Kapitel D

Mechanik deformierbarer Körper

“Das einzig Gefährliche am Fliegen ist die Erde.„
- Wilbur Wright

Die Mechanik deformierbarer Körper befasst sich hauptsächlich mit der Bewegung von Festkörpern und deren Verformungen unter Einwirkung von Kräften. Die Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen, die allgemein als Fluidmechanik[1] bezeichnet wird, ist ein eigenständiges Teilgebiet, das sich mit diesen Medien beschäftigt. In einem ersten Teil befassen wir uns, ähnlich wie im vorherigen Kapitel, mit der Statik der Fluida, die als *Hydrostatik* oder auch Fluidstatik bekannt ist. Dieses Kapitel wird vergleichsweise kurz gehalten, da die wirklich faszinierenden Aspekte der Fluida im zweiten Teil behandelt werden. Der zweite Teil widmet sich der Dynamik der Fluida, also der *Hydrodynamik* oder auch Fluiddynamik genannt. Dieser zweite Teil wird jedoch nur von Schülern im mathematisch-naturwissenschaftlichen Profil behandelt, da für andere Schüler die verfügbare Zeit nicht ausreicht.

Die Aerodynamik und Hydrodynamik sind faszinierende Teilgebiete der Fluid- oder Strömungsdynamik, die sich mit dem Verhalten von Gasen bzw. Flüssigkeiten gegenüber festen Körpern befassen. Diese Disziplinen spielen eine zentrale Rolle in der modernen Ingenieurwissenschaft und Forschung. Bei der Analyse von komplexen Strömungsvorgängen stossen Forscher oft schnell an die Grenzen formaler Lösungen. Die Natur dieser Phänomene erfordert oft hochkomplexe mathematische Modelle, die nur schwer analytisch zu bewältigen sind.

In solchen Fällen werden Simulationen und Experimente im Windkanal zu unverzichtbaren Werkzeugen. Die Abbildung aus realer Strömungsverhältnisse in einer kontrollierten Umgebung ermöglicht präzise Untersuchungen von aerodynamischen und hydrodynamischen Phänomenen. Durch den Einsatz von Windkanälen, wie im beigefügten Bild aus [21], können Forscher die Strömungen unter verschiedenen Bedingungen reproduzieren und analysieren, was wiederum wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung von Fahrzeugen, Flugzeugen, Schiffsdesigns und vielen anderen Anwendungen liefert. Letztlich verdeutlicht dies die Notwendigkeit von Experimenten und Simulationen, um die Grenzen der formalen Lösungen komplexer fluiddynamischer Probleme zu überwinden.

[1] Fluid (vom lateinischen fluidus für „fliessend“ und vom englischen fluid für die „Flüssigkeit“) eine Substanz, die einer beliebig langsamen Scherung keinen Widerstand entgegensetzt, d. h. eine endliche Viskosität hat. Der übergeordnete Begriff Fluid wird für Gase und Flüssigkeiten verwendet, weil die meisten physikalischen Gesetze für beide Stoffarten gleichermassen gelten und sich viele ihrer Eigenschaften nur quantitativ, also in ihren Grössenordnungen, aber nicht qualitativ unterscheiden. [22]

1 Hydrostatik

Lernziele

- Sie kennen die Definition des Drucks und können Sie anwenden.
- Sie kennen die verschiedenen Einheiten des Drucks und können von einer zur anderen umrechnen.
- Sie verstehen das Prinzip der hydrostatischen Hebebühne mit all ihren physikalischen Folgen.
- Sie können den Schweredruck aus der Definition des Drucks herleiten und damit hydrostatische Probleme lösen.
- Sie kennen das Archimedische Prinzip.
- Sie können die Auftriebskraft herleiten und damit Probleme lösen.
- Sie kennen den Unterschied zwischen sinken, schweben und schwimmen.

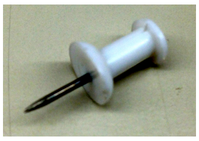
Dieses Unterkapitel zur Hydrostatik ist, wie bereits erwähnt, vergleichsweise knapp und konzentriert sich hauptsächlich auf die Einführung des wichtigen Konzepts des Drucks. Es ist durchaus naheliegend, den Druck in der Hydrostatik zu erläutern, jedoch wird seine entscheidende Bedeutung erst im späteren Kapitel zur Wärmelehre deutlich.

In diesem Kapitel werden wir zunächst die *Definition des Drucks* erarbeiten und anschliessend einige Anwendungen davon besprechen. Unmittelbar aus dem Druck ergibt sich das Konzept des *Auftriebs*, das wir daraufhin näher erläutern werden. Aus dem Auftrieb ergeben sich interessante Anwendungen, die ebenfalls im Verlauf dieses Kapitels behandelt werden.

1.1 Definition des Drucks

Bevor wir uns der Definition des Drucks zuwenden, schauen wir uns einige Experimente an, die dazu dienen sollen, die Definition zu motivieren.

Exp. 1: Reissnagel
In diesem Experiment wird mit derselben Kraft einmal ein Reissnagel (siehe Bild) und einmal ein Finger auf das Bein gedrückt. Wer wird sich wohl freiwillig melden?



Es ist uns allen klar, dass es mit dem Finger nicht schmerzt und mit dem Reissnagel sehr schmerzhaft ist. Doch warum ist das so?

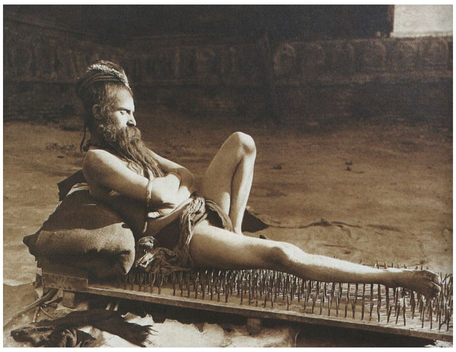
Der Unterschied liegt an der Fläche, die uns berührt, denn die aufgebrachte Kraft ist dieselbe.

Im nächsten Versuch soll dies nochmals veranschaulicht werden.

Exp. 2: Münze auf dem Wasser
In diesem Experiment wird eine sehr leichte Münze auf die Wasseroberfläche gelegt. Je nachdem, ob man sie flach oder mit der Kante zuerst auf das Wasser legt, taucht sie ein oder nicht (siehe Abbildung).

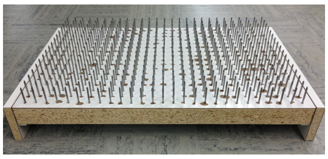
Natürlich ist im Prinzip dasselbe Phänomen dafür verantwortlich, dass die Münze nicht eintaucht. Es gibt jedoch einen kleinen Unterschied. Das Wasser scheint einen gewissen Widerstand zu bieten, den man als Oberflächenspannung bezeichnet. Ohne Oberflächenspannung würde die Münze entweder schwimmen oder sinken, wie im Abschnitt Auftrieb (vgl. Abschnitt D.1.3) noch erklärt wird.

Im nächsten Versuch werden wir das Geheimnis des Fakirs[2] lösen. Hier noch ein Bild eines traditionellen Fakir, ebenfalls aus [22].



Im folgenden Experiment werde ich mich persönlich auf das Nagelbrett wagen.

Exp. 3: Nagelbrett
Ein Brett wird mit vielen langen Nägeln versehen, sodass die Spitzen nach oben zeigen (siehe Abbildung). Vorsichtig und durch Verteilung des Körpergewichts auf eine möglichst grosse Fläche legt man sich auf das Brett.



Wir wissen nun bereits, dass die Krafteinwirkung gering ist, wenn die Fläche gross ist. Da man sein Körpergewicht auf sehr viele Nägel verteilt, wird die Belastung auf jeden Nagel sehr gering, wodurch man keinen Schmerz verspürt. Sie können es gerne selbst ausprobieren.

Diese verschiedenen Versuche haben eindeutig gezeigt, dass es nicht nur auf die Kraft allein ankommt, sondern auch auf die Fläche, über die die Kraft verteilt wird. Aufgrund dieser Erkenntnis definieren wir eine neue Grösse - den Druck - wie folgt:

Def. 1: *(Druck) Der Druck p ist definiert als Kraft F pro Fläche A, es gilt also*

$$\boxed{p = \frac{F}{A}.}$$

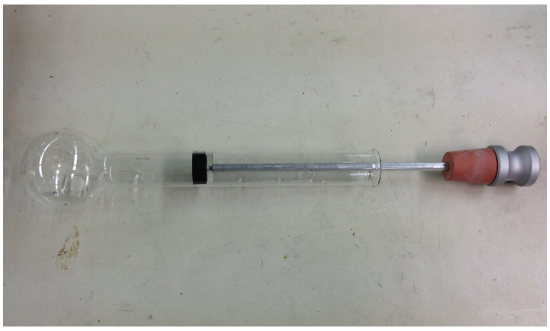
Die Einheit ist $[p] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{Pa}$, was für Pascal[3] steht.

Wie aus der Definition ersichtlich ist, ist der Druck eine skalare Grösse, das heisst, er hat keine Richtung, sondern wirkt gleichmässig in alle Richtungen. Dies wird durch das folgende einfache Experiment auf einfache Weise verdeutlicht.

