sich ab, während sich Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen anziehen.

Anfangs befinden sich sowohl die Mikrofaserdecke als auch das Lineal in einem elektrisch neutralen Zustand. Durch das Reiben der zwei Materialien aneinander, wird das Lineal elektrisch geladen. Man spricht somit von Reibungselektrizität. Dabei ist nicht die eigentliche Reibung relevant, sondern der molekulare Abstand zweier fester Gegenstände. Der Abstand wird durch die Reibung ermöglicht. Durch die Nähe wechselwirken die Atome an der Grenzschicht. Hat eines der Materialien eine größere Elektronenaffinität, was gleichbedeutend ist mit der Fähigkeit Elektronen zu binden, so nimmt dieses Elektronen des anderen Materials auf. Der Vorgang findet in der Größenordnung von 10^{10} oder mehr Elektronen statt. Somit ist das Material, welches die Elektronen aufnimmt, negativ geladen, während das andere im gleichen Maße positiv geladen ist. In diesem Experiment wird das Lineal negativ und die Decke positiv geladen. Somit baut das negativ geladene Lineal ein elektrisches Feld auf, wonach sich die zuvor ungeordneten Wassermoleküle des Wasserstrahls aufgrund ihrer Dipoleigenschaft (Kapitel 2.2.1) ausrichten. Dadurch ist der positive Teil des Wassermoleküls, also der Wasserstoff in Richtung des Wasserstrahls ausgerichtet und wird von diesem angezogen (Tipler & Mosca, 2008, S. 652-653; Berndt, 2009, S. 14).



Abbildung 305: Wasserstrahl aus aufgedrehtem Wasserhahn

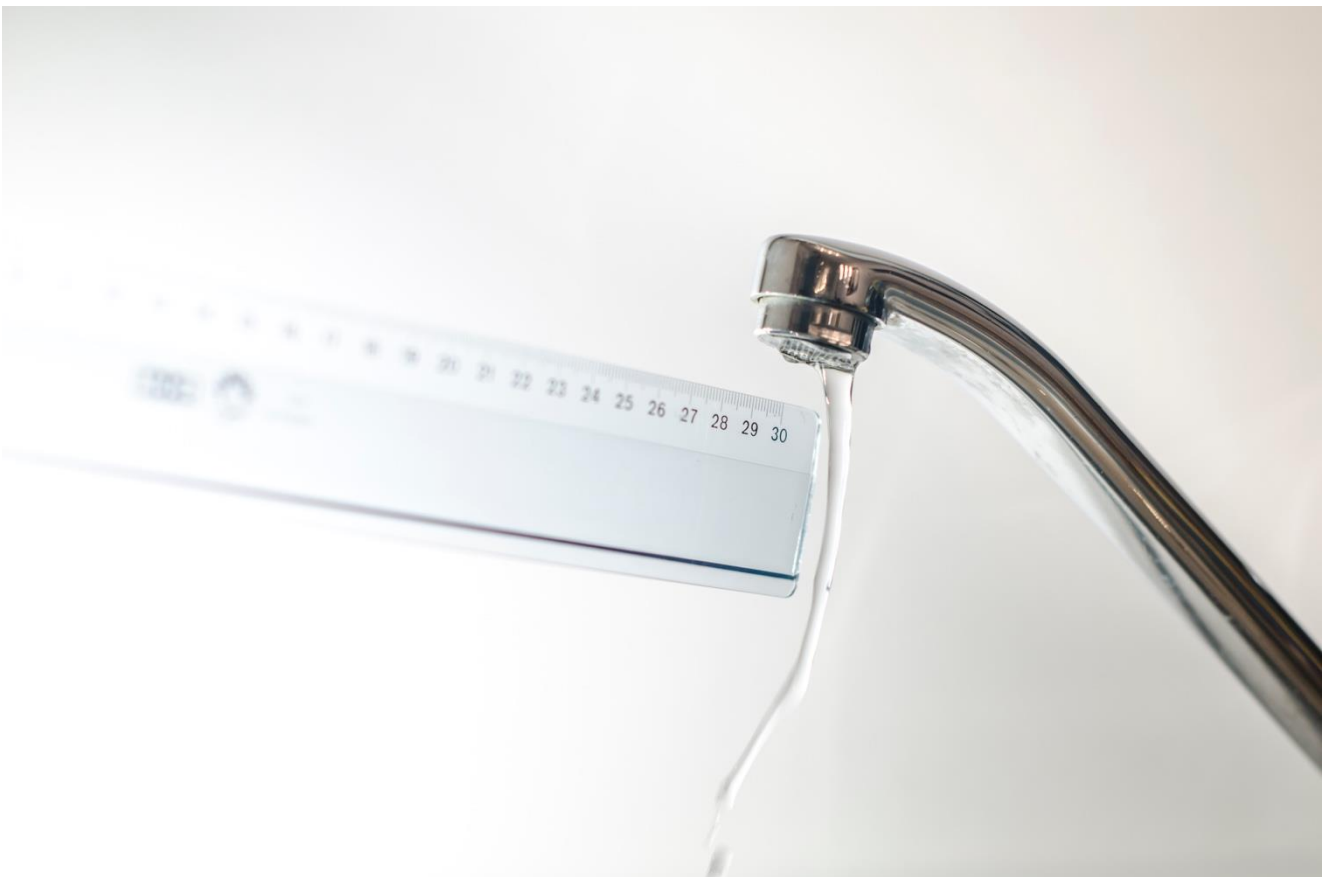


Abbildung 306: Durch negativ geladenes Lineal und positiv geladener Mikrofaserdecke entsteht ein elektrisches Feld – der Wasserstrahl wird abgelenkt

3.5.3 Elektrolyse

[93] ELEKTROLYSE EINER LÖSUNG AUS KOCHSALZ UND WASSER

Material

1 Flachbatterie 4,5 V

1 Stk. Karton

2 Büroklammern

2 leitende Drähte (isoliert)

2 Bleistifte

Spitzer

Wasser

Salz



Versuchsdurchführung und Beobachtung

Mit Hilfe von Büroklammern wird je ein Ende der beiden Kabel an je einem der beiden Kontakte der Flachbatterie fixiert. Das Trinkglas wird mit Wasser befüllt, welches im Anschluss mit ein wenig Salz vermengt wird. Anschließend wird das Glas mit einem Stück Karton, welches etwas größer als das Glas selbst ist, abgedeckt. Durch diesen Karton werden die zwei beidseitig gespitzten Bleistifte gesteckt, sodass je eines der beiden Enden in das Wasser ragt. Außerdem sollen sich die Bleistifte nicht berühren. Der genaue Aufbau ist in Abbildung 307 dargestellt. Das jeweils

andere Ende des Drahtes formt man nun so, dass es eine kleine Schlaufe bildet, welche man auf die Spitze des Bleistiftes hängen kann. Dabei ist darauf zu achten, dass das leitende Material des Drahtes einen Kontakt mit der Bleistiftmine bildet. Hat man je einen Draht mit je einer Bleistiftmine verbunden, so sieht man, wie sich Bläschen an den unter Wasser befindlichen Enden der Bleistifte bilden (Abbildung 308). Hebt man jetzt den Karton etwas an, so kann man einen Chlorgeruch wahrnehmen.

Physikalische Erklärung

Gibt man das Salz, bei welchem es sich um Natriumchlorid $NaCl$ handelt, in das Wasser, so löst es sich auf. Dabei wird das positiv geladene Natrium Na^+ vom negativ geladenen Chlor Cl^- getrennt. Durch das Anschließen der Batterie an die Bleistifte, welche die Elektroden darstellen, wird eine Gleichspannung angelegt. Dabei wird im Folgenden die elektrische Energie in chemische umgewandelt, indem eine Redoxreaktion stattfindet. Bei einer Redoxreaktion oxidieren negativ geladene Ionen an der Anode, während positiv geladene Ionen an der Kathode reduziert werden. In diesem Experiment geben die Chlorionen ihr überschüssiges Elektron an der Anode ab, d. h. sie oxidieren und bilden mit einem zweiten Chloratom ein Chlormolekül Cl_2 . Dieses Chlormolekül steigt in Form eines Gases auf, welches man auch riecht. Währenddessen gelangen Elektronen an der Kathode in die Lösung, welche vom Wasser aufgenommen werden. Durch diesen Vorgang löst sich bei jedem Wassermolekül ein Wasserstoffatom H_+ , wodurch ein Hydroxidion OH^- übrigbleibt. Zwei Wasserstoffatome verbinden sich zu einem Wassermolekül und verflüchtigen sich ebenfalls gasförmig. Die Gase sind als Blasen an den Elektroden zu erkennen. Weiters verbinden sich die Hydroxidionen

OH^- mit den Natriumionen und bilden somit eine Natronlauge. Die Elektrolysenreaktion lautet (Kommer et al., 2015, S. 373; SymplyScience Stiftung, 2019):

