

Unterlagen für den Unterricht — nach einem Besuch des Vakuumlabors am PSI



Autoren

Franz Theiler

Professur Naturwissenschaftsdidaktik
und ihre Disziplinen, PH FHNW

Matthias von Arx

Zentrum Naturwissenschafts- und
Technikdidaktik der PH FHNW

Finanzierung

Departement Bildung, Kultur
und Sport des Kantons Aargau,
Paul Scherrer Institut

Juli 2025

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Vorschläge für die Umsetzung im Unterricht	6
2.1. Einfache Methoden zur Erzeugung eines Vakuums	7
2.2. Druckmessgeräte	8
2.3. Grundsätzliches zum Thema Druck	10
2.4. Luftdruck: Ursache und Wirkung	12
2.5. Starke Kräfte dank Druckunterschied	14
2.6. Hydrostatischer Druck	15
2.7. Dichte und Auftrieb	18
2.8. Verdampfen und Kondensieren	19
3. Didaktische und methodische Hinweise	20
3.1. Evidenzen sammeln	20
3.2. Arbeiten im Tischteam	20
3.3. Experimentieren im Tischteam	22
3.4. Experimente für Schulterpaare im Tischteam	22
3.5. Die Methode «GiveOne – GetOne»	22
3.6. Begriffsnetz	23
3.7. Schreiben einer Versuchsanleitung	23
3.8. Lernen an einer Station	23
3.9. Demonstrationsversuch	23
3.10. Ein Forschungsvorhaben	24
3.11. Projekte	24
3.12. Ausserschulische Lernorte	24
4. Theoretische Grundlagen und Hintergrund-Informationen	25
4.1. Zum Begriff des Vakuum	25
4.2. Aus der Geschichte	25
4.3. Vakuum in Alltag, Forschung und Technik	26
4.4. Erzeugung eines Vakuums, Pumpentypen	27
4.5. Druckmessung und Druckeinheiten	30
4.6. Druck allgemein	32
4.7. Druck und Teilchenmodell	34
4.7.1. Druck in Gasen	34
4.7.2. Druck in Flüssigkeiten	42
4.8. Luftdruck	43
4.9. Auftrieb	45
5. Literaturverzeichnis	47

1. Einleitung

Das Vakuum, also der leere Raum, hat in der Geschichte auf viele Leute eine besondere Faszination ausgeübt. Sowohl Philosophen als auch Naturwissenschaftler haben sich intensiv mit der Frage nach der Möglichkeit des «absolut Leeren», des «Nichts», also des Vakuums beschäftigt. Auch bei vielen Schülerinnen und Schülern löst die Vorstellung des Vakuums einen magischen Zauber aus. Bekannt sind bei Schülerinnen und Schülern in Bezug auf das Vakuum je nach Erlebnis- und Wissenshintergrund Präkonzepte wie:

- Leere darf nicht sein, also saugt ein Vakuum Luft an (horror vacui).
- Der Weltraum ist luftleer, also sind die Dinge dort schwerelos.
- Zwischen dem Druck als Zustandsgrösse und Druckkräften wird nicht differenziert.
- Statische Kräfte in einem ruhenden Fluid werden nicht als solche wahrgenommen.

Die Experimente im iLab verfolgen deshalb zwei Ziele. Durch die Auswahl geeigneter Experimente soll bei Schülerinnen und Schülern – heraus aus der Faszination der Phänomene – die Bereitschaft zur intensiven Auseinandersetzung mit dem Thema gefördert werden. Gleichzeitig sollen die Experimente allenfalls vorhandene Widersprüche präkonzeptueller Erklärungen der Schüler und Schülerinnen aufzeigen und zur Reflexion anregen. Damit werden optimale Voraussetzungen zur Umdeutung von ev. vorhandenen Fehlvorstellungen zu einer physikalisch korrekt(er)en Beschreibung der Phänomene geschaffen.

Der Besuch im Vakuumlabor kann zu diesem Prozess nur den Anstoss liefern. Um den Schülerinnen und Schülern zu ermöglichen, ihre Vorstellungen nachhaltig weiterzuentwickeln, braucht es eine längerfristige Auseinandersetzung mit dem Thema. Die Materialien des vorliegenden Berichtes sollen dazu anregen, die **Themen Vakuum und Druck nach einem Besuch im iLab des PSI im Unterricht aufzugreifen und weiter zu verfolgen**. Im Kapitel 2 sind Versuche, Aufgaben und Projekte für den Unterricht aufgeführt. Die Beschreibungen respektive Anleitungen richten sich in der Regel direkt **an die Lernenden**. Im Kapitel 3 finden sich Vorschläge zur methodischen Umsetzung und im Kapitel 4 werden die dazugehörige Theorie und weitere Hintergrundinformationen dargestellt. Diese Inhalte richten sich **an die Lehrperson** und sollen bei der Planung, Vorbereitung und Entwicklung des Unterrichts helfen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit diesem Heft zu arbeiten. Je nach Ansatz, Vorlieben und Zeit, die für eine Unterrichtseinheit oder -sequenz zur Verfügung steht, lassen sich Teile davon beliebig herausgreifen und im Unterricht anwenden. Aus diesem Grund weist der Inhalt absichtlich einzelne Redundanzen auf.

2. Vorschläge für die Umsetzung im Unterricht

Vorangestellt A

Für viele Schalexperimente genügt eine in den meisten Sammlungen vorhandene Handpumpe. Wichtig dabei ist die Verwendung von hartwandigen Vakuumschläuchen. Empfohlen werden kann die Verwendung eines Mehrweghahns.

Einige Phänomene lassen sich ganz gut auch mit einer Wasserstrahlpumpe zeigen.



Vorangestellt B

Die in der Folge aufgeführten Aufgaben, Experimente, Projekte, etc. weisen ein internes Raster auf. Die Rubrik «Beschreibung» richtet sich – ausser bei Demonstrationsexperimenten – **an die Lernenden** und kann bei Bedarf direkt in die Unterrichtssituation übertragen werden. Die Rubriken «Material», «Theorie», «Methode» und «besondere Hinweise» richten sich **an die Lehrperson**. Welches Material muss bereitgestellt werden? Wo findet man Theorie und Hintergrundwissen zum Versuch? Wie funktioniert die vorgeschlagene Methode? Was muss sonst noch beachtet werden? Fragen dieser Art werden durch diese Rubriken direkt oder durch Querverweise in die Kapitel 3 und 4 beantwortet.

Darüber hinaus sind jeweils mehrere Aufgaben, Experimente, Projekte, etc. unter einer Überschrift **zu kleineren Gruppen zusammengefasst**. Diese Gruppen sind zum Teil thematisch strukturiert, zum Teil besteht ein theoretischer Zusammenhang, oder es wird dabei verwandtes Material verwendet. Die Gruppierungen könnten durchaus auch anders vorgenommen werden. Wir glauben jedoch, dass die Gruppierung bei der Arbeit mit diesem Bericht und bei der Planung des Unterrichts hilfreich sein kann.

2.1. Einfache Methoden zur Erzeugung eines Vakuums

a) Von der Luft- zur Vakuumpumpe

- Beschreibung:** Untersuche die Fahrradpumpe. Benenne die einzelnen Teile und studiere ihre Funktion. Erstelle eine Funktionsskizze von der Pumpe und ihren Einzelteilen. Beachte auch die Materialwahl. Untersuche den Maximaldruck, den du mit dieser Luftpumpe aufbauen kannst. Wodurch ist er begrenzt?
Überlege dir, wie du die Luftpumpe als Vakuumpumpe verwenden könntest. Erstelle einen Konstruktionsplan und eine Materialliste. Baue die Pumpe um und versuche dann, einen Dampftopf zu evakuieren. Dokumentiere deine Arbeit mit einem Arbeitsjournal (Fotos dazu machen).
- Material:** Einfache, zerlegbare Fahrradpumpe (evtl. unterschiedliche Typen). Manometer für Pneudruckmessung. Fotoapparat. Dampftopf mit abnehmbarem Ventil. Starkwandige Schlauchstücke. Diverse Materialien und Werkzeuge.
- Theorie:** Kapitel 4.2 und 4.4.
- Methode:** Projekt
- bes. Hinweise:** Dieses Projekt eignet sich in Zusammenarbeit mit dem Technischen Gestalten.

b) Schröpfen

- Beschreibung:**
- Zünde ein kleines zusammengeknülltes Stück eines Papiertaschentuches an und wirf es in ein leeres Trinkglas. Blase die Flamme nach einigen Sekunden aus und verschliese dann die Glasöffnung sofort luftdicht mit einer gut gespannten Haushaltfolie. Was beobachtest du? Giesse Wasser auf die gegen das Glasinnere ausgebeulte Folie. Mit einer Zirkelspitze machst du an der tiefsten Stelle durch das Wasser hindurch ein kleines Loch in die Folie. Was siehst du, wenn du dabei von der Seite durch das Glas schaust? Nach kurzer Zeit stoppt der Wasserfluss durch das Folienloch. Warum?
 - Suche im Internet unter dem Stichwort «Schröpfen». Mache dich kundig über dieses Heilverfahren und seine Geschichte: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schröpfen>. Erkläre das physikalische Prinzip des Verfahrens. Worin besteht der Unterschied zwischen blutigem und trockenem Schröpfen? Was hat a) mit Schröpfen zu tun? Verfasse zusammen mit deinem Team eine kurze Präsentation für die Klasse zum Thema «Das Schröpfen, eine alte Heilmethode». Jedes Teammitglied bearbeitet nach Absprache einen Aspekt des Themas (physikalisch, geschichtlich, medizinisch, heutige Praxis...)
- Material:**
- dünne Haushaltfolie. Trinkglas aus gut durchsichtigem Klarglas. Zirkelspitze, Papiertaschentuch, Zündhölzer.
 - Internetzugang oder Ausdruck einer Seite wie <http://de.wikipedia.org/wiki/Schröpfen>
- Theorie:** Kapitel 4.7.1 und 4.4.
- Methode:** a) Schulterpartner, Teamarbeit: Internetrecherche und Erstellen einer Dokumentation oder einer Präsentation (PPP oder Plakat)
- bes. Hinweise:**
- Durch die Flamme wird die Luft im Glas erhitzt. Nach dem Ausblasen und Abdecken kühlt die Luft ab und Wasserdampf kondensiert. Zur Erzeugung der Flamme kann auch ein vorher mit Brennspritus befeuchteter kleiner Wattebausch verwendet werden.
Wegen der Oberflächenspannung des Wassers fließt nur dann Wasser durch das kleine Folienloch, solange im Glasinnern ein Unterdruck herrscht.
 - Die vorgeschlagene Wikipediaseite ist z.Z. noch unvollständig und schlecht belegt (evtl. thematisieren)!

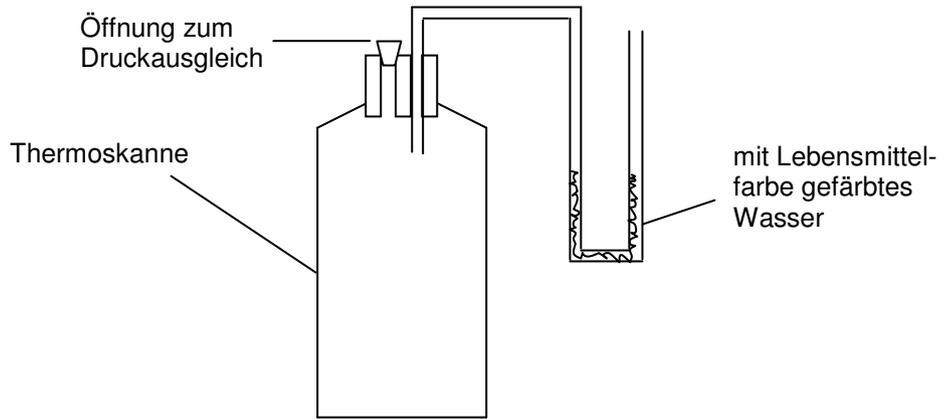
c) Flüssigkeitstransport mit Pipette (Stechheber)

- Beschreibung:** a) Ein auf beiden Seiten offenes Röhrchen kann auf einer Seite mit dem Daumen verschlossen und mit der anderen Seite in gefärbtes Wasser getaucht werden. Versuche mit verschiedenen dicken und unterschiedlich langen Röhrchen (ein «Röhrchen voll») Flüssigkeit in ein leeres Glas zu transportieren. Versuche es jeweils zuerst ohne Ausblasen des Röhrchens. Stoppe, wenn möglich, die Ausflusszeit. Blase erst dann das Röhrchen in ein anderes Gefäß aus. Experimentiere auch mit Alkohol, Salatöl... Entwickle eine Versuchsreihe und dokumentiere sie genau. Beschreibe, was dir auffällt und versuche, Unterschiede zu erklären.
- b) Studiere «<http://de.wikipedia.org/wiki/Pipette>». Beantworte folgende Fragen:
Wozu dienen Pipetten in einem Labor?
Was sind Genauigkeitsklassen bei Pipetten? Worauf kommt es dabei an?
Warum darfst du eine unbekannte Flüssigkeit nicht mit dem Mund in eine Pipette «saugen»? Was kann anstatt des Mundes als Pipettierhilfe dienen? Worauf beruht ihr «Saug»-Prinzip?
Was sind Messpipetten, Vollpipetten, Pasteurpipetten, Wegwerfpipetten?
Vergleiche eine Mikroliterpipette (Kolbenhubpipette) mit einer gewöhnlichen Arzt-spritze (Kolbenprober).
- c) Erkundige dich über den Einsatz von Pipetten in einem chemischen oder medizinischen Labor (evtl. Drogerie, Apotheke, Arztpraxis...) der Umgebung. Vereinbare ein Interview mit einer Fachperson über Pipetten. Bereite das Interview vor (z.B. schriftliche Fragen)! Bearbeite b) als Vorbereitung!
- Material:** a) Glasröhrchen und Trinkhalme verschiedener Dicke, die auf eine gewünschte Länge zugeschnitten werden können. Schere, Glasrohrschneider und Sandpapier zum Abschleifen scharfer Glaskanten.
b) Internetzugang oder Ausdruck der Seite. Wegwerf-Arzt-spritze (ohne Nadel) aus der Apotheke, Falls vorhanden: Kolbenprober, verschiedene Pipettenarten. Für eine Exkursion: Laboradresse.
- Theorie:** Kapitel 4.4 und 4.7.2.
- Methode:** a) Projekt oder Forschungsarbeit im Zweierteam
b) Textarbeit (Textverständnis)
c) Interview oder Exkursion
- bes. Hinweise:** Die Beschäftigung mit Pipetten kann als Einstieg in die Berufsfindung motivierend sein.

2.2. Druckmessgeräte

a) Bau eines einfachen, präzisen Manometers für den Luftdruck

- Beschreibung:** Eine Thermosflasche mit möglichst grossem Volumen wird oben mit einem Gummistopfen verschlossen. Der Gummistopfen hat zwei Bohrungen. In die erste Bohrung wird ein Glasrohr (oder Schlauch) gesteckt, welches (welcher) mit einem U-Rohr verknüpft ist, in die zweite Bohrung passt ein Stopfen, mit welchem die Öffnung bei Bedarf verschlossen werden kann. Es wird darauf geachtet, dass die Thermoskanne gegen aussen gut isoliert ist. In das U-Rohr wird bei geöffneter Druckausgleichöffnung etwas Wasser eingefüllt und fertig ist das Manometer. Überlegt euch, wie das Manometer (Druckmessgerät) funktioniert.