Exp. 4: Spritzkugel
Eine Hohlkugel ist mit Löchern versehen (siehe Abbildung), so dass Wasser herausspritzen kann, wenn Druck angewendet wird. Da der Druck eine skalare Grösse ist, sollten die Wasserspritzer in alle Richtungen gleich weit gelangen.

[2] Als Fakir bezeichnete man ursprünglich einen Anhänger des islamischen Sufismus, also einen Derwisch. Später ging der Sprachgebrauch auch auf die Bezeichnung für heimat- und besitzlos umherwandernde indische Asketen über, neben muslimischen auch auf hinduistische Sadhus, die ihre teilweise bizarren Künste vor Publikum demonstrieren.
Einerseits sind viele Fakire ernsthafte Mitglieder religiöser Orden, andererseits nutzen viele Gaukler den Aberglauben und die Sensationslust der Bevölkerung aus, um sich als Fakir mit angeblichen „Wundern“ und „Zaubertricks“ den Lebensunterhalt zu verdienen. In Europa bekannt wurden Fakire durch das Fakirbrett. Aus [22]

[3] Blaise Pascal (19. Juni 1623 - 19. August 1662) war ein französischer Mathematiker, Physiker, Literat und christlicher Philosoph.



Der Druck ist eine historisch bedeutsame physikalische Grösse und hat im Laufe der Jahrhunderte verschiedene spezielle Einheiten erhalten, die auch heute noch in Gebrauch sind. Die folgende Tabelle zeigt die gebräuchlichsten Einheiten.

Einheit	Umrechnung	Gebraucht ...	Beispiel
Pa: Pascal	–	SI-Einheit	Luftdruck: $\sim 10^5$ Pa
bar: Bar	10^5 Pa	Alltag	Reifendruck: ~ 3 bar
atm: physikalische Atmosphäre	101 325 Pa	Alltag	Luftdruck auf Meereshöhe
Torr: Torricelli	1/760 atm	veraltet[4]	–
mmHg: Millimeter Quecksilbersäule	1 Torr	Medizin	Blutdruck 80-120 mmHg

Betrachten wir vor dem Eintauchen in die Anwendungen noch zwei alltägliche Beispiele. Zuerst schauen wir uns die Pressluftflasche und die auf sie wirkenden Kräfte an, und anschliessend betrachten wir die Funktionsweise des Dampfkochtopfs.

Bsp. i.
In den Pressluftflaschen von Tauchern herrscht ein hoher Druck. Der Inhalt der Flasche steht etwa unter einem Druck von 200 bar. a) Berechne die Kraft, die von Innen auf die 380 cm^2 grosse Bodenfläche wirkt. b) Wie gross ist die Kraft, die der Luftdruck von aussen auf den Boden ausübt? c) Sehr gefährlich ist es, wenn durch einen Unfall das Ventil der Pressluftflasche abgeschlagen wird. Berechne, welche Kraft von Innen auf das Ventil mit der Fläche 4.5 cm^2 wirkt.

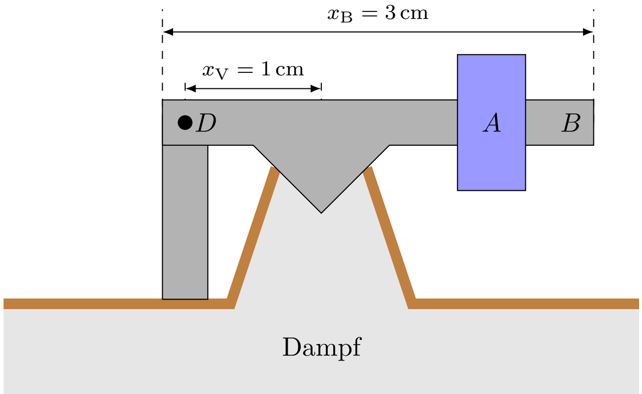
Lsg: a) $F_\mathrm{i} \approx 760\,\mathrm{kN}$, b) $F_\mathrm{a} \approx 3.8\,\mathrm{kN}$, c) $F_\mathrm{V} \approx 9\,\mathrm{kN}$

Lösung:

Nun ein etwas anspruchsvolleres Beispiel:

Bsp. ii.
Die untenstehende Skizze zeigt das Modell eines Überdruckventils bei einem Dampfkochtopf. Der Arm B ist an der linken Seite (bei D) drehbar gelagert. Auf ihm ist der Körper A ($F_\mathrm{A} = 0.25\,\mathrm{N}$) verschiebbar. Das Gewicht des Arms B werde zunächst vernachlässigt. (Vernachlässigen Sie den Abstand von Punkt D nach aussen und die Spitze des Arms ebenfalls.)

[4] 1978 abgelöst von mmHg.



a) Erläutere die Funktionsweise des Überdruckventils. b) Der Dampf übt eine Kraft von $0.60\,\mathrm{N}$ auf das Ventil aus. Wo muss sich in diesem Fall der Körper A befinden, damit kein Dampf abfliesst? c) Die wirksame Fläche des Ventils, auf welche der Dampf einwirken kann, sei $4.0\,\mathrm{mm}^2$. Berechne die Differenz zwischen dem äusseren Luftdruck und dem Druck im Topf. d) Nun werde das Gewicht des Arms B von $0.10\,\mathrm{N}$ nicht mehr vernachlässigt. Wie weit und in welche Richtung muss der Körper A gegenüber der in Teilaufgabe b) berechneten Position verschoben werden, damit kein Dampf abfliesst? Lsg: a) $-$, b) $x_A \approx 2.4\,\mathrm{cm}$, c) $\Delta p \approx 0.5\,\mathrm{bar}$, d) $0.6\,\mathrm{cm}$

Lösung:

Nachdem wir dieses Beispiel besprochen haben, das bereits eine Anwendung des Drucks darstellt, werden wir im nächsten Abschnitt weitere Anwendungen behandeln.

1.2 Anwendungen des Drucks

In diesem Abschnitt werden einige Anwendungen und weiterführende Gesetze erläutert und anhand von Beispielen veranschaulicht. Zum einen werden wir die hydraulische Hebebühne betrachten und zum anderen den Schweredruck mit seinen zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten.

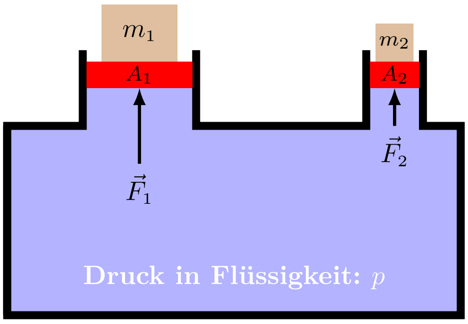
1.2.1 Hydraulische Hebebühne

Mit dem Experiment der Spritzkugel haben wir gezeigt, dass der Druck in einer Flüssigkeit in alle Richtungen gleich ist. Dies hängt hauptsächlich damit zusammen, dass Flüssigkeiten als *nicht* oder *kaum* komprimierbar gelten. Hier sind einige Vergleichszahlen, wobei die Tabelle wie folgt zu lesen ist: *Welcher Druck ist bei Normalbedingungen notwendig, um das Volumen zu halbieren.*

Stoff	Druck [bar]
Wasser	$2.4 \cdot 10^5$
Öl	$3 \cdot 10^5$
Luft	0.5

Wir erkennen also, dass Flüssigkeiten erst unter extrem hohem Druck komprimiert werden können und somit für viele praktische Zwecke als *nicht* komprimierbar gelten.

Diese Eigenschaft von Flüssigkeiten wird bei der Anwendung einer *hydraulischen Hebebühne* genutzt. Dazu betrachten wir ein rechteckiges Volumen mit zwei zylinderförmigen Öffnungen, wobei sich in beiden Öffnungen ein beweglicher Stempel auf der Flüssigkeitsfläche befindet.[5]



Da der Druck in der Flüssigkeit überall gleich gross ist und unter Berücksichtigung der Definition des Drucks, ergibt sich unmittelbar:

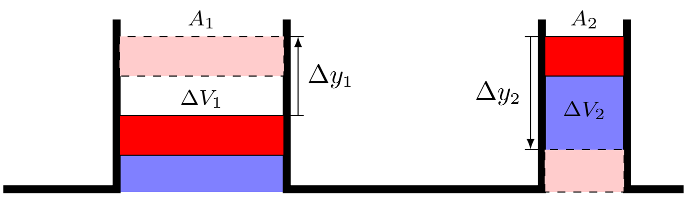
$$p = \frac{F}{A} \quad \Rightarrow \quad \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}.$$

Dies bedeutet, dass eine kleine Kraft auf eine kleine Fläche eine grosse Kraft auf einer grossen Fläche ausübt. Diese Vorstellung kann als Modell einer hydraulischen Hebebühne dienen. Betrachten wir dazu folgendes Beispiel:

Bsp. iii.
Nehmen wir für eine hydraulische Hebebühne $A_1 = 1\,\mathrm{m}^2$ und $A_2 = 1\,\mathrm{cm}^2$ an. Welche Kraft muss bei A_2 aufgewendet werden, wenn man eine Last von $1\,500\,\mathrm{kg}$ (auf A_1) damit halten möchte? Lsg: $F_2 \approx 1.5\,\mathrm{N}$

Lösung:

In dieser Anwendung ist - etwas versteckt - der Energiesatz der Mechanik zu finden. Betrachten wir dazu die Stempel etwas genauer, dann sehen wir, dass die Volumenänderung ΔV auf beiden Seiten gleich sein muss. Da die Flächen A_1 und A_2 nicht gleich sind, dürfen auch die zurückgelegten Strecken Δy_1 und Δy_2 nicht gleich sein (vgl. Abb.).