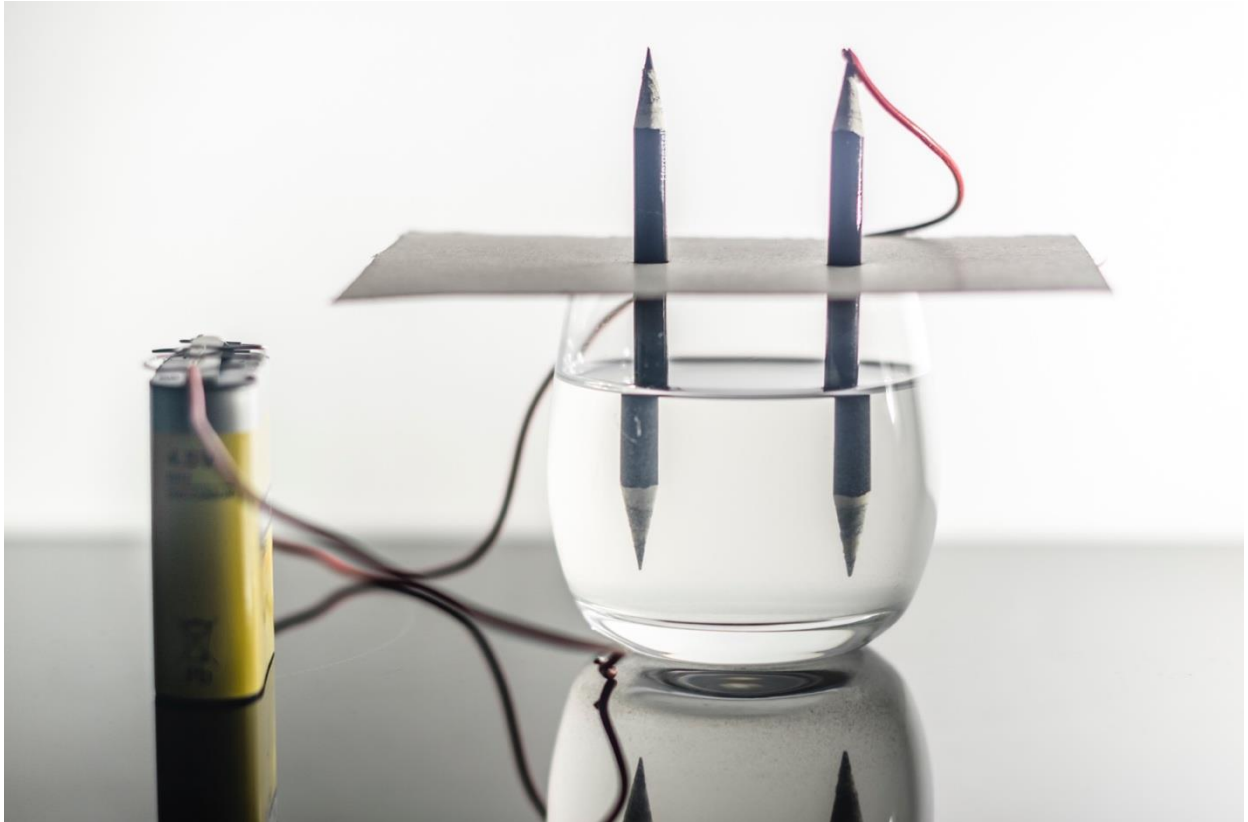
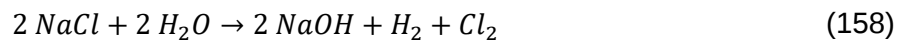


Abbildung 307: Zwei Bleistifte mit jeweils zwei spitzen Enden werden an eine Batterie angeschlossen und in Wasser getaucht

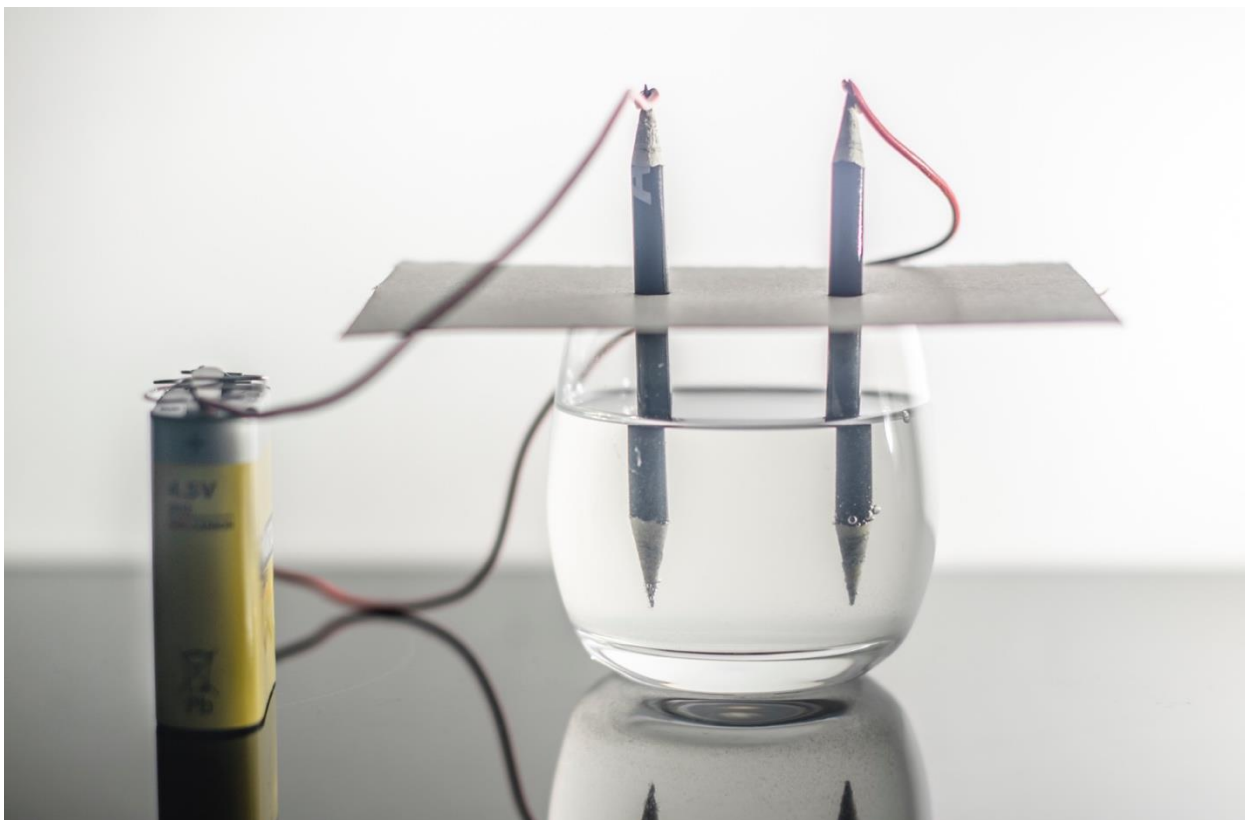


Abbildung 308: Durch den Stromfluss entsteht eine Redoxreaktion, bei welcher Chlor freigesetzt wird

4 LITERATURVERZEICHNIS

- Baehr, D., H., & Stehphan, K. (2013). Wärme- und Stoffübertragung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Berndt, H. (2009). ESD-Schutz – Normen, Konzepte und Messtechnik in der Praxis. Renningen: Expert Verlag.
- Brown, T., L., LeMay, E., H., & Bursten, E., H. (2006). Chemie: Studieren kompakt. München: Pearson Verlag.
- Clauser, C. (2018). Grundlagen der angewandten Geophysik – Seismik, Gravimetrie. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Czeslik, C., Seemann, H., & Winter, R. (2010). Basiswissen Physikalische Chemie. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Daily, D. J. (2013). *Fluid-Structure Interactions with Flexible and Rigid Bodies*. Dissertation. Brigham Young University.
- Demtröder, W. (2006). Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Diekmann, K. (2014). Naturwissenschaftliche Phänomene durch das Experimentieren im Sachunterricht begreifen. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Dobrinski, P., Krakau, G., & Vogel, A. (2006). Physik für Ingenieure. Wiesbaden: Teubner Verlag.
- Emminger, H. (2005). Physikum Exakt – Das gesamte Prüfungswissen für die 1. ÄP. Stuttgart: Thieme Verlag.
- Erb, R. & Schön, L. (1990). *Die Schusterkugel*. Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vortrag der GDCP-Tagung in Weingarten 1990. Kassel: Universität Gesamthochschule.
- Fleischmann, F. (2014). *Ein Beitrag zur Bestimmung der Rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugel-Messsystem*. Dissertation. Ruhr-Universität, Bochum.
- Frerichs, G., Arends, G., & Zörnig, H. (1927). Lycopodium. In: H. Hager, G. Arends, G. Frerichs, E. Rimbach, & H. Zörnig (Hrsg.), Hagers Handbuch der Pharmazeutischen Praxis (S. 102-104). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Förster, H. (2004). Chemische Exponate für Kinder in Science Centern. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Gerhard, C. (2016). Tutorium Optik – Ein verständlicher Überblick für Physiker, Ingenieure und Techniker. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