- Material:** Grosse Thermoskanne, Gummistopfen mit zwei Bohrungen, Glasröhrchen oder Schlauch, kleiner Gummistopfen, Wasser, evtl. Isoliermaterial
- Theorie:** Kapitel 4.5; 4.7.1 und 4.8.
- Methode:** Projektarbeit im Team
- bes. Hinweise:** Je grösser das Volumen der Thermoskanne, desto genauer wird das Manometer. Eine gute Wärmeisolierung ist wichtig. Verändert sich die Temperatur der Luft in der Thermoskanne werden Messungen z.T. kräftig verfälscht. Das Manometer kann für eine Vielzahl von Untersuchungen verwendet werden (Höhenabhängigkeit des Luftdrucks, Wetterabhängigkeit des Luftdrucks, etc.). Nicht unbedingt geeignet für Langzeitmessungen!

b) Dosenbarometer

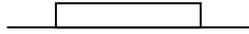
- Beschreibung:** Fülle heisses Wasser in ein leeres Konfitürenglas. Wenn das Glas warm ist, leerst du das Wasser bis auf einen kleinen Rest aus und spannst eine Haushaltfolie über die Glasöffnung. Spanne einen Gummiring über die Folie, damit sie luftdicht abschliesst. Stecke einen Schaslikspiess in eine kleine auf einer Seite abgeflachten Plastilinkugel. Diese legst du mit der flachen Seite so in die Mitte der Folie, dass der Spiess über den Rand des Glases ragt. Stelle die ganze Apparatur in eine kleine Bratpfanne mit kaltem Wasser. Neben das freie über den Rand der Pfanne ragende Ende des Spiesses stellst du mit Hilfe eines Plastilinsockels einen Massstab auf. Merke dir darauf die Stellung des Spiessendes. Erhitze nun langsam das Wasser in der Bratpfanne und beobachte.
- Material:** Konfitürenglas, Schaslikspiess, Plastilin, Haushaltfolie, Bürogummiring, kleine Bratpfanne (oder ein niedriges Becherglas), Heizplatte oder Bunsenbrenner.
- Theorie:** Kapitel 4.5 und 4.7.1.
- Methode:** Teamarbeit
- bes. Hinweise:** Der Versuch zeigt das Prinzip des Dosenbarometers. Angezeigt wird der Druckunterschied zwischen dem Innen- und Aussenraum des Konfitürenglases. Die Stärke der Folienwölbung kann zur Messung von Luftdruckveränderungen gebraucht werden.

2.3. Grundsätzliches zum Thema Druck

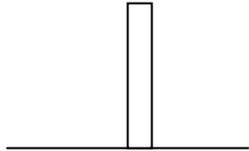
a) Aufgabe: Zustand oder dynamischer Prozess?

Beschreibung: Studiere folgende Situationen genau:

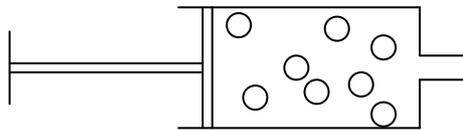
- a) Bauklotz auf Tischoberfläche horizontal



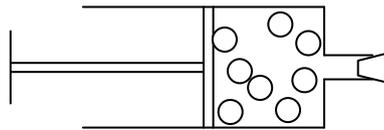
- b) Bauklotz auf Tischoberfläche vertikal



- c) Horizontal liegender, offener Kolbenprober (oder Velopumpe)



- d) Horizontal liegender Kolbenprober (oder Velopumpe) im Moment, in welchem (bei geschlossenem Ausgang!) der Stempel nach innen gedrückt wird.



- e) Aufgeblasener, verschlossener Luftballon.

Versuche mit Hilfe von Pfeilen in den Zeichnungen aufzuzeigen, wo genau welche Kräfte wirken. Der Pfeilanfang wird im Körper gesetzt, an dem die Kraft angreift. Die Richtung des Pfeils gibt dabei an, in welche Richtung die Kraft wirkt und die Länge des Pfeils gibt an, wie stark die Kraft ist. Wo besteht ein statischer Zustand, und wie kann man diesen mit dem Druckbegriff beschreiben? Wo nicht? Nach welchem Kriterium kannst du das entscheiden?

Material: Aufgabenblatt mit Zeichnungen, ev. rechteckiger Bauklotz, Ballon, Kolbenprober oder Velopumpe

Theorie: Kapitel 4.6

Methode: Tischteam oder Schulterpaar

bes. Hinweise: In den Situationen, in welchen sich die Kräfte am gleichen Körper gegenseitig aufheben, hat man einen statischen Gleichgewichtszustand (keine Bewegung). In diesen Situationen ist eine Beschreibung mit dem Druckbegriff zulässig (in den Situationen a) und b) kann der Druck berechnet werden, wenn die Masse des Bauklotzes bekannt ist und die Berührungsflächen mit dem Tisch ausgemessen werden). Bei Beschleunigungsprozessen heben sich die wirkenden Kräfte nicht auf. Zusatzaufgabe: Wieso kann man eine Glasscheibe mit einem Saugnapf anheben? Was hält Saugnapf und Glasscheibe zusammen? Antwort: Der Saugnapf wird durch die Kraft des Luftdrucks festgedrückt! Die Adhäsionskraft ist im Vergleich dazu marginal.

b) Forschungsprojekt: Der Zustand eines Gases

Beschreibung: Auf dem Internet gibt es viele Animationen, bei welchen du beobachten kannst, wie sich Gasteilchen in Abhängigkeit verschiedener Faktoren verhalten. Eine besonders gute Animation findest du unter <http://lernarchiv.bildung.hessen.de/afl/aflphys/29621/index.html>, wenn du auf den Link «Java-Applet zum Teilchenmodell in Gasen» klickst. Experimentiere etwas herum, indem du verschiedene Einstellungen veränderst (du kannst mehr Gasteilchen hineinpumpen oder oben den Deckel öffnen oder links die Wand verschieben oder unten die Temperatur verändern oder die Masse der Gasteilchen verändern). Beobachte wie sich der Druck verändert. Am besten veränderst du eine Einstellung schrittweise, bevor du das gleiche auch mit den anderen Einstellungen tust. Wenn du viele Einstellungen auf einmal veränderst, ist es schwierig zu verstehen, was passiert. Gehe also schön der Reihe nach vor. Notiere auf ein Blatt, welche Veränderungen zu welchen Effekten führen und versuche jeweils eine Erklärung dafür anzugeben (z. B.: Warum steigt der Druck, wenn mehr Teilchen ins Gefäss gegeben werden?) Gib am Ende das Blatt mit deinem Protokoll ab.

Material: PC mit Internetzugang

Theorie: Kapitel 4.7.1.

Methode: Lernen an einer Station

bes. Hinweise: Je nach Umfang der Aufgabenstellung ist der notwendige Zeitaufwand zu beachten. Man kann durchaus auch eine Leistungsbeurteilung aufgrund dieses Auftrags vornehmen.

c) Ballon in der Flasche

Beschreibung: Bohre ein Loch in den Deckel einer 1.5 Liter PET-Flasche und führe ein ca. 30 cm langes Glasrohr hindurch. Achte darauf, dass die Durchführung luftdicht ist. Befestige ebenfalls luftdicht mit Hilfe eines Gummibandes am unteren Ende des Glasrohrs einen kleinen Ballon. Führe nun das Glasrohr mit dem Ballon ins Innere der Flasche und blase den Ballon auf, bis er einen Teil des Flascheninhalts ausfüllt. Verschliesse die Flasche mit dem Deckel und öffne erst jetzt das obere Ende des Glasrohrs (das Ende, das aus der Flasche raus schaut). Was passiert? Beobachte und beschreibe genau! Wie lässt sich die Beobachtung erklären?

Material: 1.5 Liter PET-Flaschen (dickwandig), Glasröhrchen ca. 30 cm lang (Durchmesser 5 mm), kleine Ballone, Bohrer, ev. Leim, Gummibänder.

Theorie: Kapitel 4.6 und 4.8.

Methode: Experiment für Schulterpaare, oder wenn Apparatur schon aufgebaut: Lernen an einer Station

bes. Hinweise: Beim Öffnen des Glasrohres strömt zuerst etwas Luft aus dem Ballon aus. Dadurch entsteht ein Unterdruck im Flascheninnern. Nach kurzer Zeit stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein, bei welchem die Kräfte, die aufgrund des Luftdrucks wirken, die elastischen Kräfte der Ballonhaut kompensieren. Die Grösse des Ballons bleibt stabil.

Es sollte eine dickwandige PET-Flasche verwendet werden, da bei einer dünnwandigen das Risiko besteht, dass die Flasche aufgrund des entstehenden Unterdrucks zusammengedrückt wird.

Wenn man das Loch im Deckel etwas kleiner als den Durchmesser des Glasrohrs bohrt, kann man das Glasrohr erhitzen und durch das Loch führen. Auf diese Weise entsteht eine luftdichte Durchführung. Falls dies nicht gelingt, kann die Durchführung mit Leim abgedichtet werden (Achtung, vor dem Experiment trocknen lassen!)

2.4. Luftdruck: Ursache und Wirkung

a) Gase beanspruchen Raum

- Beschreibung:** Verschliesse einen Erlenmeyerkolben mit einem Korken, der zwei Bohrungen besitzt. In eine Bohrung steckst du einen Trichter, in die andere ein Glasrohr. Auf das Glasrohr stülpst du einen Schlauch, den du mit dem anderen Ende in ein Becken mit Wasser tauchst. Fülle durch den Trichter Wasser in den Erlenmeyerkolben. Was beobachtest du? Erkläre!
- Material:** Erlenmeyerkolben, Korken mit zwei Bohrungen dazu, Trichter, Gefäss mit Wasser, Becken mit Wasser.
- Theorie:** Kapitel 4.7.1.
- Methode:** Demonstrationsexperiment
- bes. Hinweise:** Der Versuch kann als Einstieg vorgeführt werden, um zu zeigen, dass Luft – obwohl komprimierbar – Platz braucht neben dem Wasser.

b) Luftgewicht

- Beschreibung:** Ein Rundkolben (Glaskugel ohne flachen Boden) wird mit einer Wasserstrahlpumpe evakuiert und vor dem Abstellen der Pumpe mit einer Schlauchklemme oder einem Glashahn verschlossen. Lege den Rundkolben auf die eine Seite einer Balkenwaage und bringe diese mit Gewichtsstücken und feinem Tarierschrot (feine Bleikügelchen) oder mit einem Gefäss mit einer entsprechenden Wassermenge ins Gleichgewicht. Lasse dann die Luft in den Kolben zurückfliessen. Was beobachtest du. Versuche den Gewichtsunterschied so genau wie möglich zu bestimmen. Schätze ab, wie viel ein Kubikmeter Luft mindestens wiegt. Das Volumen der Kugel kannst du mit Wasser bestimmen oder mit der Formel für das Kugelvolumen ungefähr berechnen. Bestimme daraus einen ungefähren Wert für die Dichte der Luft und vergleiche ihn mit dem Literaturwert, den du im Internet suchen kannst.
- Material:** Ein echter Rundkolben (ohne ebene Bodenfläche) aus Glas mit Hahnrohr oder Schlauchschelle, Balkenwaage, Gewichtssatz, Tarierschrot (feine Bleikügelchen) oder ein Becherglas mit Wasser, Massstab
- Theorie:** Kapitel 4.8.
- Methode:** Teamarbeit oder Workshopversuch
- bes. Hinweise:** Rundkolben mit flachem Boden können implodieren. Im Zweifelsfall kann der Rundkolben vor dem Evakuieren in einen durchsichtigen Plastikgefrierbeutel gepackt werden. Der Versuch ist mit einer Balkenwaage anschaulicher als mit einer elektronischen Waage. Für genaues Wägen mit Balkenwagen muss das dynamische Verfahren angewendet werden. Dabei schwingt die Waage leicht. Der Messwert ist dann die Mitte zwischen dem Ausschlag links und dem Ausschlag rechts. Geeicht werden kann die Skala der Balkenwaage mit dem Zufügen einer Gramm-masse auf einer der Waagschalen und einer erneuten dynamischen Messung. Wird die Aufgabe offen formuliert, wird von einem Team grosse Selbstständigkeit verlangt. Trotz vielleicht grossem Zeitaufwand kann der Kompetenzgewinn beträchtlich sein.
- 1 Liter Luft wiegt ungefähr 1,2 g (Luftdichte 1,204 kg/m³ bei 20 Grad auf Meereshöhe).

c) Experiment: Das verkehrte Wasserglas

Beschreibung: Fülle ein Glas randvoll mit Wasser. Belege nun das Wasserglas mit einer Postkarte oder einem Bierdeckel. Achte darauf, dass Postkarte oder Bierdeckel nicht viel grösser sind als die Öffnung des Glases. Drücke die Postkarte (Bierdeckel) leicht fest, so dass zwischen Deckel und Wasseroberfläche keine Luft mehr ist. Führe die folgende Manipulation sicherheitshalber über dem Lavabo aus: Wende das Glas vorsichtig, indem du mit der einen Hand das Glas hältst, mit der anderen Hand die Postkarte leicht an das Glas drückst, bis das Glas auf dem Kopf steht (Öffnung mit Postkarte/Bierdeckel nach unten). Entferne nun die Hand von der Postkarte. Was beobachtest du? Erkläre deine Beobachtung.

Material: Glas, Wasser, Postkarte oder Bierdeckel, Lavabo, evtl. Schere.

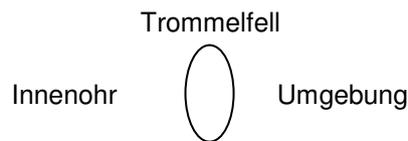
Theorie: Kapitel 4.8 und 4.7.2.

Methode: Experiment für Schulterpaare

bes. Hinweise: Mit dem Wert des Luftdrucks und der Dichte von Wasser kann man ausrechnen wie hoch (tief) das Glas theoretisch sein muss, dass der Deckel durch den Wasserdruck abfällt (9.8 m!)

d) Aufgabe: Seilbahnfahrt

Beschreibung: a) Bei der schnellen Überwindung von grösseren Höhenunterschieden wird das Trommelfell ganz schön verbogen. Überlege, was mit dem Trommelfell bei Tal- bzw. Bergfahrten geschieht. Zeichne die Form, die das Trommelfell in diesen zwei Situationen annimmt, indem du vom Normalzustand ausgehst:



b) Überlege dir, was mit einer leeren PEI-Flasche passiert, wenn man sie nach der Bergwanderung verschlossen mit ins Tal nimmt.

c) Überlege dir, was mit einem Wetterballon passiert, wenn er in 20 bis 30 km Höhe aufsteigt.

Theorie: Kapitel 4.8.

Methode: Schulterpaare

bes. Hinweise: Für die Teilaufgabe c) muss eine Abbildung eines Wetterballons vor dem Abflug zu Verfügung gestellt werden, oder – noch besser – im Internet gesucht werden. Falls das Thema Auftrieb schon behandelt worden ist, kann auch die Frage bearbeitet werden, warum der Ballon steigt, und zwar nur bis in eine bestimmte Höhe.

e) Forschungsprojekt: Messung von Luftdruckabhängigkeiten

Beschreibung: Verwende das selber hergestellte Manometer (Kapitel 2.2.a) um zu überprüfen, ob du die Höhenabhängigkeit und die Wetterabhängigkeit des Luftdrucks nachweisen kannst.

a) Gehe mit dem Manometer in den Keller des Schulhauses. Öffne den Kleinen Stopfen in der Bohrung und verschliesse ihn anschliessend wieder. Markiere mit einem Filzstift den Wasserstand auf beiden Seiten des U-Rohrs. Nimm nun das Manometer mit in ein höher gelegenes Stockwerk des Schulhauses (je höher desto besser!). Verändere ansonsten gar nichts am Manometer. Markiere erneut (mit anderer Farbe) den Wasserstand auf beiden Seiten des U-Rohres. Erkläre!