Da die Flüssigkeit inkompressibel ist gilt:

$$\Delta V_1 = -\Delta V_2.$$

Damit erhalten wir, dass folgendes Verhältnis gelten muss:

$$\Delta V_1 = A_1 \Delta y_1 = -A_2 \Delta y_2 = -\Delta V_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{A_1}{A_2} = -\frac{\Delta y_2}{\Delta y_1}.$$

Setzen wir dies in

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

[5] Die Höhe des Volumens soll als klein angesehen werden, sonst tritt ein weiteres Phänomen auf, welches im nächsten Abschnitt besprochen wird.

ein, erhalten wir:

$$\frac{F_1}{F_2} = -\frac{\Delta y_2}{\Delta y_1}.$$

Unter Berücksichtigung der Richtung von Δy_1 und Δy_2 und der Definition der Arbeit, erhalten wir[6]:

$$\Delta W_1 = F_1 \Delta y_1 = -F_2 \Delta y_2 = -\Delta W_2.$$

Damit ist die gesamte Arbeit W:

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 = 0,$$

was dem Energiesatz der Mechanik gehorcht, da keine mechanische Energie verändert wird, d. h. $\Delta E_{\text{kin}} = 0$.

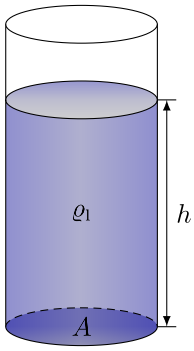
Was wir hier gezeigt haben, ist auch als die "Goldene Regel der Mechanik" bekannt. Galileo Galilei formulierte sie 1594 wie folgt: "Was man an Kraft spart, muss man an Weg zusetzen." Der Flaschenzug, den Sie aus der Sekundarstufe I kennen, ist ebenfalls eine Anwendung dieser Regel.

Im nächsten Abschnitt werden wir die Herleitung des Schweredrucks in Flüssigkeiten behandeln.

1.2.2 Schweredruck

Vielleicht haben Sie sich im vorherigen Abschnitt gefragt, warum der Druck am Boden des Behälters genauso gross ist wie oben, obwohl sich viel mehr Wasser über dem Boden befindet. Die sich daraus ergebende Frage lautet: Führt das Gewicht der darüber liegenden Flüssigkeit zu einer Erhöhung des Drucks? Die Antwort ist ganz einfach und eigentlich klar: Ja, das tut es.

Dazu betrachten wir einfachheitshalber ein zylindrisches Volumen mit der Querschnittsfläche A, das bis zur Höhe h mit einer Flüssigkeit der Dichte ϱ_1 gefüllt ist.



Betrachten wir den sogenannten Schweredruck p_S auf die Fläche A dann erhalten wir mit der Definition:

$$p_\text{S} = \frac{F}{A} = \frac{F_\text{g}}{A}.$$

Die Gewichtskraft der Flüssigkeit ist:

$$F_\text{g} = mg = \varrho_1 V g$$

mit dem Volumen $V = Ah$ eingesetzt, erhalten wir das folgende Gesetz:

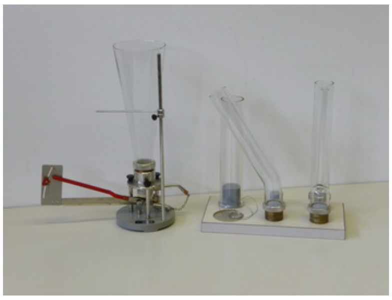
Ges. 1: *(Pascalsches Gesetz) Der Schweredruck oder hydrostatische Druck ist der Druck, der sich innerhalb einer Flüssigkeit, durch den Einfluss der Schwerkraft einstellt. Er entspricht dem Produkt aus der Dichte der Flüssigkeit ϱ_1, der Fallbeschleunigung g und der Höhe der Flüssigkeitssäule h, d. h.*

$$\boxed{p_\text{S}(h) = \varrho_1 g h.}$$

Das folgende Experiment zeigt, dass der Höhendruck nicht von der Form des Behälters und somit auch nicht von der Menge des Wassers abhängt, sondern nur von der Höhe. Dieses Phänomen wurde früher als das "hydrostatische Paradoxon" bezeichnet.

Exp. 5: Bodendruck bei Gefässen
In einem Experiment werden drei unterschiedliche Gefässe mit Wasser gefüllt, wobei darauf geachtet wird, dass die Druckanzeige in allen Gefässen auf die gleiche Höhe steigt (siehe Abbildung).

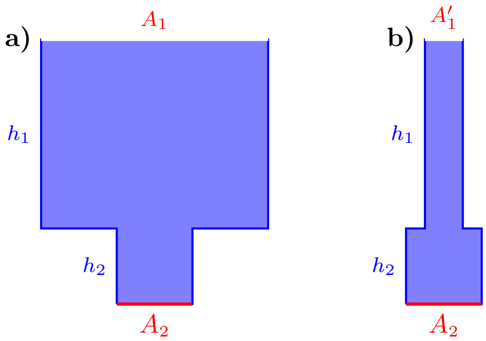
[6] Beachten Sie, dass die Richtung der Kraft sich nicht ändert. Die Flüssigkeit hat eine ähnliche Wirkung, wie eine Rolle, sie lenkt die Kraft nur um.



Obwohl ein Gefäss mehr Wasser und ein anderes weniger Wasser enthält, steigt die Druckanzeige gleich hoch, solange die Höhe der Wassersäule in den Gefässen gleich ist.

Lassen Sie uns nun das hydrostatische Paradoxon genauer untersuchen, indem wir zwei verschiedene Gefässformen betrachten.

Bsp. iv.
Zeigen Sie, dass auf die untere Fläche A_2 für beide Gefässe a) und b) der gleiche Druck gleich gross ist, sofern die Wassersäule über den Flächen gleich hoch sind. Gehen Sie dazu auf die Gesamtkraft ein.

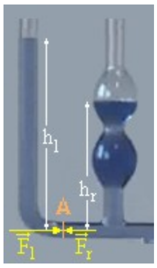


Das Paradoxe an diesem Problem ist, dass es offensichtlich ist, dass das linke Gefäss viel mehr Wasser enthält als das rechte. Woher nimmt also das linke seine Kraft oder wie verliert das rechte seine. Lsg: –

Lösung:

In einem nächsten Experiment könnte man den Eindruck haben, dass die verschiedenen Röhren miteinander kommunizieren.

Exp. 6: Kommunizierende Röhren
Betrachten Sie die verschiedenen Röhren wie in der Abbildung gezeigt. Sobald Wasser in eine der Röhren gegossen wird, gleichen sich die Pegel in allen Röhren aus, so dass sie überall gleich hoch sind.



Die Erklärung ist nicht besonders kompliziert. Wenn wir das rechte Bild aus [25] betrachten, sehen wir, dass die Kräfte bei unterschiedlichen Höhen nicht gleich sind. Dies scheint jedoch im Widerspruch zur Aussage zu stehen, dass der Druck in Flüssigkeiten überall gleich sein muss.

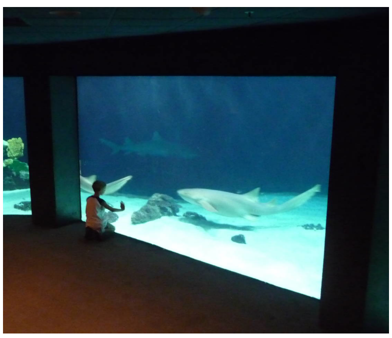
Zur Vertiefung und Übung betrachten wir das folgende Beispiel. Obwohl in diesen Beispielen und zukünftigen Aufgaben hauptsächlich Wasser als Flüssigkeit verwendet wird, können ähnliche Überlegungen mit anderen Flüssigkeiten angestellt werden.

Bsp. v.
Bestimmen wir dazu den Schweredruck im Wasser a) in einer Tiefe von 10 m, b) in einer Tiefe von n Meter in bar und c) den Gesamtdruck in 10 m Tiefe. Lsg: a) $p_S \approx 1\,\text{bar}$, b) $p_S \approx n \cdot 0.1\,\text{bar}$, c) $p_{ges} \approx 2\,\text{bar}$

Lösung:

Das nächste Beispiel befasst sich mit den Kräften, die auf Scheiben in Aquarien wirken, insbesondere die Kräfte in einem Unterwasser-Aquarium.

Bsp. vi.
Bestimmen Sie die Gesamtkraft auf die Scheibe im Bild (aus [26]) aufgrund des Schweredrucks.



Die Scheibe hat eine Höhe von etwa 5 m und eine Breite von etwa 10 m. Das Becken hat eine Tiefe von 20 m.
Lsg: $F \approx 8.75\,\text{MN}$

Lösung:

Im vorigen Beispiel haben wir berechnet, dass eine Wassersäule von 10 m den gleichen Druck erzeugt, wie die gesamte Atmosphäre über uns. Doch wie misst man eigentlich den Luftdruck?