- Giancoli, D., C. (2006). Physik. München: Pearson Education.
- Giancoli, D. C. (2010). Physik – Lehr- und Übungsbuch. München: Pearson Studium.
- Goosse H., Barriat, P. Y., Lefebvre, W., Loutre, M. F. & Zunz, V. (2010). Introduction to climate dynamics and climate modeling. New York: Cambridge University Press.
- Gossing, R. (1997). Einführung in die Physik für Zahntechniker. München: Neuer Merkur Verlag.
- Grohamm, A., N., Jekel, M., Grohamm, A., Szewzyk, R., & Szewzyk, U. (2011). Wasser – Chemie, Mikrobiologie und nachhaltige Nutzung. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Hänsel, R., Keller, K., Rimpler, H., & Schneider, O. (Hrsg). Hagers Handbuch der Pharmazeutischen Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Harten, U. (2014). Physik – Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Hecht, E. (2016). Optik. Berlin: Walter de Gruyter.
- Hermans, J. (2014). Im Dunkeln hört man besser?: Alltag in 78 Fragen und Antworten. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Hilscher, H., Berthold, C., Christ, D., Braam, G., Haubrich, J., Herfert, M., Kraus, J. & Möller C. (2010). Physikalische Freihandexperimente. Scheidegg: Aulis Verlag.
- Hopmann, C., Michaeli, W., Greif, H., & Wolters, L. (2015). Technologie der Kunststoffe – Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung. München: Carl Hanser Verlag.
- Hopp, V. (2016). Wasser und Energie – Ihre zukünftigen Krisen? Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Hüttermann, A. (2011). Die Wasserstoffbrückenbindung – Eine Bindung fürs Leben. München: Oldenbourg Verlag.
- Jentsch, C. (1990). Angewandte Chemie für Ingenieure. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Jin, Z. & Bose, M. (2019). New clues to ancient water on Itokawa. *Science Advances*, 5(5).
- Johannesson, P. (1900). Physikalische Mechanik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kessel, K. (2012). Qualitatives und quantitatives Sekundärrohstoffpotential von Seltenen Erden in LCD-Fernsehern. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Kickelbick, G. (2008). Chemie für Ingenieure. München: Pearson Education.
- Kistner, A. (1919). Geschichte der Physik 1 – Die Physik bis Newton. Berlin und Leipzig: Vereinigung wissenschaftlicher Verleger – Walter de Gruyter & Co.

- Kloos, G. (2007). Entwurf und Auslegung optischer Reflektoren – Theorie und Anwendung. Renningen: Expert Verlag.
- Klose, B. (2008). Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Klose, B. (2016). Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kommer, C., Tugendhat, T., & Wahl, N. (2015). Tutorium Physik fürs Nebenfach – Übersetzt aus dem Unverständlichen. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kopitzki, K., & Herzog, P. (2004). Einführung in die Festkörperphysik. Wiesbaden: Teubner Verlag.
- Korthaase, S. (2013). Verblüffende Experimente - Naturwissenschaften. Donauwörth: Auer Verlag.
- Kraus, Lj., Koch, A., & Hoffstetter-Kuhn, S. (1996). Dünnschichtchromatographie. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Kuchling, H. (2011). Taschenbuch der Physik. München: Carl Hanser Verlag.
- Kuhnen, B., & Luck-Haller, E. (2016). Abenteuer Lernen: Silvester. Hamburg: AOL Verlag.
- Kulisch, W. (2015). Wiley-Schnellkurs Thermodynamik. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Kuphal, E. (2013). Den Mond neu entdecken – Spannende Fakten über Entstehung, Gestalt und Umlaufbahn unseres Erdtrabanten. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Louis, H., & Fischer, K. (1979). Allgemeine Geomorphologie. Berlin: Walter de Gruyter.
- Lück, G. (2016). Leichte Experimente für Kinder. Freiburg im Breisgau: Verlag Herder GmbH.
- Lüders, K., & von Oppen, G. (2012). Klassische Physik – Mechanik und Wärme. Berlin: Walter de Gruyter & Co.
- Lüders, K., & Pohl R. O. (Hrsg). (2017). Pohls Einführung in die Physik – Band 1: Mechanik, Akustik und Wärmelehre. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Martin, C., & de Vries, T. (2004). Chemie der Wunderkerze – ein Thema nicht nur in der Weihnachtszeit. In Chemkon: Forum für Unterricht und Didaktik (Vol. 11, No. 1, S. 13-20). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Malberg, H. (2007). Meteorologie und Klimatologie – Eine Einführung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Mattig, W. (1995). Die Sonne. München: C.H.Beck Verlag.
- Meschede, D. (2010). Gerthsen Physik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

- Meyer, A. (2007). *Physik für Ingenieure*. (Skript zur Vorlesung). Bochum: Ruhr-Universität, Institut für Materialphysik im Weltraum, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Köln.
- Müller, O. (2005). *Chemie einfach und verständlich*. Norderstedt: Books on Demand.
- Neumann, K. (2013). *NAWI ...so läuft's: Bewegung*. Hamburg: AOL-Verlag.
- Niedrig, H., & Sternberg, M. (2014). *Das Ingenieurwissen – Physik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Noller, C. R. (1960). *Lehrbuch der organischen Chemie*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Physikdepartement ETH Zürich (2019). *Parabolische Oberflächen von rotierenden Flüssigkeiten*. ETH Zürich.
- Plewinsky, B., Hennecke, M., & Oppermann, W. (2014). *Das Ingenieurwissen: Chemie*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Povh, B., & Soergel, E. (2014). *Anschauliche Physik für Naturwissenschaftler*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Pütz, R., & Serné, T. (2017). *Rennwagentechnik – Praxislehrgang Fahrdynamik*. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Rodewald, G. (2007). *Brandlehre*. Stuttgart: W. Kohlhammer Verlag
- Salmang, H., & Scholze, H. (2007). *Keramik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schatz, J., & Tammer, J. (Hrsg.). (2015). *Erste Hilfe – Chemie und Physik für Mediziner*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schlichting, H. (2006). *Oberflächliche Attraktionen – Naturphänomene, die sich der Minimierung der Oberfläche verdanken*. Münster: Wilhelms-Universität, Institut für Didaktik der Physik.
- Schlichting, H. & Ucke, C. (2011). Ein Hammer aus Wasser. *Phys. Unserer Zeit*, 42, S. 44-45.
- Schmidt, C., & Dietrich, L. (2014). *Chemie für Biologen – Von Studierenden für Studierende erklärt*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schneider, J., Kuntsche, J., Schula, S., Schneider, F., & Wörner, J. (2016). *Glasbau – Grundlagen – Berechnung – Konstruktion*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schulbiologiezentrum Hannover (2016). *Regenbogen-Werkstatt. Experimente mit „farbigen“ Wassertropfen*. Fachbereich Bibliothek und Schule. Landeshauptstadt Hannover.
- Struve, O., Lynds, B. T., & Pillans H. (1967). *Astronomie – Einführung in ihre Grundlagen*. Berlin: Walter de Gruyter & Co.
- Stuart, A., & Klages G. (2006). *Kurzes Lehrbuch der Physik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

- Stuart, A., & Klages G. (2010). Kurzes Lehrbuch der Physik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Synwoldt, C. (2016). Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien – Technik, Märkte, kommunale Perspektiven. Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag.
- Tipler, P., & Mosca, G. (2008). Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Volkmer, M. & Willer, J. (Hrsg.), (2004). Sicherheit. *Unterricht Physik*. 80/81 (14).
- Wagner, G. (2010). Waschmittel – Chemie, Umwelt, Nachhaltigkeit. Weinheim: Wiley-VCH Verlag
- Welsch, N., Schwab, J. & Liebmann, C. C. (2013). Materie – Erde, Wasser, Luft und Feuer. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Westphal, W. C. (1938). Physikalisches Praktikum – Eine Sammlung von Übungsaufgaben für die physikalischen Übungen an Universitäten und Hochschulen aller Gattungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Westphal, W., & Westphal W. (1970). Physik – Ein Lehrbuch. Berlin: Springer Verlag.
- Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2017). Physikdidaktik kompakt. Seelze: Aulis Verlag.
- Zobl, S. (2017). Strukturfarben im Brennpunkt der Bionik – Zwischen Kunst und Naturwissenschaften. Wiesbaden: Springer Spektrum.