- b) Zurück im Schulzimmer entfernst du alle Markierungen am U-Rohr, öffnest du den kleinen Stopfen und verschliesst ihn wieder. Markiere jetzt wieder auf beiden Seiten des U-Rohrs den Wasserstand. Notiere auch die Temperatur im Schulzimmer. Schau ob sich in 1 bis 2 Stunden etwas verändert hat und notiere erneut die Temperatur im Schulzimmer. Am nächsten morgen wird erneut die Temperatur im Schulzimmer notiert und der Wasserstand markiert. Erkläre! Berücksichtige auch das Wetter (Vortag und heute)

Material: selbst gebautes Manometer, Thermometer, 2 Tageszeitungen mit Wetterbericht
Theorie: Kapitel 4.8 und 4.5.
Methode: Klassenexperiment
bes. Hinweise: Je nach Temperatur(in)konstanz und Verdunstungsrate im U-Rohr kann der Nachweis des Wettereffekts schwierig sein. Bei einem starken Wetterwechsel sollte der Nachweis aber möglich sein.

2.5. Starke Kräfte dank Druckunterschied

a) Vakuumheber

Beschreibung: Versuche mit einem Saugnapf Gegenstände anzuheben und zu transportieren. Dokumentiere die Probleme. Du erinnerst dich vielleicht an den Saugnapfversuch im iLab? Worum ging es dabei?
Suche im Internet unter dem Begriff «Vakuumheber». Finde heraus, wozu sie dienen, wo und in welchen Grenzen sie eingesetzt werden. Welches Prinzip steckt dahinter? Suche Vor- und Nachteile!
Erstelle unter dem Titel «Der Vakuumheber» auf zwei A4-Seiten eine Dokumentation mit Bildern. Präsentiere deine Arbeit mit Powerpoint oder mit einem Plakat.

Material: Internetzugang, Papier im Weltformat oder Powerpoint-Programm, Saugnapf.
Theorie: Kapitel 4.6 und 4.8.
Methode: Einzel- oder Teamarbeit: Internetrecherche und Erstellen einer Dokumentation oder einer Präsentation (PPP oder Plakat)

bes. Hinweise: Bei einem der Versuche im iLab wurde gezeigt, dass Saugnäpfe durch den Luftdruck angedrückt werden.
Brauchbar ist z.B. der Link <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuumheber>. Mit Vakuumhebern können grammeleichte, aber auch tonnenschwere Gegenstände angehoben werden. Die Vakuumerzeugung ist je nach Anwendung unterschiedlich.

b) Implodierende Dose

Beschreibung: Halte eine Filmkamera (z.B. Mobile) bereit. Fülle ein Abwaschbecken oder einen Eimer zu drei Vierteln mit Wasser. Reinige eine alte Olivenöldose gut mit einem fettlösenden Abwaschmittel. Stelle die Dose mit etwas Wasser auf ein Bunsenbrennergestell und erhitze sie, bis aus der Öffnung viel Dampf ausströmt. Starte die Filmaufnahme. Nimm die heiße Dose mit den Topflappen und drücke sie mit der Öffnung nach unten rasch in das kalte Wasser.
Skizziere die Dose vor dem Erhitzen und nach dem Eintauchen ins kalte Wasser. Jedes Teammitglied versucht auf einer Ecke einer A4 Seite das Phänomen zu erklären. Nachher einigen sich alle auf einen gemeinsamen Text, der auf der Blattmitte festgehalten und von allen unterschrieben wird.

Der Teamsprecher/die Teamsprecherin präsentiert das Ergebnis vor der ganzen Klasse. Die Antworten werden verglichen und diskutiert.

- Material:** Leere verschliessbare 2-Liter-Öldose aus Blech, Bunsenbrenner mit Gestell, Topflappen, Eimer mit kaltem Wasser.
- Theorie:** Kapitel 4.7 und 4.8.
- Methode:** Demoexperiment, Teamarbeit oder Workshopversuch
- bes. Hinweise:** Der erhitzte Wasserdampf kühlt rasch ab und kondensiert. Das kalte Wasser wird zwar durch den äusseren Luftdruck in die Dose gedrückt, es kann aber nicht rasch genug einströmen, so dass die Dose zusammengedrückt wird. Der Versuch funktioniert auch mit einer leeren dünnwandigen 0.5 Liter Alu-Getränkedose, deren Deckel nicht vollständig geöffnet wurde.

2.6. Hydrostatischer Druck

a) Gewichtsmessung mit Bettflasche

- Beschreibung:** Füllt eine Bettflasche vollständig mit Wasser und befestigt einen dickwandigen, durchsichtigen Kunststoffschlauch wasserdicht an der Öffnung. Legt die Bettflasche flach auf den Boden und befestigt den Schlauch senkrecht an einer Wand. Legt ein Schneidebrett (z. B. aus der Küche) auf die Bettflasche. Eine Person stellt sich auf das Brett. Markiert am Schlauch wie weit das Wasser gestiegen ist. Wiederholt das gleiche mit weiteren Schülern und Schülerinnen. Wer ist schwerer, respektive leichter? Warum? Wie funktioniert diese «Waage»? Misst mit einem Messband die Höhe der Wassersäule im Schlauch und versucht, daraus das Gewicht der gewogenen Person zu berechnen (Tipp: man braucht dazu die Kontaktfläche A des Schneidebrettes mit der Bettflasche, die mit Kreidestaub markiert werden kann).
- Material:** Bettflasche, dickwandiger, durchsichtiger Kunststoffschlauch von ca. 2.5 m Länge, Leim (z. B. Araldit), Küchenbrett (ca. 400 cm²), Messband.
- Theorie:** Kapitel 4.7.2.
- Methode:** Klassenexperiment
- bes. Hinweise:** Je nach Schlauch (etwas grösserer Aussendurchmesser als Innendurchmesser der Flaschenöffnung) kann es gelingen, den Schlauch direkt wasserdicht in die Öffnung der Bettflasche zu schrauben. Ansonsten kann auch Leim zum Abdichten verwendet werden (Achtung: 1 Tag trocknen lassen). Falls man die Flasche mit bereits montiertem Schlauch füllt, muss darauf geachtet werden, dass die Luft aus der Flasche entweicht. Zur Berechnung: Der durch die belastende Person ausgeübte Druck p ist gleich $m \cdot g / A$. Dieser Druck entspricht dem Druck der Flüssigkeitssäule p gleich $\rho \cdot g \cdot h$. Durch die Messung von h und A kann somit auf m geschlossen werden. Die Genauigkeit des Messergebnisses soll weniger im Zentrum stehen (kann aber natürlich thematisiert werden). Entscheidend ist die Einsicht in das Messprinzip.

2.7. Dichte und Auftrieb

a) Aräometer (Senkwaage)

- Beschreibung:** Durchbohre den Verschlusspfropfen (Zapfen) eines Reagenzglases von ca. 1 cm Durchmesser mit einem Nagel und stecke einen Schaslikspiess in das Loch, so dass er ca. 10 cm herausragt. Fülle soviel Sand in das Reagenzglas, dass nach dem Verschließen, Eintauchen in Wasser und Loslassen (das Reagenzglas schwimmt) nur noch etwa Zweidrittel des Schaslikspiesses über die Wasseroberfläche ragen. Markiere mit einem Fineliner den Wasserstand auf dem Spiess. Tauche das Reagenzglas anschliessend in ein Gefäss mit Alkohol oder Brennsprit. Was beobachtest du? Erkläre!
Wiederhole den Versuch mit Wasser unterschiedlicher Temperatur. Beobachte die Marke und überlege dir, ob und wie du diese Vorrichtung als Thermometer brauchen könntest. Wiederhole den Versuch (mit einem neuen Schaslikspiess) mit Wasser bei Zimmertemperatur, in dem du abgewogene Salzmengen löst. Mache vorher auf dem Spiess Markierungen im Abstand von 1 mm. Erstelle eine «Eichtabelle» mit deren Hilfe du nachher den Salzgehalt einer Salzlake in Prozent bestimmen kannst.
Suche im Internet Anwendungen von Aräometern.
- Material:** Reagenzglas (ca. 1 cm Durchmesser) mit Pfropfen, Nagel oder Ahle, Schaslikspiesse, Sand oder Tarierschrot, Becherglas, Heizplatte oder Bunsenbrenner, Salz oder Zucker, Alkohol oder Brennsprit, Fineliner.
- Theorie:** Kapitel 4.9.
- Methode:** Partner- oder Teamarbeit, kleines Projekt
- bes. Hinweise:** Der Auftrieb hängt von der Dichte des Fluids ab. Das Prinzip des Aräometers wird u.a. bei Batterieprüfern zur Bestimmung des pH-Wertes oder bei der Mostwaage zur Bestimmung des Zuckergehalts (Öchslegrad) verwendet.

b) Bestimmung des Auftriebs eines Steins in Wasser

- Beschreibung:** Hänge mit Hilfe eines Fadens einen Stein an ein Newtonmeter. Miss sein Gewicht in N. Tauche den Stein in Wasser und lies die Anzeige auf dem N-Meter erneut ab. Bestimme daraus den Auftrieb des Steins in Wasser.
Kontrolliere dein Resultat, indem du den Auftrieb mit dem Gewicht des durch den Stein verdrängten Volumens vergleichst.
Zur Bestimmung des Gewichts des vom Stein verdrängten Wassers brauchst du ein Überlaufgefäss. Schneide aus einer hartwandigen PET-Flasche ein seitliches Fenster, durch das der Stein bequem hindurch geht. Lege die Flasche mit dem Fenster nach oben so auf einen Tisch, dass ihre Öffnung über die Tischkante hinausragt und leicht nach unten geneigt ist, indem du die Bodenseite der Flasche mit einem Heft unterlegst. Mit einem Buch auf jeder Seite kannst du verhindern, dass die Flasche rollt. Fülle durch das Fenster Wasser in die Flasche, bis sie überläuft (halte ein Becken unter die Flaschenöffnung).
Bestimme mit einer Waage die Masse eines leeren Becherglases in kg und berechne daraus durch Multiplikation mit 9,8 N/kg sein Gewicht. Fange mit dem Becherglas das Wasser auf, das überläuft, wenn du den Stein durch das Fenster in die Flasche tauchst. Wäge das Becherglas mit dem übergelaufenen Wasser erneut. Bestimme daraus das Gewicht des verdrängten Wassers. Vergleiche das Resultat mit der Auftriebsmessung, die du mit dem N-Meter gemacht hast.
Mache dir Gedanken über die Genauigkeit deiner Messresultate! Schreibe deine Überlegungen auf.
Bestimme rechnerisch das Volumen des Steins aus der Masse des verdrängten Wassers in kg und der Dichte von Wasser (1000 kg/m^3). Bestimme das Volumen des übergelaufenen

- Wassers auch auf geometrischem Weg aus dem Innendurchmesser des Becherglases und der Höhe des Wasserstandes über dem Becherglasboden. Bestimme das Volumen des übergelaufenen Wassers zusätzlich noch mit einem geeichten Standzylinder.
- Material:** Hartwandige PET-Flasche, Messer oder Schere, Faden, unförmiger Stein (mit ca. 100 g Masse), Abwaschbecken, Becherglas, Heft als Unterlage, Bücher als Stützen, Waage, geeichter Standzylinder.
- Theorie:** Kapitel 4.9.
- Methode:** Partner- oder Teamarbeit
- bes. Hinweise:** Dieser auf den ersten Blick einfache Versuch hat seine Tücken! Die Schülerinnen und Schüler müssen sich mit dem Umrechnen von Masseinheiten herumschlagen. Es lohnt sich, die verschiedenen Messvarianten machen zu lassen. So kann der Umgang mit Messfehlern geübt werden. Voraussetzung dafür ist allerdings das Erstellen von klar gegliederten und aussagekräftigen Messprotokollen.

c) Das Sonnenblumenkernenbad

- Beschreibung:** Fülle Sonnenblumenkerne in ein Trinkglas und lege eine Holzkugel hinein. Fülle mehr Sonnenblumenkerne ein (so dass die Holzkugel vollständig zugedeckt ist) und lege eine Stahlkugel darauf. Das Trinkglas ist jetzt zu etwa $\frac{3}{4}$ gefüllt. Schüttele und schwenke nun das Glas (kreisförmige Bewegung), ohne dass dabei die Sonnenblumenkerne aus dem Glas kippen. Was kannst du nach einiger Zeit beobachten? Wie lässt sich dies erklären? Diskutiert eure Ideen im Tischteam. Ein Teamsprecher oder eine Teamsprecherin teilt dann eure Erklärung der Klasse mit.
- Material:** Trinkglas (Durchmesser: Höhe ungefähr 1 : 1.5), Sonnenblumenkerne (es funktioniert auch mit Reiskörnern), gleich grosse Holz und Stahlkugel.
- Theorie:** Kapitel 4.9.
- Methode:** Demonstrationsexperiment (dann sollte man die Holzkugel vorher verstecken, der Effekt ist dann umso schöner) oder Experiment für Schulterpaare.
- bes. Hinweise:** Die Dichte der Stahlkugel ist wesentlich grösser als die Dichte des Sonnenblumenkerne-Luft Gemisches. Die Dichte des Holzes ist hingegen etwas kleiner. → Stahlkugel sinkt, Holzkugel steigt auf.
- Die Schwenkbewegung sollte eine vertikal kreisende Bewegung sein. Es ist etwas Ausdauer und Geschicklichkeit notwendig damit es klappt. Die Lernenden sind aber motiviert, wenn sie realisieren, dass sie dabei einen «Zaubertrick» lernen (sie zaubern eine Holzkugel hervor!). Zur Kontrolle der Theorie kann die Dichte der Holz- und Stahlkugel und die mittlere Dichte der Sonnenblumenkernfüllung bestimmt werden.

d) Knifflige Fragen

- Beschreibung:**
- Fülle ein Becherglas mit warmem Wasser. Gib Eis dazu und trockne das übergelaufene Wasser vorsichtig mit Haushaltspapier. Das Becherglas muss nun vollständig gefüllt sein. Was erwartest du in Bezug auf den Wasserstand, wenn das Eis geschmolzen ist? Schreibe die Begründung für deine Erwartung auf. Warte nun bis das Eis geschmolzen ist. Überprüfe deine Erwartung und diskutiere das Ergebnis mit deinem Team. Erkläre das Versuchsergebnis für die ganze Klasse.
 - Lasse in einem Becherglas eine möglichst grosse Kaffeetasse gefüllt mit Metallstücken (Schrauben, Unterlagsscheiben...) gerade noch im Wasser schwimmen. Markiere den Wasserstand. Was erwartest du, wenn du die Tasse «untergehen» lässt, so dass sie nun mit Wasser gefüllt auf dem Boden des Becherglases liegt. Schreibe vorher deine Erwartung und die Begründung dafür auf. Diskutiere nachher das Ergebnis in deinem Team. Erkläre den Versuch für die ganze Klasse.

- c) Belaste einen möglichst grossen Plastikbecher mit soviel Holzstücken, dass er gerade noch schwimmt. Markiere den Wasserstand im Becherglas. Kippe das Holz ins Wasser und lasse den Plastikbecher möglichst volllaufen. Schreibe vorher deine Erwartung und die Begründung dafür auf. Diskutiere nachher das Ergebnis in deinem Team. Erkläre den Versuch für die ganze Klasse.

Material: Becherglas, Kaffeetasse ohne Henkel, Metallstücke, Plastikbecher, Holzstücke.
Theorie: Kapitel 4.9 und 4.71.
Methode: Teamarbeit
bes. Hinweise: Die Versuche sollen zum Nachdenken über Auftrieb, Schwimmen und Wasserverdrängen anregen. Wichtig ist dabei die Diskussion und Argumentation.