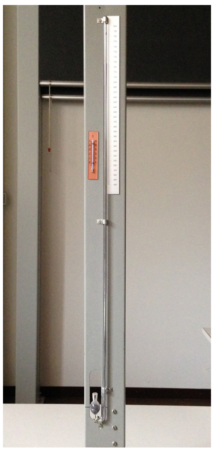
Die erste Messung des Luftdrucks gelang Evangelista Torricelli[7], indem er ein U-Rohr verwendete, das einseitig offen und mit Quecksilber gefüllt war (siehe das folgende Experiment). Er war der erste, der den Anstieg des Quecksilbers auf den Luftdruck zurückführte und nicht, wie namhafte Naturphilosophen seiner Zeit, auf das Vakuum. Die Höhe der Quecksilbersäule wird heute in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg) gemessen und wurde früher mit Torr abgekürzt.

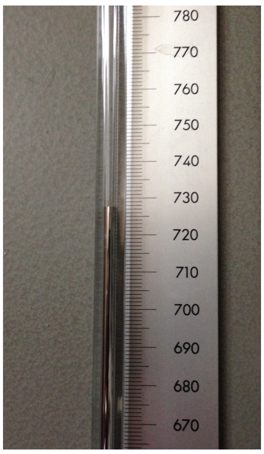
E. Torricelli (1608-1647)

Torricelli übertrug 1640 die Galileischen Fallgesetze auf ausströmende Flüssigkeiten, ("Torricellisches Ausflussgesetz"), wurde 1642 in Florenz der Nachfolger von Galileo Galilei als Hofmathematiker und trug massgeblich zur Entwicklung der Infinitesimalrechnung bei. Toricellis Experiment feuerte die im Europa des 17. Jahrhunderts erbittert geführte Debatte über einen Horror vacui neu an und entwickelte sich zum naturphilosophischen Standardproblem ihrer Zeit. Plenisten und Vacuinisten stritten sich in den folgenden Jahrzehnten über die Eigenschaften und das Wesen dieses Toricellischen Raumes.

Exp. 7: Quecksilber-Barometer

Das Quecksilber-Barometer ist im Wesentlichen ein einseitig offenes U-Rohr, das mit Quecksilber gefüllt ist (siehe linke Abbildung). Die offene Seite wird der Luft ausgesetzt. Die Masse der Luft in der Atmosphäre drückt auf die Quecksilberoberfläche und bewirkt einen Anstieg des Quecksilbers (siehe rechte Abbildung).





An der KZU messen wir heute (22. September 2013) einen Luftdruck von 727 Torr.

Im folgenden Beispiel können wir nachvollziehen, warum Quecksilber besser geeignet ist als Wasser für ein Barometer.

Bsp. vii.

Bestimmen Sie die Steighöhe des Wassers bei einem Luftdruck von 730 Torr für ein Wasserbarometer. Lsg: $h \approx 9.7\,\mathrm{m}$

[7] Evangelista Torricelli (15. Oktober 1608 in Faenza - 25. Oktober 1647 in Florenz) war ein italienischer Physiker und Mathematiker.

Lösung:

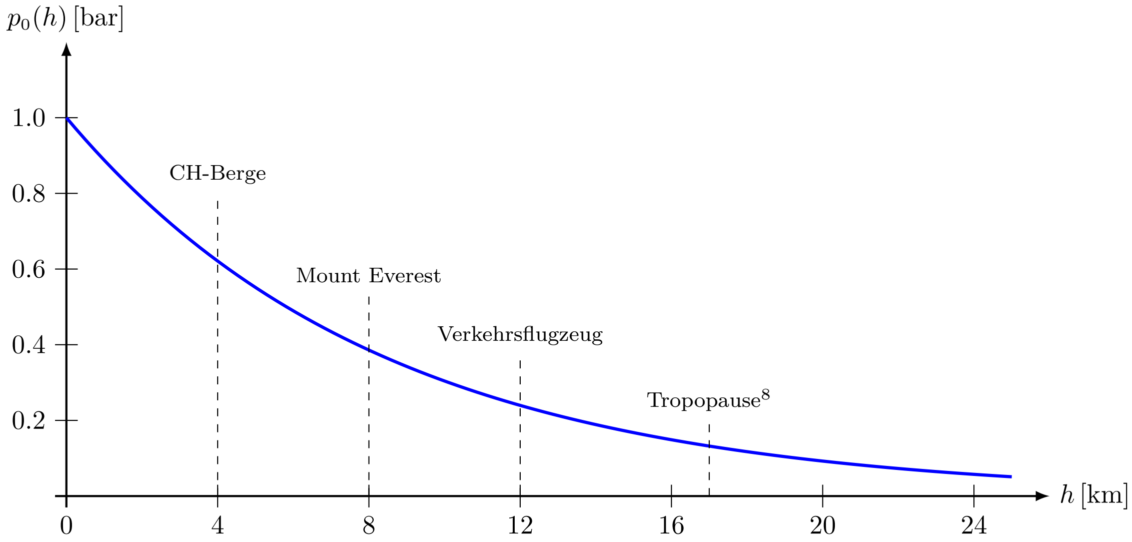
Die Tatsache, dass die gesamte Atmosphäre über unseren Köpfen nur einen Druck von etwa einem Bar ausübt, beruht im Wesentlichen darauf, dass die Dichte nicht konstant ist. Für den Schweredruck der Luft kann die Höhenformel hergeleitet werden. Eine detaillierte Herleitung erfolgt jedoch erst, nachdem das ideale Gasgesetz eingeführt wurde. Hier ist vorerst nur das Resultat:

Ges. 2: *(Barometrische Höhenformel) Die barometrische Höhenformel beschreibt die Abhängigkeit des Luftdrucks $p_0(h)$ von der Höhenänderung Δh, d. h.*

$$\boxed{p_0(h_1) = p_0(h_0)e^{-\Delta h/h_\mathrm{S}},}$$

wobei h_S als Skalenhöhe definiert wird und etwa $8.4\,\mathrm{km}$ *bei* $15°\mathrm{C}$ *ist.*

Die Formel besagt, dass bei jeder Höhenzunahme oder -abnahme von h_S der Luftdruck um den Faktor $e \approx 2.7$ ab- oder zunimmt. Graphisch sieht es wie folgt aus:



Betrachten wir dazu noch das folgende Beispiel, wobei wir zu Beginn diesen Filmabschnitt anschauen. (vgl. Video: Freier Fall von Felix Baumgartner)

Bsp. viii.
Die meisten erinnern sich noch an den Sprung aus der Stratosphäre von Felix Baumgartner von einer Höhe von $40'000\,\mathrm{m}$. Bei welchem Luftdruck ist er also gesprungen? Lsg: $p_0(h) \approx 0.009\,\mathrm{bar}$

[8] Die Tropopause ist die Trennschicht zwischen der Troposphäre und der stabilen Stratosphäre.

Lösung:

Mit diesem Beispiel beenden wir den Abschnitt zum Schweredruck und wenden uns dem Auftrieb zu.

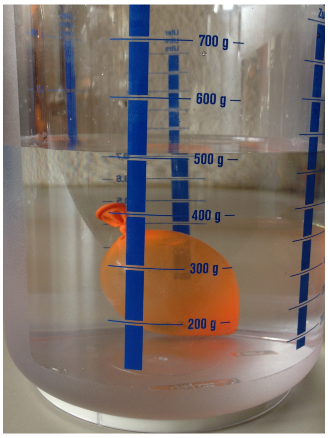
1.3 Auftrieb

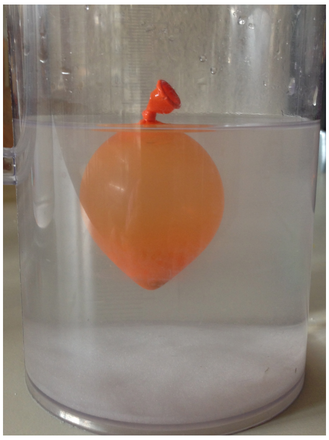
Unser Erfahrungsschatz bezüglich der Auftriebskraft ist umfangreich. Dennoch gibt es viele Anwendungen und Beispiele, die auf den ersten Blick nicht so offensichtlich sind. Natürlich gibt es einfachere Phänomene, wie zum Beispiel das Schwimmen oder Sinken von Gegenständen. Aus der Sekundarstufe I wissen wir vielleicht noch, dass dies mit der Dichte der Körper zu tun hat. Aber warum schwimmt dann ein Schiff, obwohl es aus Eisen besteht und Eisen eine sehr hohe Dichte hat? Diese und andere Fragen werden in diesem Abschnitt zum Auftrieb beantwortet.

1.3.1 Archimedisches Prinzip

Bevor wir uns der Legende des Archimedes zuwenden, betrachten wir einige Versuche und leiten dann das Archimedische Prinzip experimentell und theoretisch her.

Exp. 8: Süss- und Salzwasser
Ein mit Wasser und einigen Bleischrot gefüllter Luftballon wird zuerst in Süsswasser (siehe linke Abbildung) und dann in Salzwasser (siehe rechte Abbildung) eingetaucht.





Es scheint, dass ein Körper schwimmt, wenn sich die Dichte der Flüssigkeit ändert. Hier reicht bereits eine gewisse Menge Salz aus, um den Ballon schwimmen zu lassen.