INTERNETQUELLEN:

- 3B Scientific GmbH (2019). Dichteparadoxon, Satz. https://www.3bscientific.de/dichteparadoxon-satz-1003498-u45056,p_583_1911.html. Zugriff 21.04.2019.
- ChemoLine GmbH (2019). Pythagoras-Becher aus Glas. https://www.chemoline.de/lehrmittel-fuer-naturwissenschaften/pythagoras-becher_aus_glas.html. Zugriff 21.03.2019.
- Cool Science (2019). Ping Pong Ball Blast-off. <http://old.coolscience.org/CoolScience/Teachers/Activities/PPBBlast.htm>. Zugriff 26.03.2019.
- Futurezone (2019). Forscher finden erstmals Wasser in Partikeln eines Asteroiden. <https://futurezone.at/science/forscher-finden-erstmals-wasser-in-partikeln-eines-asteroiden/-400483159>. Zugriff 22.04.2019.
- Greenpeace (2019). Welche Treibhausgase verursachen den Klimawandel? <https://www.greenpeace.de/themen/klimawandel/welche-treibhausgase-verursachen-die-erderw%C3%A4rmung>. Zugriff 22.04.2019.
- Leifi Physik (2019). Innere Energie – Wärmekapazität. Trinkende Ente. <https://www.leifi-physik.de/waermelehre/innere-energie-waermekapazitaet/ausblick/trinkende-ente>. Zugriff 20.04.2019.
- RESET (2018). Mangelware Wasser. <https://reset.org/knowledge/mangelware-wasser>. Zugriff 19.04.2019.
- SimplyScience Stiftung (2019). Die Kochsalz-Elektrolyse: Salz + Wasser + Strom ergibt...? <https://www.simplyscience.ch/teens-liesnach-archiv/articles/die-kochsalz-elektrolyse-salz-wasser-strom-ergibt.html>. Zugriff 20.04.2019.
- Standard (2019). Itokawa erweist sich als überraschend feuchter Asteroid. <https://derstandard.at/2000102401142/ItokawaUeberraschend-feuchter-Asteroid-Quelle-des-irdischen-Wasser>. Zugriff 05.05.2019.
- United Nations (2019). The human right to water and sanitation. https://www.un.org/water-forlifedecade/human_right_to_water.shtml. Zugriff 18.04.2019.

5 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Wasservorkommen auf der Erde.....	3
Abbildung 2:	Anteil der Bevölkerung mit und ohne Zugang zu sauberem Wasser	4
Abbildung 3:	Schalenmodell eines Atoms mit Aufteilung der Elektronen.....	6
Abbildung 4:	Polarisierung des Wassermoleküls	8
Abbildung 5:	Eindimensionale Schicht von Wassermolekülen, welche über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind.	9
Abbildung 6:	Die Phasenübergänge und deren Bezeichnungen	11
Abbildung 7:	Beim Schmelzen bzw. Erstarren sowie beim Verdampfen bzw. Kondensieren ändert sich die Temperatur eines Stoffes (hier bei Wasser) nicht.	12
Abbildung 8:	Das Phasendiagramm von Wasser. Der Tripelpunkt liegt bei einer Temperatur von $T = 0,01^{\circ}\text{C}$ und einem Druck von $6,11 \text{ mbar}$	13
Abbildung 9:	Tripelpunkt Wasserzelle. Zu erkennen sind die drei Phasen Wasser, Eis und Dampf	13
Abbildung 10:	Übersicht der behandelten Themenbereiche sowie der dazugehörigen Unterkapitel.....	14
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Kräfte in einer Flüssigkeit.....	16
Abbildung 12:	Tropfenbildung durch Oberflächenspannung	16
Abbildung 13:	Konkaver Meniskus in einem Glaskeil. Mit Wasser vermengtes Phenol ist benetzend	17
Abbildung 14:	Konvexer Meniskus in einem Glaskeil. Quecksilber ist nicht benetzend.....	17
Abbildung 15:	Steighöhe einer benetzenden Flüssigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers.....	17
Abbildung 16:	Kein Wasser unter der Glasplatte	19
Abbildung 17:	Wasser unter der Glasplatte wirkt „klebend“.....	19
Abbildung 18:	Anordnung von Tensiden an der Wasseroberfläche.....	20
Abbildung 19:	Kräfteverteilung ohne Tensid (A). Kräfteverteilung mit Tensid (B)	20
Abbildung 20:	10 Groschen schwimmen aufgrund der Oberflächenspannung am Wasser	21
Abbildung 21:	Oberflächenspannung wird durch Spülmittel herabgesetzt.....	21
Abbildung 22:	Die Wasserstrahlen treten separat aus	23
Abbildung 23:	Aufgrund der Oberflächenspannung verknoten sich die Wasserstrahlen miteinander	23
Abbildung 24:	Trockene Hand im Wasser durch Bärlappsporen	25
Abbildung 25:	Trockene Hand im Wasser durch Zimt	25

Abbildung 26:	Tischtennisball bewegt sich bei halbvollem Inhalt von der Mitte zum Gefäßrand und nimmt Ruheposition ein.....	27
Abbildung 27:	Tischtennisball bewegt sich bei vollgefülltem Gefäß vom Rand hin zur Mitte und verbleibt dort	27
Abbildung 28:	Farbe steigt an der weißen Kreide empor	29
Abbildung 29:	Völlig eingefärbte Kreide aufgrund Kapillarwirkung	29
Abbildung 30:	Filzstift-Strich auf Kreide	29
Abbildung 31:	Einzelne Farbbestandteile der jeweiligen Filzstifte	29
Abbildung 32:	Minimalfläche bei einem Drahtwürfel – Variante 1	31
Abbildung 33:	Minimalfläche bei einem Drahtwürfel – Variante 2	31
Abbildung 34:	Minimalfläche bei einem drei-seitigem Würfel	31
Abbildung 35:	Minimalfläche bei einem Tetraeder	31
Abbildung 36:	Minimalfläche bei einer Bogenform	31
Abbildung 37:	Minimalfläche durch einen Metallring	31
Abbildung 38:	Lenardscher Bügel ausgezogen.....	31
Abbildung 39:	Lenardscher Bügel zusammengezogen.....	31
Abbildung 40:	Variation des Lenardschen Bügels - Schnur zusammengezogen.....	31
Abbildung 41:	Variation des Lenardschen Bügels - Schnur ausgezogen	31
Abbildung 42:	Tetraeder in Würfel eingeschrieben	33
Abbildung 43:	Lenardscher Bügel.....	33
Abbildung 44:	Zwei Seifenblasen bilden ein verbundenes System	35
Abbildung 45:	Aufblasen der großen Seifenblase auf Kosten der kleineren.....	35
Abbildung 46:	Kommunizierende Röhren	36
Abbildung 47:	Rechteckiges Volumenelement der Luft.....	39
Abbildung 48:	Exponentieller Druckverlauf von Luft mit steigender Höhe	39
Abbildung 49:	Linearer Druckverlauf von Wasser mit steigender Höhe. Der Druck beginnt bei ca. 2 bar da zum Wasserdruck noch 1 bar Luftdruck hinzukommt	39
Abbildung 50:	Pascal'sches Prinzip mit Hilfe eines Druckausbreitungsgeräts.....	41
Abbildung 51:	Wasser wird durch Drücken der großen Spritze mit hohem Kraftaufwand in die kleinere befördert	43
Abbildung 52:	Wasser wird durch Drücken der kleinen Spritze mit geringem Kraftaufwand in die größere befördert.....	43
Abbildung 53:	Taucherglocke	44
Abbildung 54:	Tauchende Kerze	45
Abbildung 55:	Scheinbar verstopfter Trichter – kein Wasserfluss	47
Abbildung 56:	Luftaustausch durch Strohhalm wieder gegeben – Wasserfluss aufrecht....	47
Abbildung 57:	Durch Verbindungsstück verbundene Flaschen – kein Wasser fließt	49