2.8. Verdampfen und Kondensieren

a) Wasser siedet trotz Abkühlung

Beschreibung: Ein Wasserschlauch wird mit einem Wasserhahn verbunden. Das offene Ende wird in ein Auffangbecken (z. B. Kunststoffschale) gelegt. Über einer Herdplatte oder dem Gasbrenner werden in einem 500 ml Erlenmeyerkolben etwa 250 ml Wasser zum Sieden erhitzt. Wenn das Wasser stark siedet, wird der Erlenmeyerkolben mit dem Gummistopfen verschlossen und über dem Auffangbecken für kurze Zeit mit kaltem Wasser aus dem Wasserschlauch abgekühlt. Trotz der Abkühlung beginnt das Wasser wieder zu siedeln. Der Effekt kann 2 bis 3 mal wiederholt werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen alle Prozesse aufzählen und beschreiben, die während des ganzen Vorgangs ablaufen. Was passiert? In welcher Reihenfolge? Warum?

Material: Auffanggefäss, dünner Wasserschlauch, Heizplatte oder Gasbrenner, 500 ml Erlenmeyerkolben oder ähnliches Gefäss, Siedesteinchen, Gummistopfen.

Theorie: Kapitel 4.71.

Methode: Demonstrationsexperiment

bes. Hinweise: Durch das Abkühlen kondensiert der Wasserdampf, welcher im Gefäss vorhanden ist. Da das Gefäss mit einem Stopfen verschlossen ist, entsteht so ein Unterdruck. Bei einem Umgebungsdruck kleiner als Normaldruck siedet das Wasser schon unterhalb 100°C → Das Wasser siedet wieder kurz auf. Da durch das erneute Sieden wieder Wasserdampf gebildet wird, steigt der Druck im Gefäss wieder an → Das Sieden stoppt nach kurzer Zeit wieder. Durch erneutes Abkühlen kann der ganze Prozess wiederholt werden.

b) Eindampfen von Äther im Vakuum

Beschreibung: Ein Rundkolben wird zu etwa einem Viertel mit Äther (Diethylether) gefüllt. Dann 2 oder 3 Siedesteinchen dazu gegeben! Auf den Kolben wird ein Dreiwegehahn aufgesetzt. Dieser wird mit einer Wasserstrahlpumpe verbunden. Wird nun der Rundkolben mittels Wasserstrahlpumpe evakuiert, beginnt der Äther relativ schnell zu siedeln. Um ein gleichmässiges Siedeln zu erreichen kann der Kolben von Hand leicht geschwenkt werden. Man spürt schnell, dass sich die Flüssigkeit (und dadurch auch der Kolben) merklich abkühlt. Sollte das Siedeln zu heftig werden, kann mit dem Dreiwegehahn wieder etwas Luft in den Kolben gelassen werden. Das Experiment wird so lange fortgeführt, bis alle Schülerinnen und Schüler mit der Hand fühlen konnten, dass das Gefäss kalt wird.

Material: Rundkolben (250 oder 500 ml), Siedesteinchen, Diethylether (Sdp. 34°C), Dreiwegehahn, Wasserstrahlpumpe, dickwandiger Gummischlauch.

Theorie: Kapitel 4.71.

Methode: Demonstrationsexperiment

bes. Hinweise: Sobald der Druck im Gefäß auf den Wert des Dampfdruckes vom Äther gesunken ist, beginnt der Äther zu sieden. Da die Wasserstrahlpumpe die entstehenden Dämpfe fortlaufend abführt, geht das Sieden weiter. Der Flüssigkeit gehen dadurch fortlaufend die überdurchschnittlich schnellen Moleküle verloren (siehe Kap. 4.7.1.a), 4. Versuch) und, da die durchschnittliche Geschwindigkeit der Moleküle ein Maß für die Temperatur ist, sinkt sie. Eine alternative Erklärungsweise: Damit eine Flüssigkeit verdampfen kann, muss die Verdampfungswärme aufgebracht werden. Diese wird von der verbleibenden Flüssigkeit geliefert, die sich dadurch abkühlt.

3. Didaktische und methodische Hinweise

In der Folge werden einige Methoden, die im Kapitel 2 nur als Schlagworte aufgeführt sind, genauer beschrieben.

3.1. Evidenzen sammeln

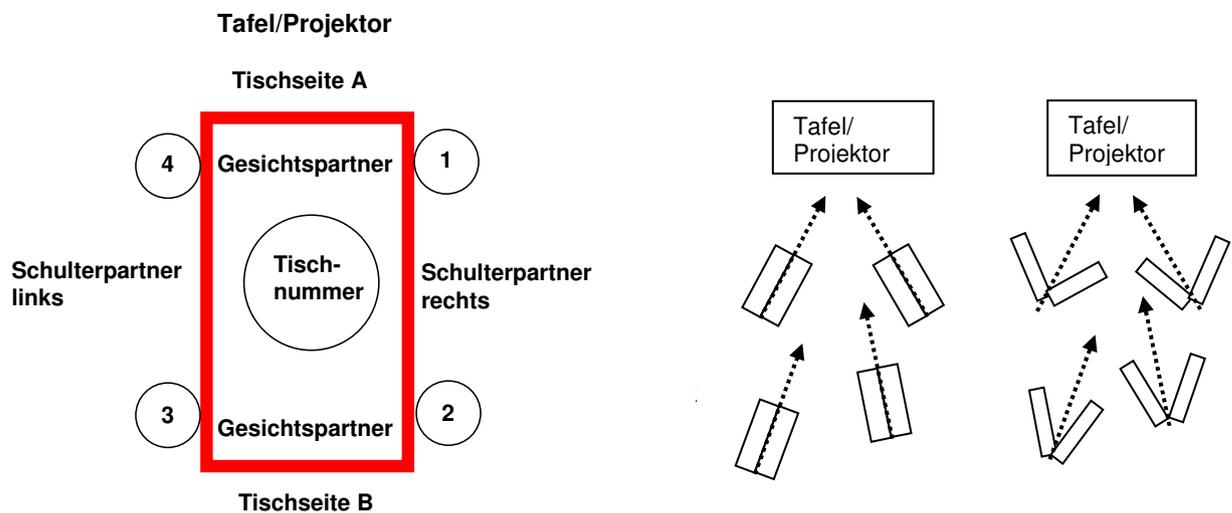
Diese Methode eignet sich als längerfristige Vorbereitung eines geplanten Unterrichtsthemas. Das so entstandene Portfolio kann durch die Lehrperson beurteilt und benotet werden. Jede Evidenz kann nach einem von der Lehrperson vorgegebenem Raster z.B. mit 0 bis maximal 4 Punkten bewertet werden.

Hinweis: Diese Unterrichtsform wird beschrieben in «Physikdidaktik», Kircher et al., Springer, ISBN-10 3-540-34089-0. S. 370 ff

3.2. Arbeiten im Tischteam

Team-Tisch-Organisation nach Spencer Kagan

<http://ednet.kku.ac.th/~paisan/tld/kagan-struct.html>



Teamarbeit ist weit mehr als Gruppenarbeit. Damit eine Ad-hoc-Gruppe zum Team wird, braucht es gut durchdachte Strukturen und dauernde Übung damit.

Eine Tischeinteilung, wie sie Spencer Kagan vorgeschlagen hat, kann dabei sehr hilfreich sein. Die Ausrichtung der Achsen aller Teamtische erlaubt allen Schülerinnen und Schülern den Blick auf Wandtafel oder Projektor. Je nach örtlichen Möglichkeiten kann das durch eine in Sekunden zu errichtende V-Anordnung noch optimiert werden.

Aufträge lassen sich so rasch zuteilen und die Abläufe über ein vorgegebenes Zeitmanagement gut überwachen.

Es empfiehlt sich, die Teamzuteilung nach (evtl. nach einem Quartal) wechselnden Kriterien durch die Lehrperson machen zu lassen. Bei Teamaufgaben sind die Aktivitäten innerhalb der Teams rotierend zu gestalten.

Beispiel zum Thema Schall

Alle falten ein A4 Blatt einmal längs und dreimal quer, und falten es dann wieder auf. In der linken Kolonne dieser (2x8)-Liste werden gemeinsam im Team Schallgeber, d.h. «Dinge, die tönen und auch benannt werden können» aufgelistet. Teammitglied 1 beginnt mit einem Vorschlag, 2 beschreibt eine Art und Weise, wie dieser Schallgeber zum Tönen gebracht werden kann, 3 sucht dafür einen kurzen sprachlichen Ausdruck, 4 schaut, dass alle das Beispiel richtig (mit «Autorenname») in ihre Liste schreiben, dann wird permutiert, d.h. es folgt der Vorschlag von 2 ...

Es werden 25 Minuten Arbeitszeit veranschlagt.

Die Lehrperson könnte solche Listen bekommen:

4er-Tisch-Team Nr.1 Schallgeber (vorgeschlagen...)	Anregungsart (Lösungsvorschlag...)
Stimmgabel (von Hans)	Anschlagen oder durch Resonanz (von Maja)
Lautsprecher, Kopfhörer (Maja)	Elektromagnetische Anregung einer Membran (von Marc)
Saite (Marc)	Zupfen oder streichen mit «klebrigem» Bogen (mit Kolophonharz einreiben) (von Brigi – Violinistin)
Glocke, Schelle (Brigi)	Anschlagen, Schütteln einer Kugel, Klöppelschlag (Hans)
Klingel (Hans)	Klöppel mit elektrischem Unterbrecher bewegen und damit eine Schelle anschlagen (von Maja)
Klingendes Glas (Maja)	«Haften und Gleiten» mit feuchter Fingerbeere oder Anschlagen (Marc)
Gong (Marc)	Anschlagen (Brigi)

oder:

3er-Tisch-Team Nr. 2 Schallgeber (von..)	Anregungsart (Lösungsvorschlag von...)
Stimmbänder (Therese)	Luftstrom durch Unterbrechen zum Schwingen bringen (Rudi)
Klatschen (Rudi)	Luft komprimieren (Therese)
Zeitung (Therese)	reiben, knicken, zerknüllen (Vali)
Glasrohr (Vali)	anblasen, leichtes Klopfen, durch Resonanz (Rudi)
Harte Kreide auf Tafel (Rudi)	«Haften und Gleiten» auf einer Wandtafel (Therese)
Motoren (Therese)	Rotation und Vibrationen beweglicher Teile (Vali)
Musikinstrumente (Vali)	(Zeit reichte nicht mehr)

3.3. Experimentieren im Tischteam

Teamfördernd ist das Experimentieren in festen Teams (statt in variierenden Gruppen). Wichtig ist, dass von der Lehrperson das Rollenverhalten der Teammitglieder insbesondere auch im Hinblick auf die Genderproblematik beobachtet und beeinflusst wird. Die Klasse kann von Teamspeakern über den Verlauf orientiert werden. Welche Teams dabei zum Zuge kommen, und wer Teamspeaker ist, entscheidet unmittelbar vor der Präsentation z.B. der «Zufallsgenerator» der Lehrperson. (Siehe dazu «Student Selector» unter <http://www.kaganonline.com/Catalog/index.html>)

www.kaganonline.com



Beispiel 1

Die Lehrperson könnte diesen Text bekommen:

«Die Schattenbewegung ist in beiden Fällen gleich. Wir finden das cool.» (Hans, Krista, Jacques, Wolf)

Beispiel 2

Zwei von der Lehrperson als erfolgreich eingeschätzte Teams dürfen präsentieren. Die Speakerin/der Speaker eines Problemteams berichtet über die Schwierigkeiten beim Üben.

3.4. Experimente für Schulterpaare im Tischteam

Schulterpaare sitzen im Team besonders nah beieinander und eignen sich deshalb gut als Untergruppe des Teams. In 3er-Tischteams entfällt in der Regel diese Möglichkeit (ausser es gibt zwei 3er-Tischteams in der Klasse). Nach der Durchführung des Experiments besteht die Möglichkeit, dass sich die GesichtspartnerInnen austauschen.

3.5. Die Methode «GiveOne – GetOne»

Diese Methode aktiviert gleichzeitig sehr viele Schülerinnen und Schüler zum Mitdenken und fördert bei häufiger Anwendung die Teambildung. Die Austauschphase bringt zielgerichtete physische Bewegung in den Unterricht. Dabei wird das Wissenspotenzial der ganzen Klasse genutzt. Die Kurzpräsentationsphase hilft Hemmungen beim Sprechen vor «vielen Menschen» abzubauen.

Wichtig bei dieser Methode ist ein **gutes Zeitmanagement** durch die Lehrperson z.B. mittels eines Gongs oder eines digitalen «Unterrichtsweckers». (Siehe dazu «TeachTimer» unter <http://www.kaganonline.com/Catalog/index.html>)



www.kaganonline.com

In der **Bewegungsphase** muss immer darauf geachtet werden, dass sich **alle bewegen** und zwar weg von den eigenen Stühlen.

3.6. Begriffsnetz

In Begriffsnetzen werden mehrere vorgegebene und im Unterricht behandelte Begriffe grafisch sinnvoll angeordnet. Je zwei Begriffe können mit einem einfachen Pfeil oder mit einem Doppelpfeil dazwischen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die Pfeile werden direkt beschriftet oder mit Nummern versehen, zu denen dann eine Legende erstellt wird. Wenn Begriffsnetze zuerst an Beispielen geübt werden, können sie auch zur Leistungsbeurteilung herangezogen werden. Gewertet wird dabei der Inhalt der Beziehungsbeschreibungen, z.B. 0 bis maximal 1 Punkte pro Pfeilrichtung.

Hinweis: Diese Unterrichtsform wird beschrieben in
«Physikdidaktik», Kircher et al., Springer, ISBN-10 3-540-34089-0. S. 281 ff

3.7. Schreiben einer Versuchsanleitung

Wer eine Versuchsanleitung schreiben will, muss sich mit der hinter dem Versuch stehenden Theorie intensiv auseinandersetzen, sich über die Versuchsanordnung im Klaren sein, sie optimieren und beschreiben können. Die Anleitung muss gut lesbar und verständlich sein. Das im Versuch angestrebte Lehrziel zu formulieren und die zu erwartende Lösung darzulegen, kann durchaus sinnvoll sein. Je nach Zeitgefäss kann die Aufgabe sogar darin bestehen, eine eigene Versuchsanordnung entwickeln zu lassen.

3.8. Lernen an einer Station

Stationen sind dann sinnvoll, wenn der Inhalt einer ganzen Lernsequenz handelnd mit Experimenten erarbeitet oder dargestellt werden soll. Während einer vorgegebenen Zeit muss eine bestimmte Anzahl von Stationen in freier Wahl – natürlich im Rahmen der Verfügbarkeit – durchlaufen werden. Das Zeitmanagement für die einzelnen Stationen ist Sache der Lernenden. Manchmal ist es sinnvoll, kleine «Jokerstationen» oder Spezialaufgaben (z. B. eine kleine Internetrecherche) bereit zu halten, um Engpässe sinnvoll überbrücken zu können. Beim Lernen an Stationen wird ein Thema nicht «Versuch nach Versuch» aufbauend behandelt, da die Stationen ja in unterschiedlicher Reihenfolge durchlaufen werden.

3.9. Demonstrationsversuch

Demonstrationsversuche sind sinnvoll, wenn spezielle, eventuell langwierige und exakte Vorbereitungen für einen Versuch nötig sind, wenn dafür gefährliches, wertvolles oder sonst besonderes Material verwendet wird, wenn besonderes Geschick für das Gelingen vorausgesetzt werden muss, wenn mehrere oder sogar viele Assistierende bei der Durchführung helfen müssen, wenn aus dem Alltag selbstverständliche und gut bekannte Phänomene diskutiert werden, wenn ein spezieller Einstieg geplant ist.