Vielleicht sind Ihnen Bilder vom Toten Meer bekannt, wie das folgende aus [24]. Darauf ist eine Frau zu sehen, die gemütlich im tiefen Wasser liegt und liest (siehe Abbildung).

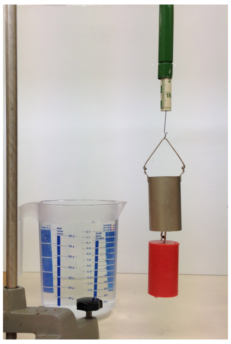
Der Grund dafür, dass die Frau an der Wasseroberfläche aufschwimmt, liegt darin, dass der Salzgehalt im Toten Meer höher ist als in anderen Meeren[9].

Der nächste Versuch soll nicht aufgeklärt werden, sondern als Denkaufgabe dienen. Dabei vergleichen wir das Schwimmverhalten von Coca-Cola und Coca-Cola Zero in Wasser.

Exp. 9: Coca-Cola vs Coca-Cola Zero
Füllt man einen grossen Glasbehälter mit Wasser, sodass eine Flasche Coca-Cola vollständig eintauchen kann, und legt man die Coca-Cola- und Coca-Cola-Zero-Flaschen ins Wasser, sieht man folgendes:

Das folgende Experiment ist etwas anspruchsvoller und erfordert Ihre volle Aufmerksamkeit. Daraus lässt sich dann direkt das Ärchimedische Prinzipäbleiten.

Exp. 10: Archimedisches Prinzip
An eine Federwaage werden ein Hohlzylinder und ein Vollzylinder gehängt, wobei der Vollzylinder genau in den Hohlzylinder passt (siehe Bild).



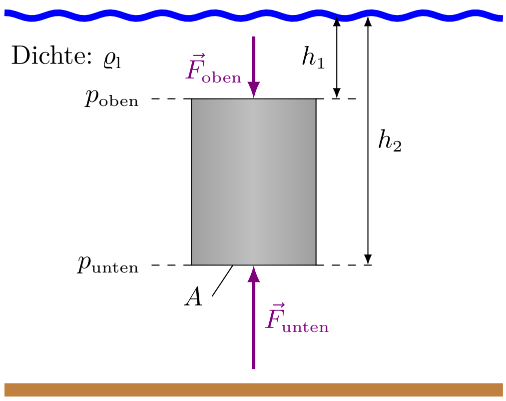
Nun wird das Gewicht des Hohlzylinders und des Vollzylinders zusammen in der Luft gemessen und beträgt 2 N. Wenn beide in das Wasser eingetaucht werden, so dass nur der Vollzylinder vollständig unter Wasser ist, zieht sich die Federwaage ein wenig zusammen und zeigt etwa 1.5 N an. Wenn nun der Hohlzylinder mit Wasser gefüllt wird, dehnt sich die Federwaage wieder aus und zeigt wieder 2 N an. Was bedeutet das nun?

Das Experiment zeigt, dass der Gewichtsverlust durch den Auftrieb im Wasser gleich der Menge des verdrängten Wassers ist. Genau das wird durch das Archimedische Prinzip formuliert:

Ges. 3: *(Archimedisches Prinzip) Der Betrag des Auftriebs eines Körpers in einem Fluidum ist gleich dem Gewicht des verdrängten Fluidums.*

Die theoretische Herleitung der Auftriebskraft basiert auf dem Schweredruck. Betrachten wir dazu einen vollständig eingetauchten Zylinder.

[9] Der Salzgehalt des Toten Meeres liegt bei bis zu 33%, im Durchschnitt liegt er bei rund 28%. (Zum Vergleich: Der Salzgehalt des Mittelmeeres liegt bei durchschnittlich 3.8%. Der Grund für den hohen Salzgehalt ist, dass das Tote Meer keinen Abfluss hat und im trockenen Wüstenklima das Wasser verdunstet, wobei Mineralien, Salze und anderes zurückbleiben und sich im Toten Meer anreichern.



Die Auftriebskraft ist damit die Differenz aus der Kraft unten und oben, d. h.

$$F_{\text{A}} = F_{\text{u}} - F_{\text{o}}.$$

Durch einsetzen der Definition des Drucks erhalten wir:

$$F_{\text{A}} = (p_{\text{u}} - p_{\text{o}})A.$$

Der Druck entspricht natürlich dem Schweredruck auf der entsprechenden Höhe, d. h. $p_{\text{u,o}} = \varrho_l g h_{2,1}$ und damit gilt:

$$\begin{aligned} F_{\text{A}} &= (\varrho_l g h_2 - \varrho_l g h_1)A \\ &= \varrho_l g \underbrace{(h_2 - h_1)A}_{=\text{V}_{\text{K}}} \end{aligned}$$

Daraus folgt folgende Formel für die Kraft:

Ges. 4: *(Auftriebskraft) Der Betrag der Auftriebskraft F_{A} (oder kurz: der Auftrieb) eines Körpers mit dem Volumen V_{K} in einem Fluidum der Dichte ϱ_l ist gegeben als,*

$$\boxed{F_{\text{A}} = \varrho_l g V_{\text{K}}.}$$

Es ist sehr wichtig zu beachten, dass der Auftrieb nur von der Dichte des Fluids und dem Volumen des Körpers abhängig ist. Lösen wir gleich ein Beispiel zum Auftrieb.

Bsp. ix.
Die Bestimmung der Dichte von beliebigen Körpern. Ein Körper wird durch eine Federwaage sowohl im Wasser als auch ausserhalb gemessen. Im Wasser zeigt die Waage 6.3 N an der Luft 10 N. Bestimmen Sie a) das Volumen und b) die Dichte des Körpers.

Lsg: a) $V_{\text{K}} \approx 3.7 \cdot 10^{-4}\,\text{m}^3$, b) $\varrho_{\text{K}} \approx 2.7 \cdot 10^3\,\text{kg/m}^3$

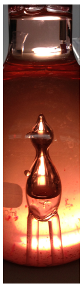
Lösung:

Immer wieder zum Grübeln regt das folgende Experiment an, dass den Namen von Descartes[10] erhalten hat.

Exp. 11: Kartesischer Taucher
Der Kartesische Taucher ist ein kleiner nach unten offener Körper, der in einer Flüssigkeit schwimmt

[10]René Descartes (31. März 1596 in La Haye en Touraine - 11. Februar 1650 in Stockholm) war ein französischer Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler.

(siehe linke Abbildung). Dabei ist es wichtig, dass im Körper sowohl Wasser als auch Luft ist. Unser Körper ist ein Glasmännchen mit einem Loch im Fuss (siehe rechte Abbildung). Das Loch im Fuss führt dazu, dass der Taucher sich beim Auftauchen dreht.

Wenn man die Flasche zusammendrückt, beginnt der Taucher zu sinken. Die Antwort darauf kann auf dem Aufgabenblatt oder in einer der kommenden Prüfungen gegeben werden.

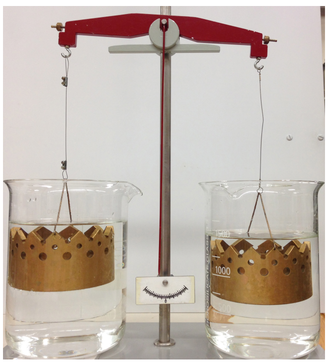
Archimedes[11] gilt als Entdecker der Auftriebskraft und der Legende nach soll sich das wie folgt abgespielt haben. Berühmt ist eine vom römischen Architekten Vitruvius überlieferte Legende, aus [20]:

König Hero von Syrakus liess eine goldene Krone als Weihgabe für die Götter anfertigen. Dazu erteilte er einem Goldschmied den Auftrag, diese Krone aus reinem Gold herzustellen, und händigte ihm die dafür erforderliche Menge des Edelmetalls aus. Die fertige Krone befriedigte ihn auch, es kam ihm aber der Verdacht, der Goldschmied könnte einen Teil des Goldes durch Silber ersetzt haben, und er erteilte Archimedes den Auftrag, dies zu überprüfen, ohne die Krone zu zerstören. Beim Baden in einer Wanne bemerkte Archimedes, dass beim Tauchen Wasser über den Wannenrand lief. Diese Beobachtung brachte ihn auf die Lösung des Kronen-Problems; der Legende nach habe er sich darüber so gefreut, dass er nackt durch die Strassen von Syrakus zum König gelaufen sei und laut „heureka“ gerufen habe.

Ähnlich wird diese Geschichte auch von Herrn Cooper erklärt, wie dieses Video zeigt: TBBT - Archimedes.

Aus historischer Sicht gibt es jedoch einige Zweifel an dieser Geschichte. Der wohl stärkste Zweifel ist, dass Archimedes für seine hohe Präzision bekannt war. Wenn man die Menge des überlaufenden Wassers berechnet, stellt man fest, dass der Unterschied sehr klein und kaum genau messbar war. Aus diesem Grund wird Archimedes höchstwahrscheinlich ein anderes Experiment vorgeschlagen haben, das ihm näher lag. Dieses Experiment werden wir nun gemeinsam besprechen.

Exp. 12: Krone von Hero
Durch die Verwendung der Balkenwaage und des Wasserbeckens nutzt dieses Experiment zwei von Archimedes entdeckte und bis heute gültige Gesetze (siehe Abbildung).