Abbildung 58:	Durch Drehbewegung entsteht ein Tornado – Wasser fließt nach unten.....	49
Abbildung 59:	Durch Kippen der Flasche erhält der Tornado einen Knick	49
Abbildung 60:	Beinahe vollständig durch Rotation entleerte Flasche.....	49
Abbildung 61:	Bodendruck in einem Zylinderrohr	51
Abbildung 62:	Bodendruck in einem Winkelrohr	51
Abbildung 63:	Bodendruck in einem Trichterrohr	51
Abbildung 64:	Bodendruck in einem Abgesetzten Rohr	51
Abbildung 65:	Druckunterschiede in einer Flasche	53
Abbildung 66:	Gleich hoher Flüssigkeitspegel in beiden Schenkeln des U-Rohr- Manometers.....	55
Abbildung 67:	Höhendifferenz im U-Rohr-Manometer aufgrund von Druckunterschied	55
Abbildung 68:	Druckdose mit U-Rohr Manometer über dem Wasser.....	57
Abbildung 69:	Druckdose mit U-Rohr Manometer bei steigendem Druck im Wasser.....	57
Abbildung 70:	Wasser fließt aus Loch in offener Flasche	59
Abbildung 71:	Durch Verschließen der Flasche fließt kein Wasser aus dem Loch.....	59
Abbildung 72:	Laminiertes Papier bleibt an umgedrehtem Glas haften.....	61
Abbildung 73:	Blatt Papier bleibt an umgedrehtem Messzylinder haften.....	61
Abbildung 74:	Umgedrehte Wasserflasche in einem Glas gefüllt mit Wasser – Wasserstand bleibt unverändert.....	63
Abbildung 75:	Durch Nadelstich in Flaschenboden fließt Wasser aus und bringt das Glas zum Überlaufen	63
Abbildung 76:	Pythagoreischer Trinkbecher – Wasser bleibt im Glas	65
Abbildung 77:	Pythagoreischer Trinkbecher – Wasserpegel übersteigt Glasröhrchen in Mitte und fließt aus.....	65
Abbildung 78:	Fließende Fontäne im Heronsbrunnen.....	67
Abbildung 79:	Skizze für die Herleitung des Archimedischen Prinzips.....	69
Abbildung 80:	Mohrsche Waage.....	71
Abbildung 81:	Dichtebestimmung mit Hilfe der Mohrschen Waage.....	71
Abbildung 82:	Wasserpegel bei mit Münzen gefüllter Kapsel.....	73
Abbildung 83:	Niedrigerer Wasserpegel bei leerer Kapsel und Münzen im Wasser.....	73
Abbildung 84:	Wasserstand mit Eiswürfel im Wasser	75
Abbildung 85:	Wasserstand bei geschmolzenem Eiswürfel	75
Abbildung 86:	Offene Trichtertülle – Tischtennisball bleibt haften.....	77
Abbildung 87:	Abgedichtete Trichtertülle – Tischtennisball bewegt sich nach oben	77
Abbildung 88:	Sonnenblumenöl in Wasser	79
Abbildung 89:	Kürbiskernöl in Wasser	79
Abbildung 90:	Kugelförmige Tinte im Öl.....	79
Abbildung 91:	Die schwere Tinte	79

Abbildung 92:	Lavalampe aus Öl und Salz	79
Abbildung 93:	Heterogene Schichten	79
Abbildung 94:	Kartesischer Taucher schwimmt	81
Abbildung 95:	Kartesischer Taucher sinkt durch Außendruck.....	81
Abbildung 96:	Limette als Kartesischer Taucher schwimmt	81
Abbildung 97:	Limette als Kartesischer Taucher sinkt.....	81
Abbildung 98:	Schwerebeschleunigung in Abhängigkeit von r	83
Abbildung 99:	Gravitationskarte der Erde. Darstellung als Geoid.....	83
Abbildung 100:	Zwei idente PET-Flaschen; eine halb, die andere vollständig gefüllt mit Wasser	85
Abbildung 101:	Freier Fall beider Flaschen ist ident	85
Abbildung 102:	Wasser tritt aus dem Loch aus.....	87
Abbildung 103:	Im freien Fall tritt kein Wasser aus Loch aus.....	87
Abbildung 104:	Sprunghöhe ohne Becher	89
Abbildung 105:	Sprunghöhe mit Becher	89
Abbildung 106:	Fluidfluss durch eine Rohrverengung. Dabei ist die Masse $m = \rho \cdot V$	90
Abbildung 107:	Infinitesimale Fluidmenge, welche sich auf einen Bereich mit geringem Druck zubewegt	91
Abbildung 108:	Dynamische Viskosität.....	92
Abbildung 109:	Laminare Strömung in einem Rohr	93
Abbildung 110:	Aufbau Strömungsapparat	95
Abbildung 111:	Laminare Strömung	95
Abbildung 112:	Turbulente Strömung	95
Abbildung 113:	Störung einer Strömung	95
Abbildung 114:	Linearer Druckabfall aufgrund von Strömungsreibung	97
Abbildung 115:	Zusätzlicher Druckabfall aufgrund höherer Strömungsgeschwindigkeit.....	97
Abbildung 116:	Funktionsweise Wasserstrahlpumpe.....	98
Abbildung 117:	Bei abgedrehtem Wasserhahn wird kein Wasser aus dem Behälter gesaugt.....	99
Abbildung 118:	Bei aufgedrehtem Wasserhahn wird aufgrund von Bernoulli Wasser aus dem Behälter gesaugt.....	99
Abbildung 119:	Wasserstrahlpumpe	99
Abbildung 120:	Schwebender Tischtennisball auf Wasserstrahl	101
Abbildung 121:	Wasserstrahl wirkt horizontalen Kräften entgegen	101
Abbildung 122:	Magnus-Effekt.....	102
Abbildung 123:	Eintauchen des Zylinders in Wasser	103
Abbildung 124:	Zylinder legt gekrümmten Weg im Wasser zurück	103
Abbildung 125:	Aufgelöstes Aluminiumpulver in Wasser	105

Abbildung 126: Strömungslinien eines Zylinders	105
Abbildung 127: Strömungslinien eines Quaders	105
Abbildung 128: Strömungslinien einer Stromlinienform – breite Seite nach vorne gerichtet.....	105
Abbildung 129: Strömungslinien einer Stromlinienform – schmale Seite nach vorne gerichtet.....	105
Abbildung 130: Vergleich der Wirbelbildung bei kugelförmigem zu stromlinienförmigem Körper	105
Abbildung 131: Schlag auf leere Glasflasche – nichts passiert	107
Abbildung 132: Schlag auf mit Wasser gefüllte Glasflasche – der Boden der Flasche wird abgeschlagen	107
Abbildung 133: Zerbrochene Flasche aufgrund von hohem Druck – es kommt zur Kavitation	107
Abbildung 134: Kräfte bei einer Drehbewegung.....	108
Abbildung 135: Wassereimer am Höchststand der Drehbewegung – kein Wasser tritt aus.....	111
Abbildung 136: Wasserglas auf Zentrifugalschaukel – kein Wasser tritt aus.....	111
Abbildung 137: Resultierende Kraft auf ein Flüssigkeitselement.....	112
Abbildung 138: Glasgefäß mit Achse auf Zentrifugalapparat – es kommt zur Parabelbildung.....	113
Abbildung 139: Kräfteverteilung beim Segnerschen Wasserrad	115
Abbildung 140: Segnersches Wasserrad – Selbstbau	115
Abbildung 141: Segnersches Wasserrad.....	115
Abbildung 142: Die Anomalie des Wassers. Wasser hat bei Normaldruck die größte Dichte bei 3,983°C (kleines Diagramm). Die Dichte nimmt beim Übergang von flüssig zu fest sprunghaft ab (großes Diagramm)	116
Abbildung 143: Das Sauerstoffatom ist von vier Wasserstoffatomen umgeben. Bei den durchgängig gezeichneten Bindungen handelt es sich um kovalente Bindung. Die strichliert eingezeichneten Bindungen sind die Wasserstoffbrückenbindungen.....	117
Abbildung 144: Hexagonale Anordnung der Wassermoleküle im festen Zustand. Dadurch entstehen Hohlräume, die beim Schmelzen befüllt werden können	117
Abbildung 145: Festes Wachs sinkt in flüssigem Wachs während Eiswürfel im Wasserglas schwimmen	119
Abbildung 146: Temperaturschichten von Wasser, bei welchen sich das 4°C kalte Wasser stets an der tiefsten Stelle befindet	120
Abbildung 147: Bei einer Wassertemperatur von 15°C sinkt der Kaltwasserschwimmer nach unten.....	121

Abbildung 148: Sinkt die Temperatur weiter, so steigt der Kaltwasserschwimmer wieder nach oben.....	121
Abbildung 149: Wasserstand bei einer Wassertemperatur von 2°C.....	123
Abbildung 150: Wasserstand sinkt durch Erwärmen des Wassers – geringere Dichte.....	123
Abbildung 151: Wasserstand steigt im warmen Wasser nach einiger Zeit wieder an – größere Dichte	123
Abbildung 152: Gusseisenhohlkugel – Zerbrochene Kugel durch Kältemischung.....	125
Abbildung 153: Durch gefrorenes Wasser geplatzte Wasserleitung.....	125
Abbildung 154: Zersprungene Flasche durch Einfrieren von Wasser im Tiefkühlschrank ..	125
Abbildung 155: Fläche unterhalb der Kurve entspricht der Strahlungsleistung, welche mit steigender Temperatur zunimmt. Dabei verschiebt sich das Maximum zu den kürzeren Wellenlängen (strichliert eingezeichnet, nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz)	129
Abbildung 156: Der Farbvulkan – Ausdehnung von warmem Wasser in umliegendes, kälteres	131
Abbildung 157: Oranges, warmes Wasser oben; kaltes, blaues Wasser unten – es findet keine Vermischung der Flüssigkeiten statt	133
Abbildung 158: Oranges, warmes Wasser unten; kaltes, blaues Wasser oben – es kommt zur Vermischung der beiden Flüssigkeiten.....	133
Abbildung 159: Aufgrund der höheren Dichte von kaltem Wasser, fließt dieses nach unten während das warme nach oben steigt.....	133
Abbildung 160: Vermischung der beiden Flüssigkeiten nach einiger Zeit.....	133
Abbildung 161: Konvektionsrohr über Teelicht – erhitztes Wasser steigt nach oben und eine Konvektionsströmung entsteht	135
Abbildung 162: Im oberen Bereich kühlt Wasser erneut ab und sinkt wieder nach unten hin ab.....	135
Abbildung 163: Turbulente Strömung an Abrundung des Konvektionsrohres	135
Abbildung 164: Eis, flüssiges und kochendes Wasser in einem Reagenzglas – geringe Wärmeleitfähigkeit von Wasser	137
Abbildung 165: Luftballon zerplatzt über Kerzenflamme	139
Abbildung 166: Mit Wasser gefüllter Luftballon zerplatzt nicht über Kerzenflamme	139
Abbildung 167: Plastikbecher fängt über Kerzenflamme an zu brennen	139
Abbildung 168: Mit Wasser gefüllter Plastikbecher brennt nicht über Kerzenflamme	139
Abbildung 169: Ausgangssituation – drei Gläser in unterschiedlicher Farbe gefüllt mit Wasser gleicher Temperatur.....	141
Abbildung 170: Im Sonnenlicht werden die drei Gläser mit geschlossenem Deckel für einige Zeit stehen gelassen	141