Demonstrationsversuche der Lehrperson können auch als Lernanlass für exaktes Beobachten (z.B. bei Einstiegsexperimenten) und Beschreiben (z.B. zum Einüben und Durcharbeiten bereits bekannter Begriffe) dienen.

3.10. Ein Forschungsvorhaben

Forschungsvorhaben eignen sich besonders gut für Projektwochen, schulhausinterne Spezialtage oder für langfristige Arbeiten. Wichtig ist:

- das vorherige Erarbeiten einer verbindlichen Fragestellung (evtl. verbunden mit einer Hypothese) und die Darlegung der persönlichen Motivation,
- das Setzen von «Meilensteinen» zur Kontrolle des Arbeitsfortschrittes und zum Informationsaustausch mit der Lehrperson, der Klasse oder anderen Teams und aller sonstiger Termine,
- die Absprachen zu Inhalt und Form der Dokumentation (Arbeitsjournal mit allen Irrungen und Ideenwandlungen, Fotos und andere Medien, Arbeitsskizzen, «Werksskizzen», Finanzielles) und der Präsentation.

3.11. Projekte

Projekte lassen ein breites inhaltliches und formales Spektrum zu. Sie eignen sich je nach dem durch die Lehrperson vorgegebenen oder durch die Beteiligten (z.B. die Klasse) entwickelten Rahmen auch für grössere Gruppen oder für die ganze Klasse. Es ist sinnvoll ähnlich vorzugehen wie unter «Forschungsvorhaben» beschrieben. Bei der Organisation von grösseren Projekten muss Platz sein für Einzelarbeit, Partnerarbeit, Teamarbeit und Arbeit mit der ganzen Klasse. Verbinden mit Projekten lassen sich Lehrausflüge, Kontaktaufnahmen mit ausserschulischen Experten und Expertinnen oder eine auf spezielle Projekte bezogene Zusammenarbeit mit Behörden, aber auch Umfragen und politisch sinnvolles Handeln.

Wichtig: Echte Projekte entwickeln sich nur im gemeinsamen Tun aller Beteiligten und aus einer möglichst offenen Fragestellung. Leider sind dafür nur selten schulische Gefässe vorhanden. Solche lassen sich aber in Zusammenarbeit mit Kollegen und Kolleginnen des Schulhauses durchaus schaffen. Immer möglich sind aber thematisch und formal bereits eingegrenzte Projektschritte.

3.12. Ausserschulische Lernorte

Lernprozesse lassen sich an ausserschulischen Lernorten besonders gut initiieren (iLab-Besuch), mit dem gesellschaftlichen Umfeld verbinden (Besuch eines Instrumentenbauers), mit einer speziellen Thematik (Museen) beladen oder operativ (im Schulhaus unmögliche Experimente) erweitern. Es ist wichtig, solche Anlässe in das reguläre Unterrichtsgeschehen einzubinden, entsprechend gut vor- und nachzubereiten. Immer sollen damit explizite und später überprüfbare Lernziele verbunden sein. Die Abteile der Züge lassen sich übrigens sehr gut als Team-Arbeitsplätze gestalten.

4. Theoretische Grundlagen und Hintergrund-Informationen

4.1. Zum Begriff des Vakuums

Ein perfektes Vakuum in einem grösseren Raumgebiet zu erzeugen ist selbst mit leistungsstarken Vakuumparturen unmöglich. Im Innern eines Gefässes herrscht ein Vakuum, wenn der Druck dort geringer ist als der normale Atmosphärendruck von 1 atm bzw. 1,013 bar. Je grösser der Druckunterschied ist, desto besser ist das Vakuum. Wie gut ein Vakuum in der Technik sein muss, hängt von der gewünschten Anwendung ab. Heute ist es mit grossem Aufwand möglich, den Druck bis auf 10^{-17} mbar zu reduzieren. Bei diesem kleinen Druck ist von beispielsweise 10^{20} Gasmolekülen bei Normaldruck (rund 4 cm^3) gerade etwa noch 1 Molekül vorhanden. Dabei handelt es sich fast nur noch um Moleküle, die aus der Gefässwand sublimieren.

Vakuum-Druckbereiche (diverse Quellen)

Bezeichnung	Druck in mbar
Großvakuum	1000 bis 1
Feinvakuum (Vorvakuum)	1 bis 10^{-3}
Hochvakuum (HV)	10^{-3} bis 10^{-7}
Ultrahochvakuum (UHV) bis extrem hohes Vakuum (XHV)	10^{-7} bis ca. 10^{-17}

Im Hochvakuum legen die Gasmoleküle zwischen zwei Stössen im Mittel 10 cm bis 1 km zurück (freie Weglänge).

«Der leere Raum» in Erdnähe

In 200 bis 1200 km Höhe beginnt der Ultrahochvakuumbereich mit weniger als 10^{15} Teilchen pro Kubikmeter bei etwa 2 km freier Weglänge.

Birgit Strackenbrock: Technologien für das 21. Jahrhundert. In: Brockhaus Mensch, Natur, Technik. Leipzig 2000, ISBN 3-7653-7945-X, S. 598.

4.2. Aus der Geschichte

Noch im 16. Jh. war unklar, ob so etwas wie ein luftleerer Raum existiert. 1654 widerlegte Otto von Guericke (Jurist, Bürgermeister von Magdeburg) mit einem Experiment auf dem Regensburger Reichstag die damalige Vorstellung des «Horror vacui», der Furcht vor der Leere.

«Weil die Gelehrten nun schon seit langem über das Leere, ob es vorhanden sei, ob nicht, oder was es sei, gar heftig untereinander stritten (...) konnte ich mein brennendes Verlangen, die Wahrheit dieses fragwürdigen Etwas zu ergründen, nicht mehr eindämmen.»



Bildcover und Text:

Otto von Guericke «Experimenta Nova
Magdeburgica De Vacko Spatio»



Bild: www.laurentianum.de/physikmuseum/magdeburg.htm

«Mit dem Lederring als Zwischenlage wurden nun diese Halbkugeln aufeinandergespaßt und dann die Luft (...) rasch ausgepumpt. Da sah ich, mit wieviel Gewalt sich die beiden Schalen gegen den Ring preßten! Und diesergestalt hafteten sie unter der Einwirkung des Luftdrucks so fest aneinander, daß 16 Pferde sie gar nicht oder nur mühsam auseinanderzureißen vermochten. Gelingt aber bei größter Kraftanstrengung die Trennung zuweilen doch noch, so gibt es einen Knall wie von einem Büchschenschuß (...)»

Literaturhinweis:

<http://www.deutsches-museum.de/sammlungen/ausgewaehlte-objekte/meisterwerke-i/halbkugel/>

4.3. Vakuum in Alltag, Forschung und Technik

Apparate wie Kühlschrank, Fernsehöhre, Glühbirne, Thermosflasche oder Saugheber zum Festhalten und Transport leichter und schwerer Gegenstände benötigen Unterdruck. Auch bei der Gefriertrocknung wird mit Vakuumtechnik gearbeitet. Stoffen wie Kaffee, Tee, Gemüse, Blut oder biologischen Präparaten wird Wasser entzogen, indem sie tiefgefroren einem Vakuum ausgesetzt werden. Dabei geht das Eis durch Sublimation direkt in die Gasphase über.

Damit weniger Sauerstoff an Lebensmittel gelangt, können sie in Folien oder Säcke verpackt werden. Diese werden mit Vakuumiergeräten grob evakuiert, damit sie durch den äusseren Luftdruck rund um die verpackte Ware ganz eng angedrückt werden. Eine andere Methode ist das Einkochen und Sterilisieren von Nahrungsmitteln. Durch das Kochen werden die Lebensmittel sterilisiert und darin enthaltene Gase ausgetrieben. Beim heissen Auffüllen der Einmachgläser mit Lebensmitteln in flüssiger Form wird die Luft aus dem Glas vollständig verdrängt. Beim Abkühlen entsteht im Glas ein Unterdruck, der durch die Dichtungsringe als Grobvakuum über längere Zeit erhalten bleibt. Beim Vakuumfrittieren (z.B. von Kartoffelchips) kann mit niedriger Temperatur frittieren werden. Die Entstehung schädlicher Nebenprodukte (wie z.B. Acrylamid) wird dadurch reduziert.

In Forschung und Hightech spielt die Vakuumtechnologie eine wichtige Rolle: Evakuieren von Röhren in Teilchenbeschleunigern, Aufdampfen dünner Filme oder Multilagen auf ein Substrat zur Herstellung mikroelektronischer Bauteile, magnetische Fallen für einzelne Atome oder Massenspektroskopie mit Hilfe eines Vakuums. In der Chemie werden Stoffreaktionen im Vakuum untersucht oder Stoffgemische im Vakuum destilliert. Dies spart Energie und sorgt für eine schonende Trennung des Flüssigkeitsgemisches.

Die Biologie interessiert sich für Phänomene in der Natur, in denen Unterdruck eine Rolle spielt. Obwohl das Vakuum kein Lebensraum ist, können Bakteriensporen oder Pflanzensamen eine zeitlang im Vakuum überleben. Menschliche Haut und Körpergewebe können einen Druckabfall bis zu einem Bar aushalten; wenn vorher ausgeatmet wurde sogar ohne Lungenschäden.

Human Body in a Vacuum. In: Ask an Astrophysicist. NASA, 3. Juni 1997, abgerufen am 6. Januar 2008 (englisch).

In der Physik steht das Vakuum als materiefreier Raum selbst im Blickwinkel theoretischer Überlegungen. Im Vakuum können sich virtuelle Teilchen gewissermassen aus dem «Nichts» materialisieren. Auch hat das Vakuum besondere Eigenschaften. So kann es elektromagnetische Wellen und damit auch Wärmestrahlung übertragen. Ausserdem besitzt es eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit. In der Hochleistungselektronik werden deshalb Vakuumkondensatoren verwendet.

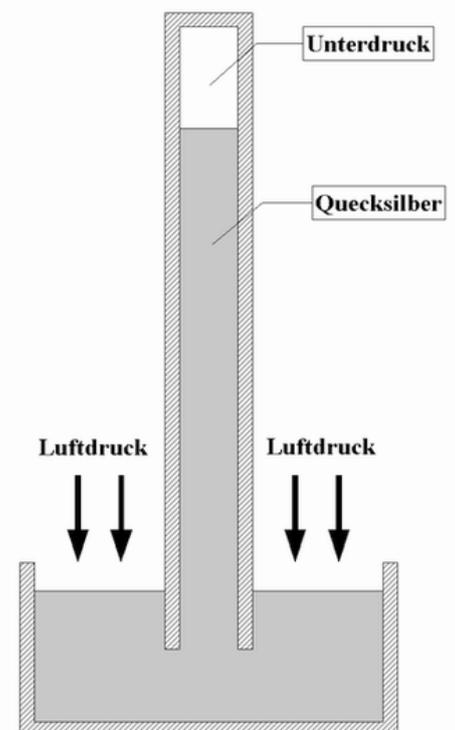
4.4. Erzeugung eines Vakuums, Pumpentypen

Historische Ansätze

Wird eine auf einer Seite geschlossene Glasröhre von 1 m Länge mit Quecksilber gefüllt und dann mit dem offenen Ende in einen Becher gehalten, der ebenfalls Quecksilber enthält, sinkt im Rohr der Quecksilberpegel bis der Schweredruck des Quecksilbers im Rohr über dem Quecksilberniveau im Glas dem Luftdruck entspricht. Im Rohr über der Quecksilbersäule entsteht ein Vakuum, das nur noch sehr wenig Quecksilberdampf enthält. Die Idee für ein solches Rohr stammt von Torricelli. Bei Torricellis Experiment stoppte die Quecksilbersäule bei ungefähr 760 mm Höhe. Der Gewichtsdruck einer 1 mm hohen Quecksilbersäule wurde früher als Druckeinheit verwendet und 1 Torr genannt. Der Druck einer 760 mm hohen Quecksilbersäule entsprechen also 760 Torr. Dieser Wert wurde als 1 atm (physikalische Atmosphäre) bezeichnet. In den heute verwendeten Druckeinheiten entspricht dieser Wert 1013,25 mbar oder 101,325 kPa. Würde das gleiche Experiment mit einer Wassersäule gemacht, wäre diese etwa 10,33 m hoch.



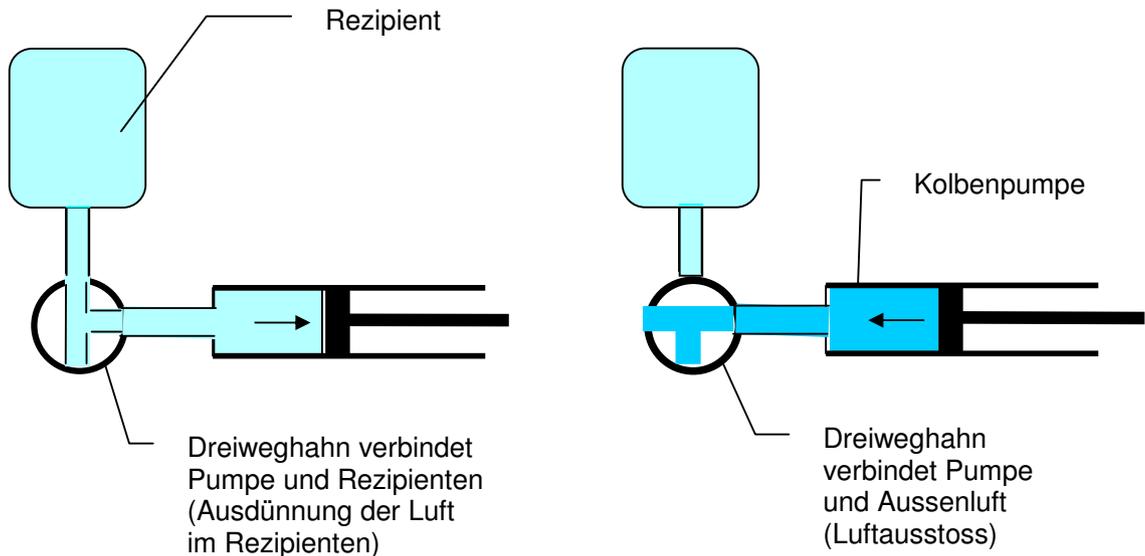
Bild Rohr: <http://de.wikipedia.org/wiki/Barometer>
Porträt: http://de.wikipedia.org/wiki/Evangelista_Torricelli



Blaise Pascal führte den Versuch mit dem Torricellirohr in verschiedenen Höhenlagen durch. Er stellte fest, dass der Quecksilberspiegel im Rohr mit zunehmender Höhe sinkt (vgl. Kap. 4.8).

Wird der «Leerraum» über dem Quecksilber des Torricellirohres mit einem luftdichten Behälter – einem Rezipienten – verbunden, der ein Gas unter Atmosphärendruck enthält, sinkt die Quecksilbersäule und im Rezipienten entsteht ein Unterdruck gegenüber dem äusseren Luftdruck, also ein Grobvakuum. Wird ein derartiger Pumpvorgang mehrfach wiederholt, kann ein grösserer Unterdruck – also ein besseres Vakuum – im Rezipienten erzeugt werden. Dies kann mit Hilfe von Ventilen umgesetzt werden.

Mit der von Otto von Guericke um 1650 erfundenen Hahnluftpumpe kann ein Grobvakuum erzeugt werden. Der Dreiweghahn muss dabei allerdings nach jedem Pumpzyklus von Hand umgestellt werden:



Vakuumpumpen im Unterricht

Im Unterrichtsbereich werden häufig Handluftpumpen mit automatischen Ventilen verwendet. Zu einer solchen Ausstattung gehört in der Regel ein Vakuumschlauch, ein Ein- oder Mehrweghahn und ein Vakuumteller mit passendem Rezipienten.