Da die Balkenwaage nach rechts kippt, bedeutet dies, dass die rechte Krone weniger Auftrieb erhält und somit die resultierende Kraft grösser ist.

An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen und zu zeigen, dass der Auftrieb kein Phänomen des Wassers ist. Jedes Fluidum führt zu einer Auftriebskraft, wie das folgende Experiment zeigt.

[11] Archimedes von Syrakus (287 v. Chr. vermutlich in Syrakus auf Sizilien - 212 v. Chr. ebenda) war ein antiker griechischer Mathematiker, Physiker und Ingenieur. Er gilt als einer der bedeutendsten Mathematiker der Antike. Seine Werke waren auch noch im 16. und 17. Jahrhundert bei der Entwicklung der höheren Analysis von Bedeutung.

Exp. 13: Auftrieb unter Vakuumglocke
Eine geschlossene Glaskugel wird an eine Balkenwaage gehängt und unter eine Vakuumglocke gelegt (siehe Abbildung). Lösen Sie den folgenden Clicker: Clicker-Vakuumglocke

Wenn man nun die Luft aus der Glocke pumpt, scheint die Glaskugel schwerer zu werden. Der Grund dafür ist offensichtlich. Durch das Abpumpen verringert sich die Dichte der umgebenden Luft und somit auch der Auftrieb. Die Gewichtskraft, die auf die Kugel wirkt, bleibt jedoch gleich.

Im PoL-Semester 2011 an der Kantonsschule Zürich Unterland (KZU) wurde ein Zeppelin gebaut, der mit Helium geflogen ist (vgl. Video: poL-Zeppelin). Wir betrachten folgendes Beispiel, wobei ein bemannter Zeppelin berücksichtigt werden soll.

Bsp. x.
Der im Bild [25] dargestellte Zeppelin enthält ungefähr $5.4 \cdot 10^3\,\mathrm{m}^3$ Helium ($\varrho_{\mathrm{He}} = 0.179\,\mathrm{kg/m}^3$).

Bestimme das Gewicht, das der Zeppelin samt Ladung haben darf, wenn er sich in einer Höhe befindet, bei der die Luftdichte $\varrho_{\mathrm{L}} = 1.20\,\mathrm{kg/m}^3$ ist und er auf dieser Höhe bleiben möchte. Lsg: 5.5 Tonnen

Lösung:

Nun können wir uns überlegen, warum manche Objekte sinken und andere schwimmen, ohne dabei auf komplexe Sätze oder übermässiges Fachwissen zurückzugreifen. In diesem Abschnitt wird das erläutert.

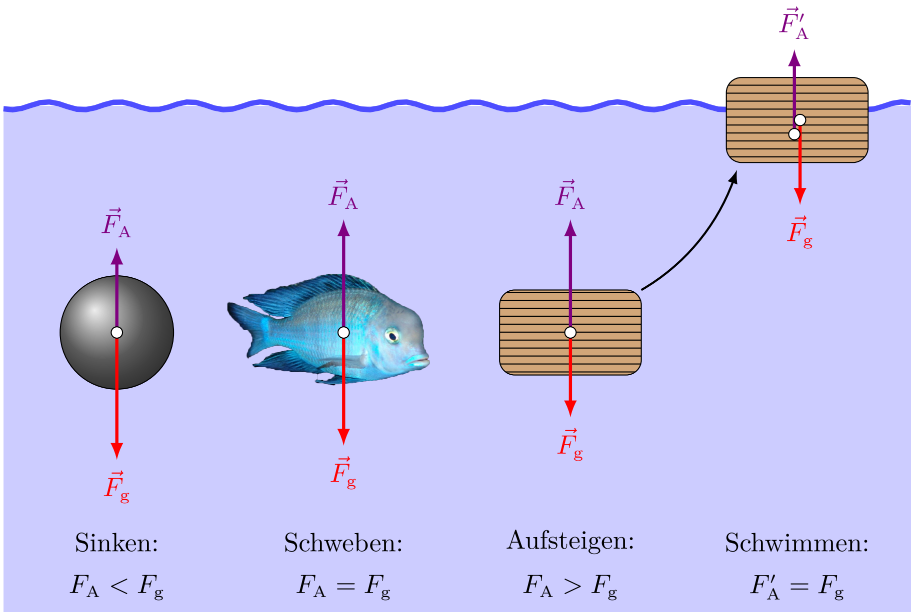
1.3.2 Sinken, Schweben und Schwimmen

Ein bekanntes Phänomen ist, dass einige Körper schwimmen, andere sinken und die meisten Wasserlebewesen schweben. Doch was genau ist dafür verantwortlich? Wir betrachten dazu folgenden Versuch.

Exp. 14: Sinken und Schwimmen
In einen mit Wasser gefüllten Behälter werden drei verschiedene Kugeln platziert: ein Tischtennisball, eine Metallkugel und ein Squashball (vgl. Abbildung).

Obwohl der Squashball und der Tischtennisball in Wasser schwimmen, dringen sie unterschiedlich tief ein. Die Metallkugel hingegen sinkt trotz ihrer Grösse, die etwa der Grösse der anderen Kugeln entspricht. Woran liegt das? Bevor wir diese Frage beantworten, werfen Sie einen Blick auf Folgendes: Clicker zu Sinken oder Schwimmen.

Betrachten wir dazu diese Situation. Eine Eisenkugel, ein Wasserlebewesen und ein Holzklotz treiben im Wasser. Dabei ergibt sich folgendes Bild:



Nun betrachten wir diese drei Fälle[12], wobei sich der Zusammenhang bereits nach der ersten Rechnung für die restlichen ergibt.

Sinken: $F_A < F_g \Leftrightarrow \varrho_l g V_K < \varrho_K g V_K \quad \Rightarrow \quad \varrho_l < \varrho_K$.
Der Körper sinkt im Medium ab, falls die Dichte des Körpers grösser ist als die Dichte des Mediums.

Schweben: $F_A = F_g \quad \Rightarrow \quad \varrho_l = \varrho_K$.
Der Körper schwebt im Medium, falls die Dichte des Körpers gleich der Dichte des Mediums ist.

Aufsteigen: $F_A > F_g \quad \Rightarrow \quad \varrho_l > \varrho_K$.

[12] Aufsteigen und Schwimmen gehört zusammen.

Der Körper steigt im Medium auf, falls die Dichte des Körpers kleiner ist, als die Dichte des Mediums.

Schwimmen: $F'_\mathrm{A} = F_\mathrm{g} \Leftrightarrow \varrho_\mathrm{l} g V'_\mathrm{K} = \varrho_\mathrm{K} g V_\mathrm{K} \quad \Rightarrow \quad \frac{\varrho_\mathrm{K}}{\varrho_\mathrm{l}} = \frac{V'_\mathrm{K}}{V_\mathrm{K}}$
Ein Körper schwimmt, da der Körper so weit in das Wasser eintaucht, bis die reduzierte Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft ist.

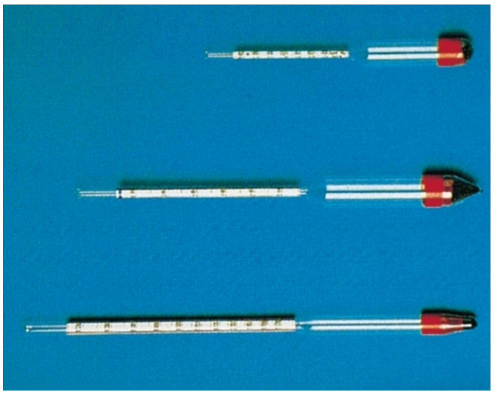
Beachten Sie, dass das Volumen V'_K lediglich dem eingetauchten Volumen entspricht. Dazu ein einfaches Beispiel:

Bsp. xi.
Ein Holzklotz schwimme so im Wasser, dass die Hälfte des Klotzes eingetaucht ist. Bestimmen Sie die Dichte des Klotzes. Lsg: $\varrho_\mathrm{K} \approx 500\,\mathrm{kg/m^3}$

Lösung:

Eine praktische Anwendung der zuvor hergeleiteten Beziehung ist das Aräometer[13]. Betrachten wir dazu folgendes Beispiel:

Bsp. xii.
Taucht man ein dünnes, unten geschlossenes und mit Bleischrot gefülltes zylinderförmiges Röhrchen in eine Flüssigkeit, so sinkt das Röhrchen bis zur Gleichgewichtslage ein. (vgl. Abb. aus [27])

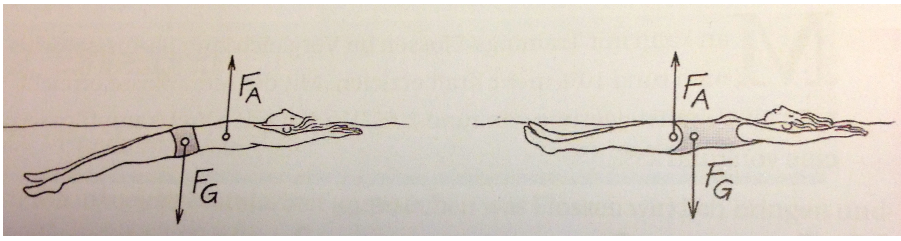


Leiten Sie die Dichte ϱ_l der unbekannten Flüssigkeit in Abhängigkeit der Eintauchtiefe h, des Durchmessers d und der Masse m eines Aräometers, wie er z. B. abgebildet ist, her. Lsg: –

Lösung:

[13] Wortherkunft von Aräometer: griechisch araiós „dünn“ und métron „Mass, Massstab“.