Abbildung 171: Nach einer Stunde beträgt die Temperatur 10,5°C im weißen, 12,5°C im grauen sowie 23°C im schwarzen Glas.....	141
Abbildung 172: Beide schwimmende Körper befinden sich zu Beginn am Boden des Becherglases.....	143
Abbildung 173: Der Körper im heißen Wasser schwimmt an die Oberfläche, während der Körper im kalten Wasser am Boden bleibt	143
Abbildung 174: Schwimmkörper werden in das jeweils andere Becherglas gegeben, wobei der Körper im heißen Wasser am Boden verweilt, während der Körper im kalten Wasser schwimmt	143
Abbildung 175: Nach einiger Zeit tauschen die beiden Schwimmkörper ihre Position	143
Abbildung 176: Brown'sche Bewegung eines "schwereren" Teilchens. Die einzelnen Punkte wurden in gewissen Zeitabständen aufgetragen. Die Geraden dazwischen sind willkürlich eingezeichnet.....	144
Abbildung 177: Funktionsweise der Osmose und Entstehung des osmotischen Drucks....	145
Abbildung 178: Osmose am Beispiel von Radieschen mit Salz links, rechts keine Osmose	145
Abbildung 179: Diffusion von Tee – links bei kaltem, rechts bei warmem Wasser	147
Abbildung 180: Diffusion von Tinte – links bei kaltem, rechts bei warmem Wasser	147
Abbildung 181: Ausgeglichener Druck ohne Helium	149
Abbildung 182: Druckanstieg aufgrund von diffundierendem Helium	149
Abbildung 183: Das Gesetz von Boyle-Mariotte. Die Zustandsänderung ist isotherm.....	150
Abbildung 184: Das erste Gesetz von Gay-Lussac. Die Zustandsänderung ist isobar	151
Abbildung 185: Das zweite Gesetz von Gay-Lussac. Die Zustandsänderung ist isochor. Dabei sind p_1 , V_1 die Anfangszustandsgrößen und p_2 , V_2 die Endzustandsgrößen des Gases	151
Abbildung 186: Entstehung des Gasdruckes auf der Seitenfläche A	153
Abbildung 187: Glas über brennender Kerze – Münze liegt im Wasser	155
Abbildung 188: Wasseranstieg aufgrund von Unterdruck – die Münze wird „trockengelegt“	155
Abbildung 189: Erhitzen der Dose über einer Kerzenflamme.....	157
Abbildung 190: Durch das Eintauchen der Dosenöffnung in kaltes Wasser implodiert diese aufgrund des Druckunterschieds	157
Abbildung 191: Der Luftballon wird über eine leere Glasflasche gestülpt.....	159
Abbildung 192: Im warmen Wasser dehnt sich der Luftballon aufgrund von einem Druckunterschied aus	159
Abbildung 193: Im kalten Wasser wird der Luftballon aufgrund von einem Druckunterschied in das Flascheninnere gezogen	159
Abbildung 194: Die Siedetemperatur von Wasser in Abhängigkeit zum Luftdruck	160

Abbildung 195: Durch das Übergießen mit kaltem Wasser, fängt das Innere aufgrund des Unterdrucks erneut an zu kochen	163
Abbildung 196: Der Rundkolben wird mit kochendem Wasser befüllt	163
Abbildung 197: Wasser kocht fängt bei Zimmertemperatur in der Spritze aufgrund von verringertem Luftdruck an zu kochen	165
Abbildung 198: Kryophor mit flüssigem Wasser oben und unten	167
Abbildung 199: Wasser gefriert im oberen Teil des Kryophors ohne direkten Kontakt zu kaltem Flüssigstickstoff	167
Abbildung 200: Bestandteile eines Hypsometers	169
Abbildung 201: Hypsometer zur Höhenbestimmung	169
Abbildung 202: Beginn des Flüssigkeits- sowie Dampfaustausches	171
Abbildung 203: Fortgeschrittener Austausch – das Gewicht der Ente verlagert sich nach hinten	171
Abbildung 204: Durch ständige Verlagerung des Schwerpunktes, beginnt die Ente zu wippen	171
Abbildung 205: Schnee in einem Glasgefäß – Die Temperatur liegt in etwa bei 0°C	173
Abbildung 206: Durch Hinzufügen von Salz kühlt sich das Gemisch auf -17°C ab	173
Abbildung 207: Leidenfrosteffekt in einer erhitzten Pfanne	174
Abbildung 208: Leidenfrosteffekt – es bildet sich eine Wasserdampfschicht um die Stahlkugel	175
Abbildung 209: Mpemba-Effekt mit kochendem Wasser und besonders niedrigen Außentemperaturen	177
Abbildung 210: Gefrierender Wasserdampf mit nach oben hin entstehenden gefrorenen Wassertropfen	177
Abbildung 211: Wasser wird über die Siedetemperatur hinaus erhitzt und es kommt zum Siedeverzug	179
Abbildung 212: Durch Zuführen eines Fremdkörpers entstehen Siedekeime, welche zum Verdampfen der Flüssigkeit führen	179
Abbildung 213: Unterkühltes Wasser im flüssigen Zustand	181
Abbildung 214: Eindeutige Eis- und Kristallbildung aufgrund beträchtlicher Unterkühlung	181
Abbildung 215: Erkennbare Kristallstruktur im unterkühlten, gefrorenen Wasser	181
Abbildung 216: Eiskwürfel vor dem Übergießen mit unterkühltem Wasser	182
Abbildung 217: Durch das Übergießen des Eiskwürfels mit unterkühltem Wasser bildet sich Eis	182
Abbildung 218: Ein Eiskwürfel wird in unterkühltes Wasser gegeben	183
Abbildung 219: Durch das Einwerfen bilden sich Kristallisationskeime und Eiskristalle entstehen	183
Abbildung 220: Eiskristalle bilden sich an den Eiskwürfeln	183

Abbildung 221: Gefrorene Seifenblase auf Glasplatte mit sich ausbreitendem Muster einer Eisblume	185
Abbildung 222: Gefrorene Seifenblase auf Schnee mit sich ausbreitendem Muster einer Eisblume	185
Abbildung 223: Gefrorene Seifenblase auf Glasplatte mit sechseckigem Eiskristallmuster	185
Abbildung 224: Entzündeter Sternspritzer	187
Abbildung 225: Entzündeter Sternspritzer wird in ein Wasserglas gehalten und erlischt sofort.....	187
Abbildung 226: Fünf entzündete Sternspritzer, welche unter Wasser weiterbrennen.....	187
Abbildung 227: Wasserstoff entzündet sich an der Oberfläche des Wasserglases	187
Abbildung 228: Schaum bestehend aus Wasser, Spülmittel und Butan	189
Abbildung 229: Entzündeter Butan-Schaum	189
Abbildung 230: Sichtbares Licht im Wellenbereich von 380 nm bis 780 nm.....	190
Abbildung 231: Prinzip von Huygens-Fresnel	191
Abbildung 232: Brechung einer Wellenfront an der Grenzfläche zweier Medien	191
Abbildung 233: Reflexion an einer rauen Oberfläche.....	192
Abbildung 234: Reflexion Und Brechung am Übergang von Luft zu Wasser.....	192
Abbildung 235: Brechung des Laserstrahls an der Wasseroberfläche sowie am Boden des Gefäßes	195
Abbildung 236: Durch eine Sprühflasche wird zusätzlich der Teil des Lichtes sichtbar gemacht, welcher aus der Wasseroberfläche austritt	195
Abbildung 237: Zweifach-gebrochener Strahl parallel zum einfallenden Strahl.....	195
Abbildung 238: Wasser-Zucker-Gemisch befindet sich im unteren Teil des Gefäßes, reines Wasser im oberen Teil	197
Abbildung 239: Lichtstrahl des Laserpointers wird an der Grenzfläche nach unten gebogen; gerader, schwacher Lichtstrahl von der Wand reflektiert	197
Abbildung 240: Entstehung eines virtuellen Bildes	198
Abbildung 241: Brennende Kerze in einem leeren Glas.....	199
Abbildung 242: Scheinbar brennende Kerze unter Wasser	199
Abbildung 243: Versuchsaufbau zur Entstehung eines virtuellen Bildes	199
Abbildung 244: Gebrochener Löffel im Wasserglas	201
Abbildung 245: Stärker gebrochener Löffel im Ölglas	201
Abbildung 246: Mit Wasser befülltes Reagenzglas im Wasserglas ohne spiegelnden Effekt	201
Abbildung 247: Mit Öl befülltes Reagenzglas verschwindet scheinbar im Ölglas	201
Abbildung 248: Die unter Wasser gehaltene Oberfläche des Eis wirkt durch Rußbeschichtung spiegelnd.....	203
Abbildung 249: Lichtleitung mit Hilfe eines Wasserstrahls	205