Bild: Mit dieser von «zeo-tech» entwickelten manuell betätigten Vakuumpumpe (angeboten von verschiedenen Lehrmittel-Herstellern) sind Enddrücke unter 2 mbar erreichbar. Das Saugvermögen liegt mit 2–3 m³/h im Leistungsbereich kleiner, elektrisch angetriebener Vakuumpumpen.

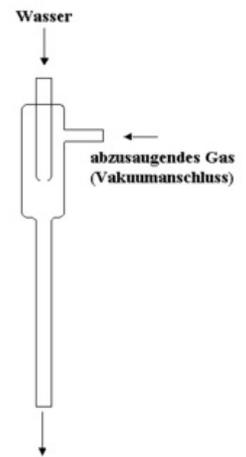
https://www.zeo-tech.de/html/de/product_vacuum_pump.htm



Bild: Vakuumteller und -schlauch der Lehrmittelfirma Phywe

Für die rasche Erzeugung eines geringen Unterdrucks dient die Wasserstrahlpumpe; sie erzeugt ein Grobvakuum, das höchstens den Wasserdampfdruck bei der jeweils herrschenden Wassertemperatur erreichen kann (z. B. 23 hPa bzw. mbar bei 20 °C), konkret aber etwas schlechter sein wird.

Eine gute Wasserstrahlpumpe kann mit einem Wasserverbrauch unter 200 l/h bei 3 bis 6 bar Wasserdruck betrieben werden. Damit ist ein konstanter Enddruck von etwa 16 mbar = 16 hPa erreichbar. Das Saugvermögen gegen Atmosphärendruck beträgt rund 400 l/h. Bild: <http://catalog.brand.de/>



Professionelle Pumpsysteme

Mit Drehschieberpumpe, Membranpumpe oder Scrollpumpe kann ein Druck im Bereich von 0.01 bis 1 mbar erzeugt werden.

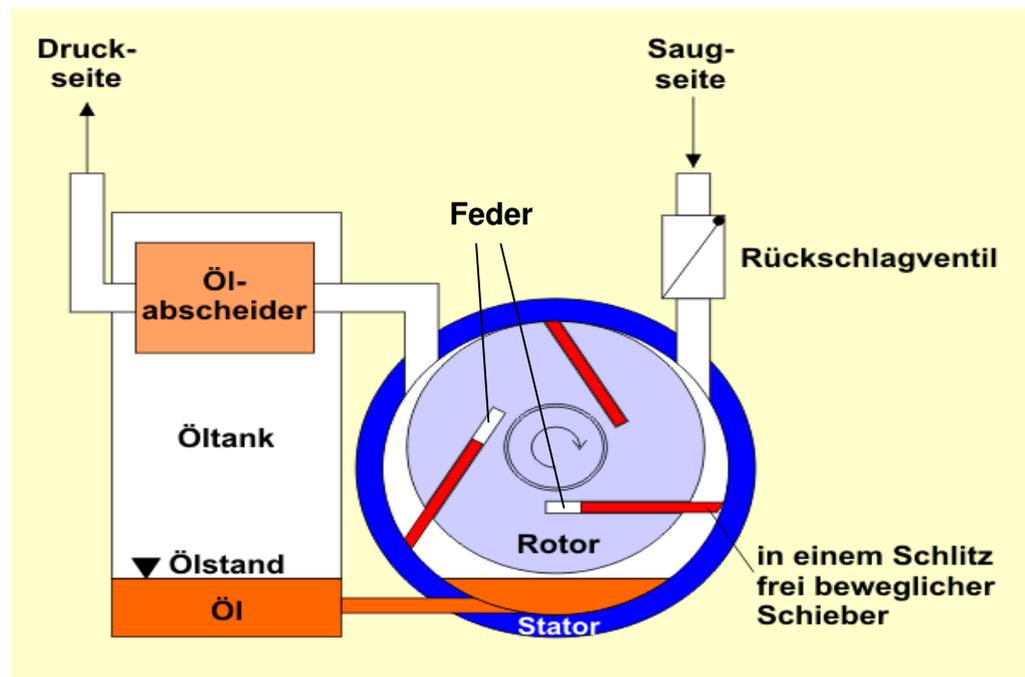


Bild: <http://gutmbh.de/Bilder/Vakuumpumpen/DrehschieberPrinzipOelgeschmiert.gif>

Entscheidend für die Funktion der Drehschieberpumpe ist der exzentrisch zum Stator angeordnete Rotor mit den frei beweglichen Schiebern. Diese Schieber sind mit Federn in den Schlitzen befestigt, die dafür sorgen, dass die Schieber immer an die Statorwand gedrückt werden. Durch die Drehbewegung kann somit pro Drehung 3 mal Luft von der Saugseite in den Pumpraum (weiss) gelangen und anschliessend auf der Druckseite ausgestossen werden. Da die Schieber dabei immer an der Statorwand reiben, muss der Zwischenraum mit Öl geschmiert werden, was Auswirkungen auf die Verwendung der Pumpe hat. Es sollten keine Staub und Flüssigkeitspartikel aus dem Rezipienten abgesaugt werden, da sonst das Öl verschmutzt wird. Der Ölstand ist immer zu kontrollieren. Bei häufiger Anwendung wird ein Ölabscheider empfohlen, weil sonst Ölpartikel in den Raum geblasen werden. Bleibt die Pumpe an den Vakuumbereich angeschlossen, ohne dass sie läuft, besteht zudem die Gefahr, dass das Öl aus der Pumpe in den Vakuumbereich gelangt. Trotz dieser «Nachteile» sind Drehschieberpumpen sehr weit verbreitet.

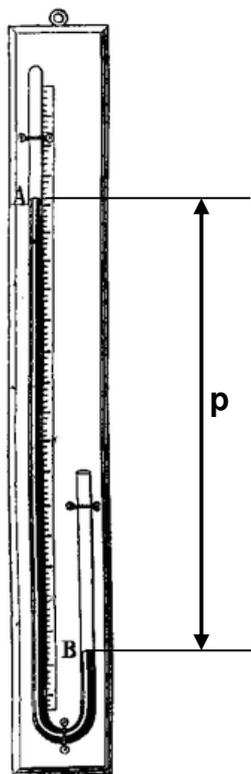
Um ein Ultrahochvakuum zu bekommen, wird mit mechanischen Pumpen (z. B. Drehschieberpumpen) zuerst ein Vorvakuum erzeugt. Das dauert einige Minuten. Dann erzeugen turbinenartige Molekular- und Turbomolekularpumpen in einem mehrere Stunden bis Tage dauernden Prozess ein Hochvakuum

von 10^{-7} mbar. Bei Molekularpumpen wird ausgenutzt, dass auf die Pumpenwand fallende Moleküle eine kurze Zeit an ihr haften. Dabei werden sie von der Wand mitgerissen und in Ausstossrichtung beschleunigt. Wegen des Dampfdrucks von vielen chemischen Verbindungen (z.B. an den Gefässwänden adsorbierter Wasserdampf oder Kohlenwasserstoffe) und Materialien lässt sich der Vakuumdruck nicht mehr ohne spezielle Tricks weiter verringern.

Ultrahochvakuum erreicht man nur mit zusätzlichen Tricks

Um ein Ultrahochvakuum zu erhalten, werden nach Erreichen eines Hochvakuums nicht-mechanische Pumpen, sogenannte Ionengetterpumpen verwendet, in denen die restlichen Gasmoleküle ionisiert und dann mittels angelegter Spannungen bis zu einem Druck von 10^{-7} Millibar «abgesaugt» werden. In dieser Phase lohnt sich ein Ausheizen der ganzen Vakuumkammer, weil dadurch Restmengen von Substanzen, die an den Innenwänden der Vakuumkammer adsorbiert sind, losgelöst und ebenfalls abgepumpt werden können. In Kombination mit Kühlfallen in der Pumpkammer, welche weiteres Restgas durch Kondensation binden, kann der Druck auf 10^{-12} mbar gesenkt werden. Wird die ganze Kammer in flüssiges Helium getaucht (-269°C), sind Drücke von unter 10^{-16} mbar erreichbar.

4.5. Druckmessung und Druckeinheiten



Das **Quecksilberbarometer** basiert auf der Idee des Torricellirohrs (siehe Kap. 4.4).

<http://de.wikipedia.org/wiki/Barometer>

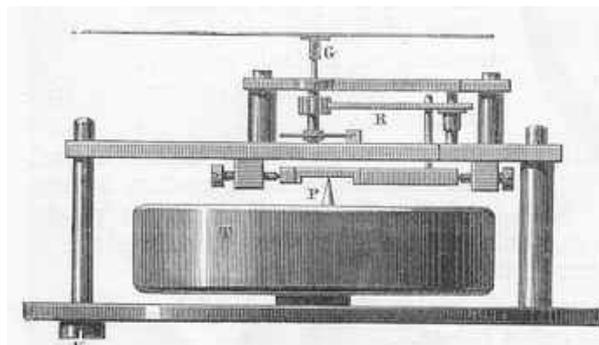
Der rechte oben offene Schenkel ist nur einige cm hoch. Der Atmosphärendruck auf die Quecksilberoberfläche bei B ist gleich gross wie der durch die Quecksilbersäule der Höhe A–B erzeugte Druck p .

«Torr» = «mm Hg»

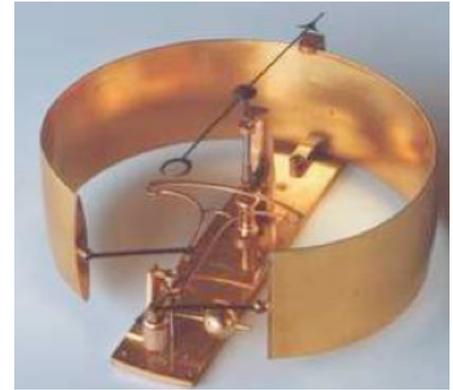
Der Atmosphärendruck beträgt auf Meereshöhe ca. 760 Torr.

Beim **Aneroidbarometer** wird der Deckel einer evakuierten Metalldose durch den Aussendruck deformiert und diese Deformation auf eine Druckanzeige weitergegeben.

www.freunde-alter-wetterinstrumente.de/12barges02.htm



Beim **Röhrenbarometer** sorgt die Differenz zwischen den verschieden grossen Innen- und Aussenflächen des evakuierten Rohres zu einer mechanischen Verformung.



http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph08/umwelt_technik/14_barometer/roehrenbar.jpg

Beim **Pirani-Vakuum-Meter** dient die Wärmeleitfähigkeit von Gasen zur Druckmessung (bei geringen Drücken). Hier wird ein elektrischer Widerstand oder ein Thermoelement durch das Gas gekühlt. Sinkt der Gasdruck, heizt sich der Sensor auf. Aus dessen Temperaturänderung lässt sich dann der Druck bestimmen. Hier wird also genau das Prinzip ausgenutzt, welches beim Glühdrahtversuch im iLab zu sehen war. Im Vakuum heizt sich der Draht aufgrund der fehlenden Kühlung stärker auf und beginnt deshalb zu glühen.

Bei der **Penning-Röhre** und bei **Ionisationsröhren** wird das zunächst elektrisch neutrale Gas durch Stösse mit Elektronen z. T. ionisiert und dann die elektrische Leitfähigkeit der Ionen gemessen. Daraus wird der Gasdruck bestimmt. Solche Sensoren kommen vor allem in Hochvakuum oder Ultrahochvakuumanlagen zum Einsatz.

Literatur: www.tphys.physik.uni-tuebingen.de/muether/physik1/skript/06-05.pdf

Einheiten des Drucks

Die SI-Einheit (Abkürzung für «Système International d'Unités», im amtlichen und geschäftlichen Verkehr verbindliche Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems) zur Messung des Drucks ist das Pascal. Ein Pascal ist ein Druck von einem Newton pro Quadratmeter.

Zur Umrechnung verschiedener gebräuchlicher Druckgrössen in die SI-Einheit Pa (kPa) dient folgende Umrechnungstabelle:

	bar	mbar	Pa (N/m ²)	kPa (kN/m ²)	Torr (mmHg)	PSI	atm
bar	1	1000	100000	100	750,062	14,504	0,9869
mbar	0,001	1	100	0,1	0,750062	0,0145	0,000987
Pa (N/m ²)	0,00001	0,01	1	0,001	0,007501	0,000145	9,869 x 10 ⁶
kPa (kN/m ²)	0,01	10	1000	1	7,501	0,14504	0,00987
Torr (mm Hg)	0,00133	1,333	133,3	0,1333	1	0,0193	0,0013
PSI	0,0690	68,95	6894,8	6,895	51,715	1	0,0680
atm	1,01325	1013,25	101325	101,325	760	14,6959	1

4.6. Druck allgemein

Im Alltag versteht man unter Druck eine ganze Palette unterschiedlichster Dinge. Vom schulischen Leistungsdruck über meteorologische Hoch- und Tiefdruckgebiete oder einem «Druck im Kopf» bis hin zur physikalischen Grösse. Insbesondere das Verb «drücken» und unser Verständnis davon hat einen grossen Einfluss auf unsere Vorstellungen, was Druck sei. Mit dem Verb «drücken» verbinden wir automatisch Bewegungen, respektive dynamische Prozesse. Wie wir in der Folge zeigen werden, ist diese Vorstellung bei unreflektierter Betrachtungsweise irreführend. Dies ist auch im Unterricht zu berücksichtigen. Die Lernenden bringen aus ihrer Alltagserfahrung Präkonzepte in den Unterricht mit. Diese gilt es im naturwissenschaftlichen Unterricht aufzugreifen und, um Misskonzepten vorzubeugen, im Sinne des wissenschaftlichen «common sense» (um) zu deuten.

Wir können uns der physikalischen Druckgrösse sehr wohl vom Alltag her annähern. Aus Erfahrung wissen wir: Wenn eine Kraft von bestimmter Stärke (z. B. 20 N) auf unseren Körper einwirkt, kann die dadurch ausgelöste Schmerzempfindung sehr unterschiedlich sein. Der physikalische Druck lässt sich als Mass für die Grösse dieser Empfindung interpretieren. Grosser Druck bewirkt einen starken Schmerz, kleiner Druck bei gleich grosser Kraft hingegen nur einen kleinen Schmerz! Welche physikalischen Parameter steuern in diesem Zusammenhang die Schmerzempfindung? Es ist die Stärke der Kraft F und die Grösse der «Andrückfläche». «Die Schmerzempfindung p » ist also gross bei grosser Kraft F und kleiner Fläche A und umgekehrt, sie lässt sich mit dem Quotienten $p = F/A$ als Zahl ausdrücken. Der so verstandene Druckbegriff kann durch folgendes Experiment veranschaulicht werden: Ein Bleistift wird zuerst mit seinem flachen Ende, dann mit der Spitze auf die Handfläche gestellt und jedes Mal mit einem Buch belastet. Trotz gleicher Krafteinwirkung ist der Unterschied «himmelschreiend». Alle wissen, was es bedeutet, wenn einem jemand mit Stöckelschuhen statt mit Turnschuhen auf die Füsse tritt.

Wer es genau wissen will: In der theoretischen Physik wird der Druck als Spezialfall einer mechanischen Spannung behandelt. Kräfte, die auf eine Fläche wirken, erzeugen eine Druckspannung, die im allgemeinen Fall aus einer Zugspannung rechtwinklig zur Fläche und aus Schub- oder Scherspannungen, die in der Schnittfläche wirken, zusammengesetzt ist. Die Druckspannung ist keine skalare Grösse, sondern wird mathematisch als «Tensor» bezeichnet. Der statische Druck p in einer Flüssigkeit oder in einem Gas ist ein skalarer Spezialfall davon.