Eine letzte Anwendung, die noch erwähnt werden sollte, betrifft eine Schwierigkeit, die den meisten männlichen Lesern bekannt sein dürfte: Die Entspannung im Wasser fällt Männern schwerer als Frauen. Der Grund dafür wird im Folgenden Bild aus [28] sehr gut erklärt.



Die Gewichtskraft wirkt am Schwerpunkt, während die Auftriebskraft am Volumenmittelpunkt ansetzt. Wenn der Schwerpunkt weiter hinten als der Volumenmittelpunkt liegt, sinken die Füsse ab, was insbesondere bei Männern der Fall ist. Liegt der Schwerpunkt jedoch weiter vorne als der Volumenmittelpunkt, ist die Wasserlage einfacher zu stabilisieren, was vor allem bei Frauen zutrifft.

Zusammenfassung Kapitel D1

1. Die Definition des *Drucks* p ist gegeben als Verhältnis aus der Kraft F und der Fläche A, d. h.

$$p = \frac{F}{A}.$$

2. In einer inkompressiblen Flüssigkeit ist der Druck im Innern stets konstant und daraus folgt, dass auf zwei Flächen A_1 und A_2 mit den Kräften F_1 und F_2:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

gilt.

3. Die *Goldene Regel der Mechanik* lautet, dass was man an Kraft spart, muss man an Weg zusetzen.

4. Der *Schweredruck* p_S in einer Flüssigkeit folgt dem Pascalschen Gesetz, welches besagt, dass der Druck lediglich von der Tiefe h, der Dichte ϱ_l und der Fallbeschleunigung g abhängt, d. h.

$$p_\mathrm{S}(h) = \varrho_\mathrm{l} g h.$$

5. Da die Luft stark komprimierbar ist, gilt das Pascalsche Gesetz für den Schweredruck nicht. Für die Luft gilt die *Barometrische Höhenformel*, welche die Abhängigkeit des Luftdrucks $p_0(h)$ von der Höhenänderung Δh beschreibt, d. h.

$$p_0(h_1) = p_0(h_0) e^{-\Delta h / h_\mathrm{S}},$$

wobei h_S als Skalenhöhe definiert wird und etwa 8.4 km bei 15°C entspricht.

6. Das *Archimedische Prinzip* lautet, dass der Betrag des Auftriebs eines Körpers in einem Fluidum gleich dem Gewicht des verdrängten Fluidums ist.

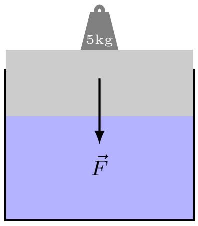
7. Die *Auftriebskraft* oder kurz der Auftrieb eines Körpers mit dem Volumen V_K in einem Fluidum der Dichte ϱ_l ist gegeben als,

$$F_\mathrm{A} = \varrho_\mathrm{l} g V_\mathrm{K}.$$

8. Körper *sinken*, wenn ihre Dichte grösser, *schweben*, wenn ihre Dichte gleich und *schwimmen*, wenn ihre Dichte kleiner ist als die Dichte der Flüssigkeit.

Konzeptfragen Kapitel D1

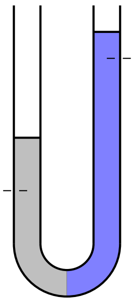
1. Auf die Flüssigkeit wird von oben durch den Stempel und das zusätzliche Gewicht eine Kraft nach unten ausgeübt.



Hat der Druck in der Flüssigkeit eine Richtung?

- ☐ Der Druck ist eine nach allen Seiten gerichtete Grösse.
- ☐ Der Druck ist eine ungerichtete Grösse.
- ☐ Der Druck ist in der Flüssigkeit nach unten gerichtet.
- ☐ Die durch den Druck auf die Oberfläche hervorgerufene Kraft erhält ihre Richtung erst durch die Oberflächenschicht.

2. Gegeben sei ein U-Rohr, welches zwei unterschiedliche Flüssigkeiten enthält. Im linken Teil des Rohrs ist Quecksilber im rechten Teil des Rohrs Wasser. Quecksilber hat eine höhere Dichte als Wasser.



Welche der folgenden Aussagen müssen zwingend richtig sein, sofern sich das System im Gleichgewicht befindet.

- ☐ Der Druck auf der linken Seite des U-Rohrs ist grösser als der Druck auf der rechten Seite des U-Rohrs.
- ☐ Der Druck auf der linken Seite des U-Rohrs ist kleiner als der Druck auf der rechten Seite des U-Rohrs.
- ☐ Der Druck auf der linken Seite des U-Rohrs und der Druck auf der rechten Seite des U-Rohrs sind gleich.
- ☐ Stellt man das U-Rohr unter eine Vakuum-Glocke, so würde sich die Grenzen den Flüssigkeiten verschieben.

3. Ein Holzbrett schwimmt in einem mit Wasser gefüllten Gefäss. Auf dem Holzbrett befindet sich ein Stein. Nun rutscht der Stein vom Brett und sinkt auf den Boden des Gefässes. Was ist richtig?

- ☐ Der Wasserspiegel im Gefäss ändert sich nicht.
- ☐ Der Wasserspiegel im Gefäss fällt.
- ☐ Der Wasserspiegel im Gefäss steigt.

4. Ein Boot schwimmt in einem See. Da es geregnet hatte, ist es halb voll Wasser. Wie ändert sich der Seepegel (Wasserstand des Sees) theoretisch, wenn man das Boot auspumpt und das ausgepumpte Wasser in den See fliesst?

- ☐ Der Seepegel ändert sich nicht.
- ☐ Der Seepegel fällt.
- ☐ Der Seepegel steigt.

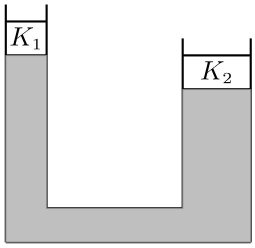
Aufgaben Kapitel D1

Weitere einfachere Aufgaben mit ausführlichen Lösungen findet man unter:
https://www.dropbox.com/sh/m9vlo6gwqli3nds/AABWhKMXUJG70jsXx7ovB-fDa?dl=0 im Kapitel 13.

1. In der Skihütte auf dem Corviglia in St. Moritz bestellt Giulia einen Café crème. Ihr Freund David bemerkt, dass der Deckel des Rahmdöschens stark gewölbt ist, so als ob das Döschen demnächst platzen würde. Beim Öffnen des Deckels spritzt sogar etwas Rahm heraus. Giulia erklärt Ihrem Freund David die Ursache dieses Phänomens. Wie könnte Giulia ihrem Freund die Wölbung erklärt haben? (Angenommen Giulia versteht dieses Phänomen.)

Lsg: –

2. Der Kolben 1 wird durch einen Druck p extern um die Distanz Δh_1 in den Behälter hinein gedrückt. Der Kolben 1 habe eine Fläche $A_1 = 1\,\mathrm{cm}^2$ und der Kolben 2 eine Fläche $A_2 = 10\,\mathrm{cm}^2$.



a. Wie gross ist die Kraft F_2, die am Kolben 2 entsteht, wenn am Kolben 1 eine Kraft $F_1 = 20\,\mathrm{N}$ angreift?

b. Welche Arbeit W_2 wird am Kolben 2 verrichtet, wenn Kolben 1 um $2\,\mathrm{cm}$ eingedrückt wird?

Lsg: **a.** $F_2 \approx 200\,\mathrm{N}$ **b.** $W_2 = -0.4\,\mathrm{J}$

3. Ein versunkenes Boot ($m_\mathrm{B} = 1600\,\mathrm{kg}$) soll mithilfe von Ping-Pong-Bällen ($V_\mathrm{pp} \approx 30\,\mathrm{cm}^3$) wieder an die Wasseroberfläche gehoben werden. (Vernachlässigen Sie die Masse der Ping-Pong Bälle und den Auftrieb des Bootes.)

a. Wie viele Ping-Pong-Bälle sind nötig?

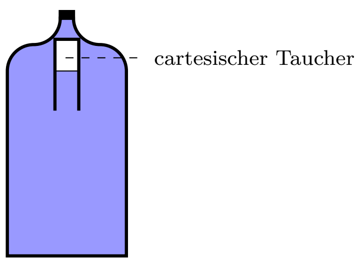
b. Die Mythbusters haben dies selbst versucht und haben mit gleich vielen Ping-Pong-Bälle gerechnet. Am Ende haben sie nur die Hälfte gebraucht. Was denken Sie, weshalb?