Abbildung 250: Totalreflexion im Reagenzglas	205
Abbildung 251: Erkennbare Totalreflexion im Wasserstrahl.....	205
Abbildung 252: Totalreflexion am Übergang von Wasser zu Luft. Ist der Winkel kleiner als 48,75° so kann der Lichtstrahl (1) austreten. Ist er größer so kommt es zur Totalreflexion (3)	206
Abbildung 253: Wasser als Lichtleiter mit indirekter Beleuchtung	207
Abbildung 254: Rotes Licht wird in Fluorescein nicht absorbiert	209
Abbildung 255: Grünes Licht wird in Fluorescein absorbiert	209
Abbildung 256: Blaues Licht wird in Fluorescein absorbiert. Angeregte Atome emittieren grünes Licht	209
Abbildung 257: Entstehung der Dispersion nach dem Huygens'schen Prinzip.....	210
Abbildung 258: Farbdreieck des CIE-Systems	211
Abbildung 259: Komplementärfarben der subtraktiven Farbmischung	211
Abbildung 260: Dispersion von weißem Licht	212
Abbildung 261: Aufspaltung des Lichts mit Hilfe eines Spiegels und Wasser	213
Abbildung 262: Lichtspektrum einer LED-Taschenlampe	213
Abbildung 263: Additive Farbmischung mit grünem und rotem Licht – gelbliches Licht entsteht.....	215
Abbildung 264: Additive Farbmischung mit blauem und rotem Licht – Licht im Magenta- Ton entsteht.....	215
Abbildung 265: Additive Farbmischung mit blauem und grünem Licht – Licht im Cyan-Ton entsteht.....	215
Abbildung 266: Additive Farbmischung mit rotem und grünem Licht – weißes Licht entsteht.....	215
Abbildung 267: Wassertropfen auf Farbdisplay – erkennbare Subpixel in den Farben Rot, Grün und Blau.....	215
Abbildung 268: Grün und Cyan ergibt Grün.....	217
Abbildung 269: Magenta und Cyan ergibt Violett bis Blau	217
Abbildung 270: Gelb und Magenta ergibt Orange bis Rot.....	217
Abbildung 271: Grün, Blau und Rot ergeben Schwarz.....	217
Abbildung 272: Nicht maßstabsgetreue Darstellung einer Mondfinsternis. Der Mond befindet sich in dieser Abbildung im Kernschatten	219
Abbildung 273: Simulation der Farben des Himmels bei Tag.....	221
Abbildung 274: Simulation der Farben des Himmels bei Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergang	221
Abbildung 275: Mondfinsternis am 27. Juli 2018.....	223
Abbildung 276: Modell einer Mondfinsternis	223
Abbildung 277: Konvex- und Konkavlinse.....	224

Abbildung 278: Bildkonstruktion am Beispiel einer Sammellinse	225
Abbildung 279: Strahlengang durch ein leeres dickwandiges Glas	226
Abbildung 280: Strahlengang eines Gegenstands, welcher sich in größerer Entfernung befindet, als der doppelten Brennweite	226
Abbildung 281: Leeres Weinglas wirkt wie eine Konkavlinse	227
Abbildung 282: Mit Wasser befülltes Trinkglas wirkt wie eine Sammellinse	227
Abbildung 283: Kerzenlicht betrachtet durch eine Schusterkugel	229
Abbildung 284: Kissenförmige Verzeichnung beim Wasser. Tonnenförmige Verzeichnung in der Luftblase (rechts oben, blau umrandet)	229
Abbildung 285: Entstehung Katakaustik	231
Abbildung 286: Entstehung Diakaustik	231
Abbildung 287: Entstehung einer Katakaustik sowie Diakaustik mit Hilfe eines Wasserglases	231
Abbildung 288: Konstruktive Interferenz zweier Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge. Gangunterschied $\delta = 0$	232
Abbildung 289: Destruktive Interferenz zweier Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge. Gangunterschied $\delta = \lambda/2$	232
Abbildung 290: Strahlengang von Licht an einer dünnen Schicht. Quelle: (Kommer et al., 2015, S. 532)	233
Abbildung 291: Konstruktive Interferenz zweier Teilstrahlen bei einer dünnen Schicht	233
Abbildung 292: Seifenblasen schillern aufgrund von Interferenzfarben	235
Abbildung 293: Senkrecht stehende Seifenlamelle mit farblichen Turbulenzen	235
Abbildung 294: Ausgeprägtes Farbmuster der entstehenden Turbulenzen	235
Abbildung 295: Durch unterschiedliche Mengen an Wasser entsteht die Töne einer Tonleiter	237
Abbildung 296: Durch Bewegen des Fingers am Rand des Glases entsteht ein Ton	237
Abbildung 297: Haft- und Gleitreibung des Fingers erzeugen Schwingungen im Glas	237
Abbildung 298: Wasserstrahl bei ausgeschalteter Bassbox	240
Abbildung 299: Erkennbare Sinuswelle bei eingeschalteter Bassbox und Aufnahme mit 24 fps	240
Abbildung 300: Für das freie Auge sichtbarer Wasserstrahl	241
Abbildung 301: Aufbau bestehend aus Trichter, Schlauch, Frequenzgenerator und Bassbox	241
Abbildung 302: Wasserhammer – Durch schnelles Auf- und Abwärtsbewegen entsteht ein Knall	243
Abbildung 303: Destilliertes Wasser ist ein Nichtleiter	245
Abbildung 304: Durch die Ionen von Natriumchlorid entsteht ein Stromfluss	245
Abbildung 305: Wasserstrahl aus aufgedrehtem Wasserhahn	247

Abbildung 306: Durch negativ geladenes Lineal und positiv geladener Mikrofaserdecke entsteht ein elektrisches Feld – der Wasserstrahl wird abgelenkt	247
Abbildung 307: Zwei Bleistifte mit jeweils zwei spitzen Enden werden an eine Batterie angeschlossen und in Wasser getaucht.....	249
Abbildung 308: Durch den Stromfluss entsteht eine Redoxreaktion, bei welcher Chlor freigesetzt wird.....	249

6 SYMBOLVERZEICHNIS

In folgender Tabelle sind Symbole, welche in Formeln verwendet wurden, unterteilt in Kapiteln, dargestellt.

WASSER IM DETAIL 			
SYMBOL	EINHEIT	BEZEICHNUNG	FORMEL
m	kg	Masse	-
h	$J \cdot s$	Planck'sches Wirkungsquantum	1
f	$Hz = \frac{1}{s}$	Frequenz	1
E	$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	Energie	1
p_0	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Normaldruck	-
p	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck	-
T	$^{\circ}C; K$	Temperatur	-
Q	$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	Wärmeenergie	-