Nach diesen anthropozentrischen Überlegungen folgt nun die physikalische Darstellung:

Definition:

Der statische Druck p ist der Quotient aus der senkrecht auf die Fläche A einwirkenden Kraft F und der Grösse der Flächen A , auf die F wirkt, kurz

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

Der so definierte Druck ist eine physikalische Zustandsgrösse. Eine Zustandsgrösse hängt nur vom momentanen Zustand des betrachteten physikalischen Systems ab und ist unabhängig davon, wie er erreicht oder erzeugt wurde.

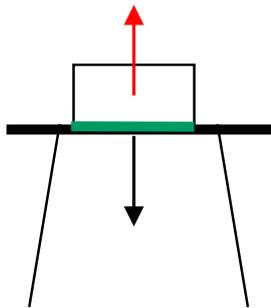
Dynamische Prozesse werden durch **Druckunterschiede**, also durch Unterschiede im Zustand zweier Systeme, ausgelöst. Druckunterschiede führen zu **Kräften**, die die Dynamik des ausgelösten Prozesses beschreiben. Formal kann der Betrag der aus einem Druckunterschied resultierenden Kraft als $F = \text{Druckunterschied} \cdot A = \Delta p \cdot A$ berechnet werden.

Beispiele zur dynamischen Auswirkung von Druckunterschieden in instabilen Systemen

Hinweis: Den Beginn eines Kraftpfeils wollen wir Angriffspunkt nennen. Wenn ein Körper bezüglich der Wirkung einer Kraft als Massenpunkt dargestellt werden darf, wird der Angriffspunkt in den Schwerpunkt des Körpers gelegt. Wenn es eine Rolle spielt, wo eine Kraft an einem Körper angreift, darf der Angriffspunkt entlang der Wirkungslinie der Kraft verschoben werden. Es muss dann aber klar sein, auf welchen Körper die Kraft einwirkt.

Der Druck selber darf nicht mit Pfeilen dargestellt werden. Mit Pfeilen kann allenfalls angezeigt werden, wo und in welche Richtung Druckkräfte wirken. In diesem Fall wird die Pfeilspitze auf die Fläche gesetzt, auf die die Druckkräfte wirken. Solche Pfeile sollen aber nur als Drucksymbole verstanden werden und sind von Kraftpfeilen zu unterscheiden.

- a) Ein Gegenstand mit der Masse m liegt flächendeckend auf einer in der Tischplatte eingelassenen, geschlossenen Falltür (grün). Er übt auf die Falltür eine verformende Kraft (schwarz) aus. Wegen des Wechselwirkungsgesetzes von Newton reagiert die Falltür mit einer gleich grossen Kraft (rot) auf den Gegenstand zurück. Da auf den Gegenstand ja auch die Anziehungskraft der Erde und auf die Tischplatte die Stützkräfte der Tischbeine wirken – diese Kräfte sind in der Skizze nicht eingezeichnet – befinden sich beide Körper (auch relativ zueinander) in Ruhe, also in einer stabilen Situation.

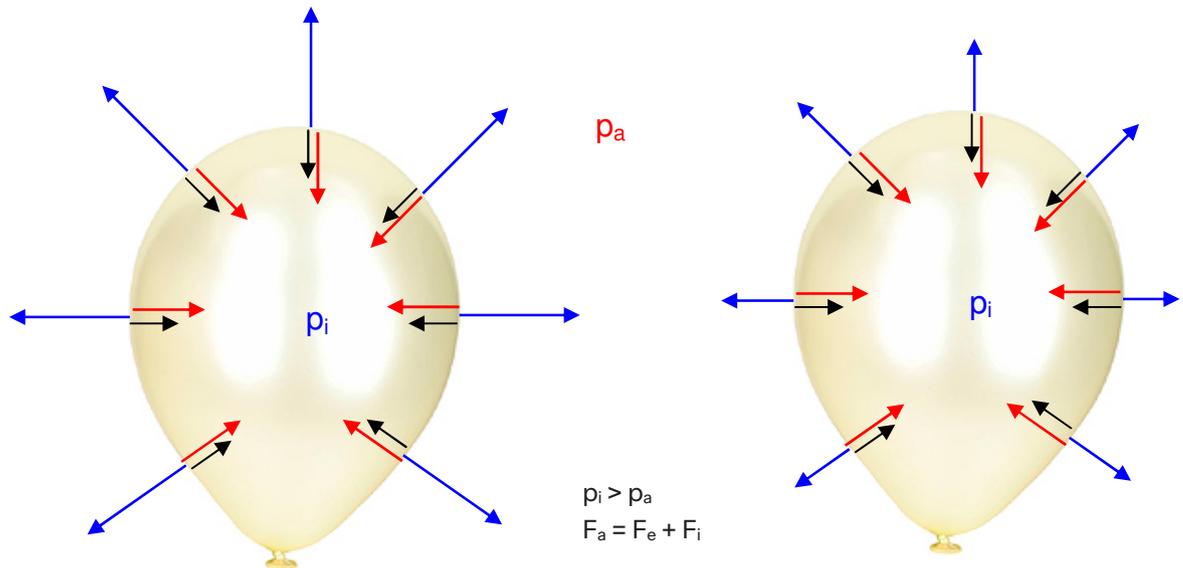


Die Falltür übt über die Kontaktfläche A eine Kraft F der Grösse mg auf den Gegenstand aus, wobei der Ortsfaktor $g = 9,81 \text{ N/kg}$ ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) beträgt. Der Druck p der Falltür auf den Gegenstand beträgt also $p = F/A = mg/A$.

Nun wird die Falltür rasch aufgerissen. Der Druck von ihr auf den Gegenstand nimmt rasant auf 0 N/m^2 ab. Der Druckunterschied Δp beträgt also mg/A . Aus $F = \Delta p \cdot A$ folgt mit $\Delta p = mg/A$ der Betrag der den Gegenstand beschleunigenden Gewichtskraft F , nämlich $F = mg$.

- b) Die Beschreibung eines mit Luft gefüllten Luftballons ist etwas anspruchsvoller. Wird die Ballonöffnung mit den Fingern fest zugeklemmt, strömt weder Luft in den Ballon hinein, noch aus ihm heraus. Im Ballon drin herrscht ein Innendruck p_i , ausserhalb des Ballons der normale Umgebungsdruck p_a . Bei geschlossener Ballonöffnung heben sich alle Kräfte, die auf einen Flächenteil der Ballonhülle wirken, gegenseitig auf. Nach aussen wirken Kräfte F_a als Folge des Innendruckes p_i , nach innen wirken die Kräfte F_i als Folge des Aussendruckes p_a und F_e aufgrund der Elastizität der Hülle. Die Elastizitätskraft der Hülle ist von der Hüllendicke und der Ausdehnung abhängig. Die Grösse des Ballons hängt vom Zusammenspiel dieser Kräfte ab.

Was passiert im Moment der Öffnung des Ballons (siehe Zeichnung nächste Seite)?



Das Balloninnere ist nicht mehr von der Umgebung isoliert. Die Luft wird aus dem Ballon gepresst und der Ballon wird kleiner. Ursache für diesen dynamischen Prozess ist der Druckunterschied $p_i - p_a$, der die aus dem Ballon austretende Luft beschleunigt. Nach dem Bernoullischen Gesetz erhält diese eine Geschwindigkeit v gemäss der Formel $p_i - p_a = \frac{1}{2} \rho v^2$. Wird der Ballon nach kurzer Zeit wieder verschlossen, befindet sich das System in einem neuen Zustand des Kräftegleichgewichts, wobei F_e und F_a aufgrund der kleineren Form des Ballons und des nun verminderten Innendrucks kleiner sind.

4.7. Druck und Teilchenmodell

In Situationen mit festen, starren Objekten (wie beim Gegenstand auf dem Tisch, Kap. 4.6.) ist die Ermittlung des Druckes relativ einfach (solange nur Zugspannungen und keine Scher- oder Schubspannungen eine Rolle spielen). Die Vorkenntnisse auf der Sekundarstufe I reichen meistens zur Beschreibung solcher Zustände aus.

Sobald jedoch Fluide, also **Flüssigkeiten oder Gase**, ins Spiel kommen, wird die Situation komplizierter und die Erfahrungen aus der Alltagswelt können trügerisch sein. Das Teilchenmodell hilft die Sicht auf die Dinge zu schärfen.

4.7.1. Druck in Gasen

a) Grundsätzliches

Seit den Beobachtungen von Robert Brown (1827) versteht man ein Gas oder eine Flüssigkeit modellhaft als Menge kleiner Teilchen, die in zufälliger Weise und unabhängig voneinander durcheinander wimmeln, ohne dass eine makroskopische Gesamtbewegung des Stoffes entsteht. Beim Modell des idealen Gases geht man davon aus, dass die Gasteilchen verschwindend klein sind und wie elastische Kugeln nur bei Zusammenstößen Energie und Impuls austauschen. Wird ein solches Gas erwärmt, erhöht sich die Bewegungsenergie der Gasteilchen. Die innere Energie entspricht in diesem einfachen Fall gerade der

Bewegungsenergie der Teilchen. Die **Temperatur** ist – nur im Falle der idealen Gase – ein Mass für den **Mittelwert der Bewegungsenergie** aller Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Konstante Temperatur heisst, dass sich der Mittelwert der Bewegungsenergie aller Teilchen zeitlich nicht verändert.

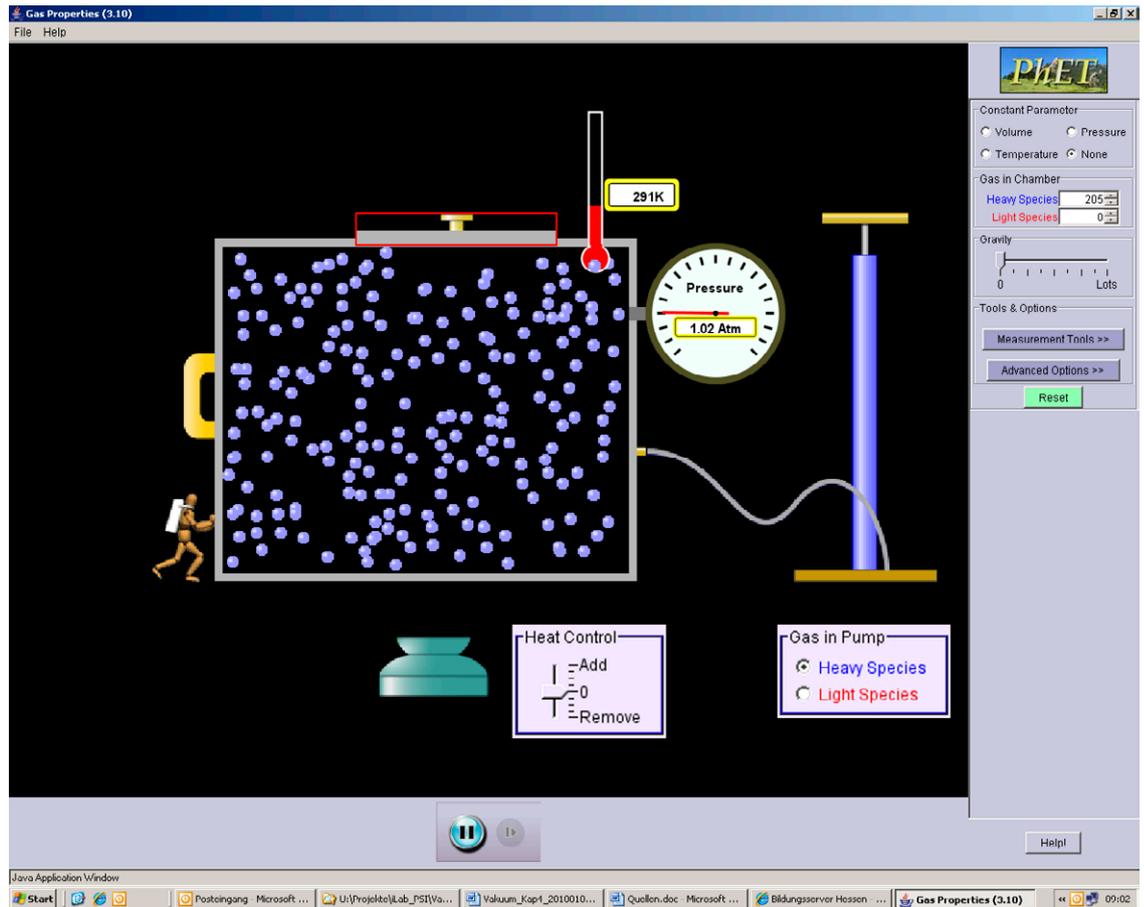


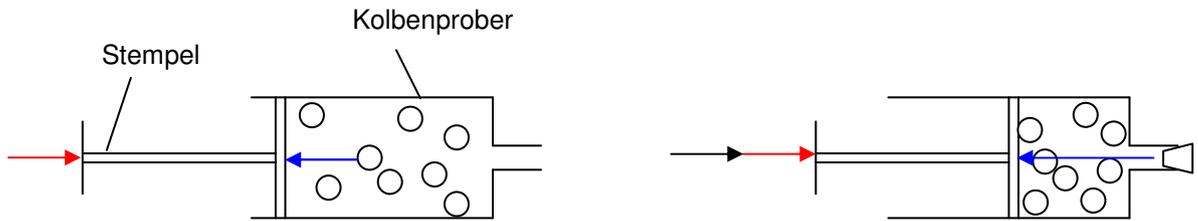
Abbildung: Darstellung eines Gases bei bestimmter Temperatur und Druck. Im Web findet sich diese interaktive Darstellung, bei welcher sich verschiedene Parameter verändern und die resultierenden Effekte beobachten lassen.

Quelle: <http://lernarchiv.bildung.hessen.de/afl/aflphys/29621/index.html>

Wenn die Gasteilchen gegen die Wand des Behälters stossen, üben sie kurzzeitig Kräfte aus. Je öfter die Teilchen anprallen und je schneller und schwerer sie sind, desto grösser ist die auf die Wand wirkende Gesamtkraft. Bleibt der Zustand des Gases über einen bestimmten Zeitraum hinweg unverändert, bleibt diese Gesamtkraft gleich gross. Daraus folgt, dass der Druck ($p = F/A$) konstant bleibt. Dies ist der Grund, weshalb der Druck eine Zustandsgrösse ist, also eine charakteristische Grösse zur Beschreibung des Zustandes eines Gases.

Wird die Temperatur eines idealen Gases erhöht (dies entspricht einer Zustandsänderung), erhöht sich die durchschnittliche Bewegungsenergie der Gasteilchen. Die Teilchen prallen also mit grösserer Geschwindigkeit auf die Wände des Behälters. Das bedeutet, dass bei gleich bleibender Grösse des Behälters der Druck steigt.