Lsg: **a.** $n > 53000$ **b.** –

4. Ein Ballon (vernachlässigbarer Masse) werde mit $500\,\mathrm{g}$ Quecksilber gefüllt. Bestimmen Sie die Luftmenge, welche Sie noch in den Ballon füllen müssen, damit er im Wasser zu schweben beginnt. ($\varrho_\mathrm{Hg} = 13.6 \cdot 10^3\,\mathrm{kg/m^3}$, $\varrho_\mathrm{W} = 998\,\mathrm{kg/m^3}$, $\varrho_\mathrm{L} = 1.30\,\mathrm{kg/m^3}$)

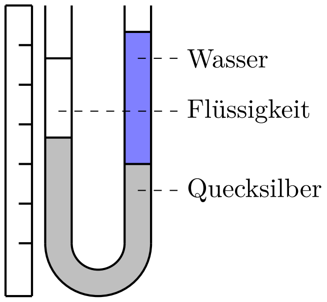
Lsg: $V_\mathrm{L} \approx 465\,\mathrm{cm}^3$

5. In einer verformbaren, verschlossenen und bis zum Rand mit Wasser gefüllten Flasche schwimmt ein Taucher mit der Form eines offenen Quaders (vgl. Abb.), wobei die Öffnung nach unten zeigt. Dieser Taucher ist im Grundzustand zum einen mit Wasser und zum anderen mit Luft gefüllt. Nun wird die Flasche zusammengedrückt (vgl. Anschauungsexperiment). Beschreiben Sie detailliert was passiert und begründen Sie wenn möglich mit physikalischen Gesetzen.



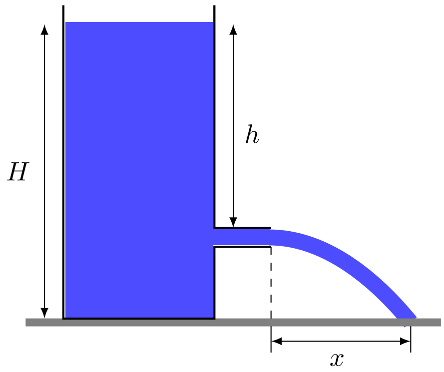
Lsg: –

6. Mit der abgebildeten Vorrichtung kann die Dichte einer unbekannten Flüssigkeit bestimmt werden. Die Positionen der verschiedenen Flüssigkeitsspiegel werden am Masstab abgelesen. Die Werte - von oben nach unten - sind: 567.3 mm, 409.7 mm, 140.4 mm und 123.4 mm. Die Dichten von Wasser und Quecksilber sind bekannt. Wie gross ist die Dichte der Flüssigkeit im linken Teil des Gefässes?



Lsg: $\varrho_x \approx 787\,\mathrm{kg/m^3}$, also Ethanol

7. Berechnen Sie für die Grössen in der Abbildung die Spritzweite x. (Tipp: Berechnen Sie zuerst die Austrittsgeschwindigkeit v_0 des Wassers und vernachlässigen Sie die Veränderung der Wasserhöhe.)



Lsg: $x = 2\sqrt{h(H-h)}$

Literaturverzeichnis

[1] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter, Juni 2012

[2] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales_Einheitensystem, Juni 2012

[3] Wikipetzi, IngenieroLoco - Eigenes Werk. Based on File: Relations between new SI units definitions.png, CC BY-SA 4.0, URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40278935

[4] CMS Collaboration, *Combination of results on the rare decays* $B^0_{(s)}\mathrm{t}\mu^+\mu^-$ *from the CMS and LHCb experiments*, CMS-PAS-BPH-13-007

[5] Aoyama, Tatsumi and Hayakawa, Masashi and Kinoshita, Toichiro and Nio, Makiko, *Tenth-Order QED Contribution to the Electron* $g-2$ *and an Improved Value of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. Vol. 109, 2012, 10.1103/PhysRevLett.109.111807

[6] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Steradiant, Juni 2012

[7] Aristoteles,

[8] Galileo Galilei, *De motu*, 1590

[9] DMK/DPK, *Formeln und Tafeln*, Orell Füssli, 7. Auflage, 1997

[10] F. A. Brockhaus, *Der grosse Brockhaus*, 16. Auflage, 1955

[11] URL: http://www.quartets.de/acad/firstlaw.html, September 2013

[12] URL: http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/me/kreis/index

[13] Lewis C. Epstein, *Denksport Physik*, dtv, 9. Auflage, 2011

[14] Harry Nussbaumer, *Astronomie*, 7. Auflage, 1999, vdf Hochschulverlag AG

[15] URL: http://lexikon.astronomie.info/mars/beobachtung2012/, April 2013

[16] Matthias Bartelmann, *Das Standardmodell der Kosmologie, Teil 1 und Teil 2 in Sterne und Weltraum*, Ausgabe: August 2007

[17] Roman Sexl et al. *Einführung in die Physik - Band 1 & 2*, 3. korrigierte Auflage 2009, Sauerländer Verlag AG

[18] Paul A. Tipler, *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford, 2. Auflage, 1994

[19] URL: https://www.etsy.com/ch/listing/1230366346/precision-made-scientific-mechanical

[20] Hans Kammer, Irma Mgeladze, *Physik für Mittelschulen*, 1. Auflage 2010, hep Verlag AG

[21] URL: https://www.auto-motor-und-sport.de/news/aerodynamik-report-spritsparmodelle-aus-dem-windkanal

[22] Wikipedia, URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Fluid, August 2013

[23] Basiswissen Schule Physik, Duden Paetec, Berlin 2010

[24] URL: http://www.schulserver.hessen.de/, Oktober 2013

[25] URL: http://www.leifiphysik.de, September 2013

[26] URL: http://photos.zoochat.com, Semptember 2013

[27] URL: http://www.lab-laborfachhandel.de, Oktober 2013

[28] Bissig Michael, *Schwimmwelt, Schwimmen lernen - Schwimmtechnik optimieren*, Schulverlag, Bern,

[29] URL: https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_282/auto/kap09/cd259.htm, März 2014

[30] URL: https://www.vibos.de/veranstaltung/physik-teil-3-von-4-schwingungen-und-wellen, März 2024

[31] URL: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/707

[32] E.F.F. Chladni, *Die Akustik*, Taschenbuch Auflage 2012, Nabu Press

[33] URL: http://ephex.phys.ethz.ch, Februar 2015

[34] URL: http://aufzurwahrheit.com/physik/quantenmechanik-5461.html, März 2015

[35] M. Cagnet, M. Françon, J.C. Thierr, *Atlas opitscher Erscheinungen*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1962

[36] Bruno Cappeli et al. *Physik anwenden und verstehen*, Orell Füssli Verlag AG, 2004

[37] Richard P. Feynman, *QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, Piper, 3. Auflage, 2018

[38] Keith Johnson, *Physics for You: Revised National Curriculum Edition of GCSE*, Nelson Thornes, 2001

[39] URL: https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/TA.pdf?lang=en, Juli 2018

[40] Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1998

[41] Unbekannt, *Engraving of Joule's apparatus for measuring the mechanical equivalent of heat*, Harper's New Monthly Magazine, No. 231, August, 1869

[42] URL: http://www.tf.uni-kiel.de, März 2014

[43] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_(Thermodynamik), März 2014

[44] URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20070616_Dampfmaschine.jpg, März 2014

[45] URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Bcoulomb.png, März 2014

[46] URL: http://www.bader-frankfurt.de/widerstandscode.htm, August 2014

[47] Carl D. Anderson, *The Positive Electron*. Physical Review 43 (6): 491–494

[48] URL: http://pgd5.physik.hu-berlin.de/elektrostatik/ele12.htm, Oktober 2014

[49] URL: http://www.aip.org/history/lawrence/radlab.htm, Oktober 2014

[50] URL: http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_besch/exp_besch_04.html, Oktober 2014

[51] URL: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6639, Oktober 2017

[52] URL: https://de.serlo.org/52586/elektromagnetische-wellen, Oktober 2017

[53] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum, August 2022

[54] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Zahnradmethode, September 2022

[55] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-Rainbow.jpg, November 2023

[56] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Regenbogen, April 2024

[57] Proton-Proton Kollision, CERN, Lucas Taylor

[58] Ze'ev Rosenkranz, *Albert Einstein – Derrière l'image*, Verlag Neue Zürcher Zeitung, 2005.

[59] Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik 17 (10): 891–921.

[60] Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Springer-Verlag, 23. Auflage, 1988

[61] Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Relativität_der_Gleichzeitigkeit, August 2018

[62] URL: http://static.a-z.ch, März 2015

[63] Max Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, Naturwissenschaften Band 13, 1925

[64] A. H. Compton, *The Spectrum of Scattered X-Rays*, Physical Review 22 (5 1923), S. 409–413

[65] URL: http://www.peter-glowatzki.de, Mai 2015

[66] James Franck, *Transformation of Kinetic Energy of Free Electrons into Excitation Energy of Atoms by Impacts*, Nobel Lectures, Physics 1922-1941

[67] URL: http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche, Mai 2015

[68] David Prutchi, Shanni Prutchi, *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects*, Wiley, 1 edition (February 7, 2012)

[69] URL: http://w3.pppl.gov/, September 2015

[70] O. Höfling, Physik. Band II Teil 1, Mechanik, Wärme. 15. Auflage. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1994

[71] Kovalente Atomradien auf Basis der Cambridge Structural Database
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge_Structural_Database, April 2018

[72] G. Audi und A.H. Wapstra, Nuclear Physics A595, 409 (1995)

[73] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung, April 2018

[74] URL: http://www.wn.de/Muenster/2012/07/Das-Wunder-von..., Juni 2012

[75] L. Susskind und G. Hrabovsky, The Theoretical Minimum - What you need to know to start doing physics, Basic Books, 2014