MECHANIK 			
SYMBOL	EINHEIT	BEZEICHNUNG	FORMEL
σ	$\frac{N}{m} = \frac{kg}{s^2}$	Oberflächenspannung	2, 12, 13, 15
W	$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	Arbeit	2, 10, 12, 13
A	m^2	Fläche	2, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 21, 31, 45, 46, 47, 64, 66, 67, 68, 69, 71, 73, 78, 79, 85
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte	-, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 63, 64, 69, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 84, 86
a	m	Seitenlänge	3
b	m	Schenkellänge	3

d	m	Diagonale Seitenfläche Würfel	3
D	m	Raumdiagonale Würfel	3
h	m	Höhe gleichseitiges Dreieck bei Minimalfläche	4, 5, 17, 18, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 50, 63, 64, 76, 77, 78
c	m	Basis gleichseitiges Dreieck	5
H	m	Höhe gleichseitiges Dreiecks Außenfläche Tetraeder	7, 8
r	m	Radius	13, 14, 15, 50, 53, 87, 88, 89, 90, 91, 92
F	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Kraft	10, 12, 16, 31, 44, 45, 46, 47, 48, 57, 64, 70, 71, 78, 90
s	m	Weg	10, 11, 12
l	m	Länge	11, 12, 72, 73, 80, 81, 82, 83
F_O	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Kraft der Oberflächenspannung	13, 15, 21
F_P	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Druckkraft	14, 15
p	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck	14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 63, 64, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 83, 84, 86
F_G	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Gewichtskraft	17, 18, 21, 54, 55, 58, 59, 64, 88, 91
m	kg	Masse	17, 49, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 70, 87, 88, 90, 91
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung	17, 18, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 46, 47, 48, 49, 54, 55, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 76, 77, 88, 89, 90, 91, 92
V	m^3	Volumen	17, 30, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 65, 66, 67, 83
M	$\frac{kg}{mol}$	Molmasse	20
R	$\frac{J}{mol \cdot K} =$	Allgemeine Gaskonstante	20
T	$^{\circ}C; K$	Temperatur	20
F_u	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Druckkraft	21

p_0	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Normaldruck	23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 38, 39, 40, 41, 43, 63
H	m	Skalenhöhe	28, 29
κ	$\frac{m^2}{N}$	Kompressibilität	30
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit	33, 66, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 88, 89
s	m	Weg	-, 66
t	s	Zeit	-, 65, 66, 67, 70, 73, 83
F_A	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Auftriebskraft	49, 54, 55
G	$\frac{N \cdot m^2}{kg^2}$	Gravitationskonstante	57, 59, 60, 61, 62
r	m	Abstand der Schwerpunkte zweier Körper	57, 59, 60, 61, 62
$\dot{V}$	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom	65, 66
a	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung	70, 88
η	$\frac{N \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s}$	Viskosität	78, 80, 83
F_W	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Strömungswiderstand	79
c_w	–	Widerstandsbeiwert	79
Re	–	Reynolds Zahl	80, 81, 82
ν	$\frac{m^2}{s}$	Kinematische Viskosität	80, 81, 82
R	m	Radius Rohr	83
F_{ZF}	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Zentrifugalkraft	87, 91
F_{ZP}	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	Zentripetalkraft	87, 88
ω	$\frac{rad}{s}$	Winkelgeschwindigkeit	87, 90, 91, 92
p	$N \cdot s = \frac{kg \cdot m}{s}$	Impuls	-



SYMBOL	EINHEIT	BEZEICHNUNG	FORMEL
Q	$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	Wärmemenge, Wärmeenergie	93, 107
A	m^2	Querschnittsfläche, Oberfläche	93, 99, 100, 101, 102
t	s	Zeit	93, 130
λ	$\frac{W}{m \cdot K} = \frac{kg \cdot m}{s^3 \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit	93
T	$^{\circ}C; K$	Temperatur	93, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 128, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139
l	m	Länge	93, 108, 109
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte	94, 98
Φ_r	$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$	Strahlungsfluss der reflektierten Strahlung	94, 97, 98
Φ_0	$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$	Strahlungsfluss der auftreffenden Strahlung	94, 95, 96, 97, 98
Φ_a	$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$	Strahlungsfluss der absorbierten Strahlung	95, 97, 98
Φ_t	$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$	Strahlungsfluss der transmittierten Strahlung	96, 97, 98
α	–	Absorptionsgrad	95, 98, 100
τ	–	Transmissionsgrad	96, 98
P	$W = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$	Leistung	99, 100, 101, 102
σ	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante	99, 100, 101
ε	–	Emissionsgrad	99, 100, 101
λ	m	Wellenlänge	102, 103, 105, 106
c_0	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit (Vakuum)	102, 103, 104
k	$\frac{J}{K} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot K}$	Boltzmann-Konstante	102, 103, 104, 111, 112, 113, 114, 115, 124, 125, 127, 128, 133, 134
h	$J \cdot s = \frac{kg \cdot m^2}{s}$	Planck'sches Wirkungsquantum	102, 103, 104
b	$m \cdot K$	Wien'sche Konstante	104
m	kg	Masse	107, 111, 113, 114, 115, 116, 131, 132, 134

c	$\frac{J}{kg \cdot K} = \frac{m^2}{s^2 \cdot K}$	Spezifische Wärmekapazität	107
α	$\frac{1}{K}$	Stoffspezifischer Längenausdehnungskoeffizient	108, 109
β	$\frac{1}{K}$	Volumenausdehnungskoeffizient	110
V	m^3	Volumen	110, 117, 118, 119, 120, 123, 125, 128, 132, 137
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit	111, 113, 114, 115, 1160, 130, 131, 132, 134
E	$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	Bewegungsenergie	112
p	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck	117, 118, 121, 122, 123, 125, 128, 129, 131, 132, 133, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141
C	$\frac{J}{K} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot K}$	Proportionalitätskonstante	123, 124
N	–	Teilchenanzahl	124, 125, 126, 128, 132, 133, 134
N_A	$\frac{1}{mol}$	Avogadro-Konstante	126, 127
n	mol	Teilchenzahldichte	126, 127, 130, 131, 133
R	$\frac{J}{mol \cdot K}$	Allgemeine Gaskonstante	127, 133
R_{St}	$\frac{mol \cdot m}{s}$	Stoßrate	130, 131
$\mathbf{p}$	$N \cdot s = \frac{kg \cdot m}{s}$	Impuls	131
λ	$\frac{J}{kg} = \frac{m^2}{s^2}$	Spezifische Verdampfungsenergie	138
v_D	$\frac{m^3}{kg}$	Spezifisches Volumen Dampf	138
v_{Fl}	$\frac{m^3}{kg}$	Spezifisches Volumen Flüssigkeit	138, 139
v_{Fest}	$\frac{m^3}{kg}$	Spezifisches Volumen Festkörper	139
λ'	$\frac{J}{kg} = \frac{m^2}{s^2}$	Spezifische Schmelzenergie	139
p_0	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Normaldruck	140, 141
h	m	Höhe	140, 141, 142
H	m	Skalenhöhe	140, 141



SYMBOL	EINHEIT	BEZEICHNUNG	FORMEL
c	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit (Vakuum)	143, 145, 149, 152
n	–	Brechungsindex	143, 144, 145, 150, 151
I	$\frac{W}{m^2} = \frac{kg}{s^3}$	Intensität; Streuintensität	146, 153
α	$\frac{1}{m}$	Absorptionskoeffizient	146, 147
c	$\frac{mol}{m^3}; \frac{kg}{m^3}$	Konzentration	147
ε	$\frac{m^2}{kg}$	Extinktionskoeffizient	147
E	$J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$	Energie	148, 149, 152
h	$J \cdot s$	Planck'sches Wirkungsquantum	148, 149, 152
f	$Hz = \frac{1}{s}$	Frequenz	148, 149
λ	m	Wellenlänge	149, 152, 153
α_G	°	Grenzwinkel	150, 151
g	m	Gegenstandsweite	154, 156
b	m	Bildweite	154, 155, 156
f	m	Brennweite	155, 156
B	m	Bildhöhe	154, 155
G	m	Gegenstandshöhe	154, 155
δ	m	Gangunterschied	-



SYMBOL	EINHEIT	BEZEICHNUNG	FORMEL
p	$Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck	157
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte	157
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung	157
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit	157
h	m	Höhe	157



SYMBOL	EINHEIT	BEZEICHNUNG	FORMEL
e	$C = A \cdot s$	Elementarladung	-

7 KONSTANTEN

Folgende Tabelle listet die in der Arbeit verwendeten Konstanten auf (Klose, 2008, S. 385).

KONSTANTE	SYMBOL	WERT	EINHEIT
Avogadro-Konstante	N_A	$6,0221367(36) \cdot 10^{-23}$	$\frac{1}{mol}$
Boltzmann-Konstante	k	$1,380658(12) \cdot 10^{-23}$	$\frac{J}{K} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot K}$
Elementarladung	e^-	$1,60217733(49) \cdot 10^{-19}$	$C = A \cdot s$
Elektronenmasse	m_e	$9,1093897(54) \cdot 10^{-31}$	kg
Erdbeschleunigung	g	9,80665	$\frac{m}{s^2}$
Gaskonstante	R	8,314510(70)	$\frac{J}{mol \cdot K}$
Gravitationskonstante	G	$6,67259(85) \cdot 10^{-11}$	$\frac{N \cdot m^2}{kg^2}$
Lichtgeschwindigkeit (Vakuum)	c_0	299 792 458	$\frac{m}{s}$
Neutronenmasse	m_n	$1,6749286(10) \cdot 10^{-27}$	kg
Planck'sche Konstante	h	$6,6260755(40) \cdot 10^{-34}$	$J \cdot s = \frac{kg \cdot m^2}{s}$
Protonenmasse	m_p	$1,6726231(10) \cdot 10^{-27}$	kg
Stefan-Boltzmann-Konstante	σ	$5,67051(19) \cdot 10^{-8}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
Wien'sche Konstante	b	0,002897756(24)	$m \cdot K$