Wird die Grösse des Behälters verkleinert (z.B. durch sehr langsames Verschieben einer Seitenwand), wird der Zustand des Gases verändert. Es sind jetzt mehr Teilchen im gleichen Volumen vorhanden. Folglich kommt es häufiger vor, dass die Gasteilchen an die Wände stossen, was zu einer Erhöhung des Drucks führt. Mit einem Kolbenprober oder einer Velopumpe lassen sich solche Effekte zeigen (und spüren!). Bsp.: Wird der Ausgang eines Kolbenprobers verschlossen, kann der Stempel nur durch eine zusätzliche äussere Kraft (schwarzer Pfeil) nach rechts gedrückt und dort in Position gehalten werden:



Innendruck = Aussendruck

Stempel bleibt in Position

Innendruck > Aussendruck

Stempel kann nur durch zusätzliche äussere Kraft (schwarzer Pfeil) in Position gehalten werden

Werden in einer anderen Situation mit Hilfe einer Pumpe oder eines anderen Mechanismus Gasteilchen aus dem Kolbenprober entfernt (ein Vakuum erzeugt), verschiebt sich der Stempel automatisch nach rechts. Durch das Entfernen der Gasteilchen im Kolbenprober sinkt der Druck, und somit wird die Kraft von innen auf den Stempel immer kleiner. Als Konsequenz überwiegt die Kraft, die aufgrund des Luftdrucks von aussen auf den Stempel wirkt. Seit dem Versuch von Otto Guericke (Magdeburger Halkugeln, siehe Kap. 4.2.) ist klar, **dass dies der eigentliche Grund ist, weshalb der Stempel nach innen gedrückt wird! Nicht das Vakuum zieht den Stempel nach innen!**

Dieses Beispiel zeigt, dass der Umgebungsdruck, also im Normalfall der Luftdruck, auf viele Prozesse einen Einfluss hat. Die uns umgebende Luft übt also permanent einen Druck auf uns und alle Objekte aus, auch wenn wir diesen selten spüren und so Gefahr laufen, seine Effekte zu übersehen.

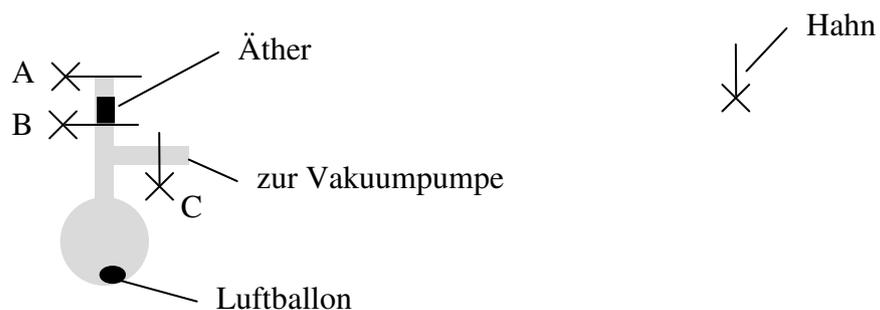
Hinweis: Ähnliche Überlegungen können auch mit realen Gasen gemacht werden. Wichtig dabei ist, dass bei solchen Gasen zwischen Temperatur und innerer Energie kein so einfacher Zusammenhang besteht. Im Falle von Aggregatzustandsänderungen ist die Sache nochmals anders!

Die Experimente mit Kolbenprobern dürfen nicht ungeprüft auf grossräumige Verhältnisse wie etwa die Luftatmosphäre übertragen werden. Luft besitzt ja auch ein Eigengewicht und damit einen beträchtlichen Schweredruck (siehe unter 4.8.).

b) Verdampfen und Kondensieren: Dampfdruck und Sättigungsdruck

Flüssigkeiten weisen einen Dampfdruck auf. Sobald eine Flüssigkeit in Kontakt mit einem Gasraum steht, kann ein Teil der Flüssigkeit verdampfen, bis sich ein (von den Rahmenbedingungen abhängiges) Gleichgewicht einstellt. In der Folge sind einige Versuche beschrieben, welche die wesentlichen Begriffe und Gesetzmässigkeiten in diesem Kontext erläutern.

1. Versuch: flüssiger Äther wird in ein Vakuum gegeben.



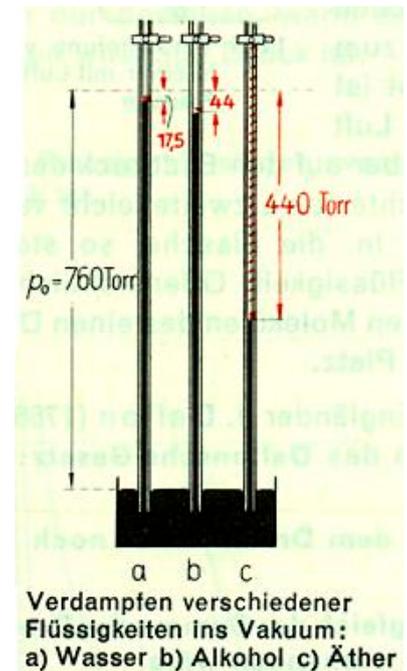
Ergebnis: Die ersten Tropfen verdampfen, weitere Tropfen bleiben flüssig.

In ein evakuiertes Gefäss wird ein Flüssigkeitstropfen (z.B. Äther oder Wasser) gegeben. Dieser verdampft und erzeugt einen Gasdruck im Gefäss. Der Ballon schrumpft. Mit dem Verdampfen weiterer Flüssigkeit steigt der Druck bis zum Sättigungsdruck. Es verdampft nun keine weitere Flüssigkeit mehr.

Erklärung: Die Moleküle einer Flüssigkeit bewegen sich um ihre Ruhelage und stossen deshalb immer wieder an ihre Nachbarn. Diese Wärmebewegung ist schuld daran, dass immer wieder einzelne Moleküle aus der Flüssigkeit hinausgestossen werden und das, obwohl sich die Moleküle in der Flüssigkeit gegenseitig anziehen (Kohäsionskraft). Die aus der Flüssigkeit ausgestossenen Moleküle bilden das Gas über der Flüssigkeitsoberfläche. Je mehr Moleküle im Gasraum herumfliegen, desto häufiger kommt es vor, dass einige davon in die Flüssigkeit zurückkehren. Wenn pro Sekunde gleich viele Moleküle die Flüssigkeit verlassen wie Moleküle in die Flüssigkeit zurück kehren (diese Situation wird als **kinematisches Gleichgewicht** bezeichnet), herrscht **Sättigungsdruck im Gasraum**.

Ein analoges Experiment mit dem Torricellirohr zeigt, dass nicht alle Flüssigkeiten den gleichen Sättigungsdampfdruck besitzen.

Erklärung: Das oben beschriebene kinematische Gleichgewicht wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Kohäsionskräfte, die die Flüssigkeitsmoleküle zusammenhalten. Je grösser diese sind, desto schlechter können einzelne Moleküle die Flüssigkeit verlassen und desto kleiner wird der Sättigungsdampfdruck. Ein Beispiel dafür ist Wasser mit stark polaren Molekülen und relativ kleinem Sättigungsdampfdruck.



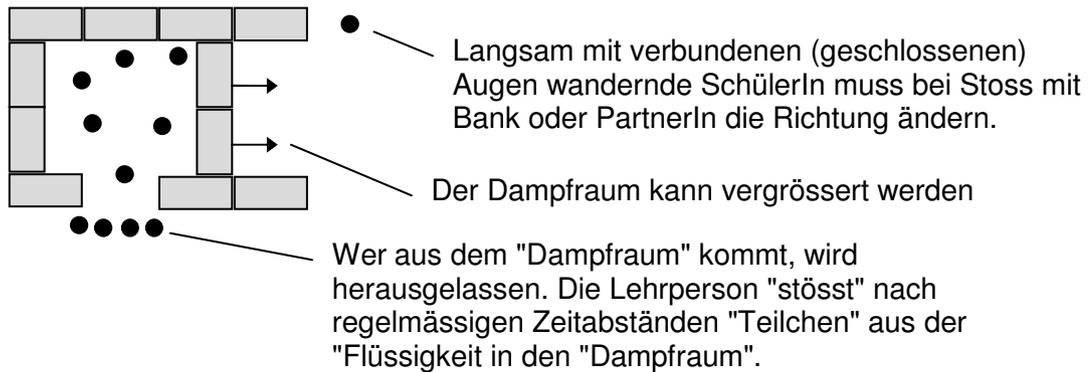
(Bild: Dorn A 133.1)

2. Versuch: Der Bereich zwischen A und B (siehe Abbildung oben) wird evakuiert. Dann wird A geschlossen und B geöffnet. Dadurch wird das Volumen des Dampfraumes vergrößert.

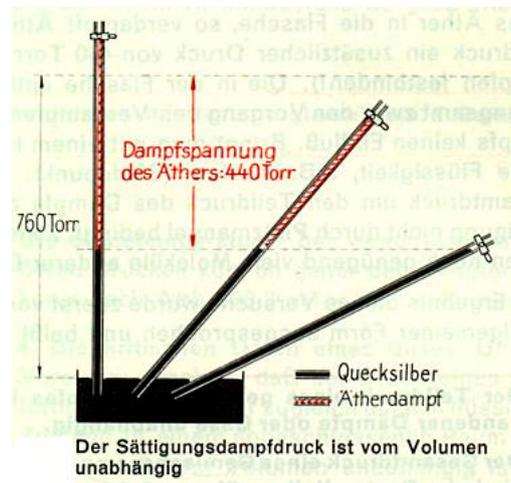
Ergebnis: Falls genügend Flüssigkeit im Kolben war, ändert sich der Druck darin nicht. Der Ballon bleibt gleich gross.

Erklärung: Wenn der Gasraum über der Flüssigkeit vergrößert wird, nimmt vorerst die Gasdichte ab. Deshalb kehren weniger Moleküle in die Flüssigkeit zurück als Moleküle die Flüssigkeit verlassen. Dadurch nimmt die Gasdichte wieder zu bis (**kinematisches**) **Gleichgewicht** herrscht. Wenn das Gasvolumen über der Flüssigkeit verkleinert wird, bleibt der Druck ebenfalls gleich – Dampf wird dabei verflüssigt (kondensiert), d.h. infolge der vorübergehend grösseren Gasdichte kehren mehr Moleküle in den flüssigen Zustand zurück. Der Sättigungsdruck ist also unabhängig von der Grösse des Gefässes.

Durch ein Spiel kann der Begriff des **kinematischen Gleichgewichts** bewusst gemacht werden. Wenn die Geschwindigkeit erhöht wird, kann auch die Wirkung des Druckes (auf die Bänke) veranschaulicht werden

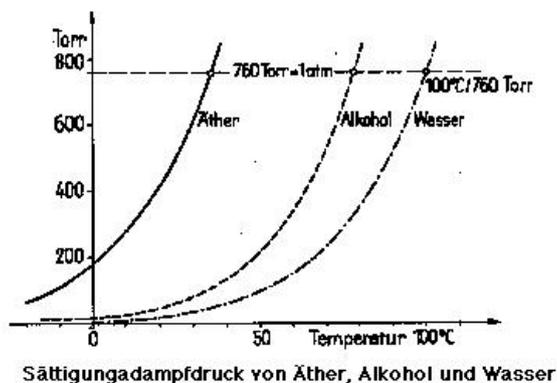


Das gleiche Experiment mit dem Torricellirohr :
(Bild: Dorn A 133.2)



3. Versuch: Der Sättigungsdruck hängt von der Temperatur des Systems (Flüssigkeit und Gas) ab.

Erklärung: Die Flüssigkeit wird zusammengehalten, weil sich die Moleküle gegenseitig anziehen, wenn sie sehr nahe beieinander sind (Kohäsion). Bei Wärmezufuhr erhalten die Moleküle der Flüssigkeit zusätzliche Bewegungsenergie. Es werden also mehr Moleküle aus der Flüssigkeit ausgestossen. Der Gasraum wird verdichtet, es gibt mehr Stösse auf die Wände, der Druck steigt.



(Bild: Dorn A 133.3)

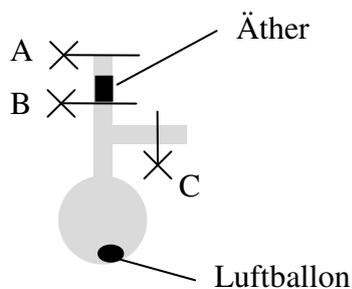
4. Versuch: Der Dampfraum über flüssigem Äther wird abgesaugt. Im iLab wurde dieser Versuch mit Wasser gemacht.

Folgen: Abkühlung, Eisbildung an Oberfläche, Sieden.

Erklärung: Die Temperatur einer Flüssigkeit ist eine Folge der Wärmebewegung ihrer Moleküle. Da beim Verdampfen die schnellen Moleküle die Flüssigkeit zuerst verlassen, sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit der verbleibenden Moleküle, die Temperatur fällt, die Flüssigkeit kühlt aus. Das kann bis zu Eisbildung führen.

Wenn der Druck auf die Flüssigkeitsoberfläche stark abnimmt, können auch in ihrem Inneren kleine Dampf Räume – Siedebblasen – entstehen und zwar unterhalb des Siedepunktes bei Normaldruck. Da der Schweredruck des Wassers gegen unten zunimmt, entstehen diese Blasen im oberen Bereich der Flüssigkeit und steigen dann in den Dampfraum auf. **Der Siedepunkt einer Flüssigkeit ist also abhängig vom Umgebungsdruck!**

5. Versuch:

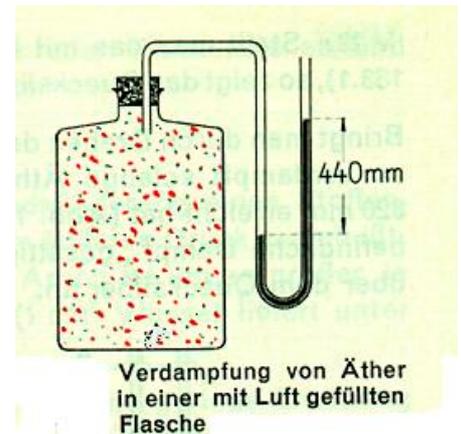


Der Kolben wird über C mit Luft gefüllt. C wird geschlossen. Über B lassen wir Äther einströmen, dann schliessen wir B.

Ergebnis: Der Druck steigt.

Erklärung: Der Äther verhält sich gleich wie vorher (siehe 1. Versuch) im Vakuum und das, obwohl bereits Luft im Gasraum ist und damit der verfügbare Gasraum kleiner ist. Von oben wissen wir, dass der Sättigungsdruck nicht verändert wird, wenn wir das Gasvolumen verkleinern. Wenn wir zusätzlich eine andere Flüssigkeit zufügen, steigt der Druck nochmals an und zwar um die Grösse des Sättigungsdrucks der neuen Flüssigkeit.

Das gleiche Experiment nach Dorn A 134.1



Wenn wir dieses Ergebnis auf den **Luftraum über einem See** übertragen, stellen wir fest, dass Wasserdampf aus dem See nicht «von der Luft aufgenommen» wird, bis «die Luft gesättigt ist». **Der Dampf wird vom Raum aufgenommen** und zwar so lange, bis zwischen dem flüssigen Wasser und dem Wasserdampf darüber ein kinematisches Gleichgewicht herrscht. Da die Luft die Temperatur der Wasseroberfläche (oder der Nebeltröpfchen z.B. in den Wolken) und des Wasserdampfs beeinflusst, hängt der Sättigungsdruck des Wassers von der Lufttemperatur ab. Von daher stammt die unkorrekte Aussage: «Warme Luft kann mehr Wasser aufnehmen als kalte.» Korrekt wäre: «Die Dichte des Wasserdampfs hängt von seiner Temperatur und von der Temperatur des flüssigen Wassers ab.»

Die Wassermasse, die in einem Kubikmeter (Luft-)Raum vorhanden ist, heisst **Absolute (Luft-) Feuchtigkeit**. Die **Relative (Luft-)Feuchtigkeit** ist der Quotient aus der Absoluten (Luft-)Feuchtigkeit und der Wassermasse in einem Kubikmeter bei gleicher Temperatur im Falle der Sättigung.

Übersättigter (Luft-)Raum neigt zu Kondensation (Tröpfchenbildung). Kondensation kann aber erst eintreten, wenn Kondensationskerne (z.B. Staubpartikel, Verbrennungsrückstände aus Triebwerken oder Kaminen) vorhanden sind. Wenn in der Nacht der Boden durch Abstrahlung auskühlt, wird der Wasserdampf im Luftraum darüber kälter und – wenn er schon vorher gesättigt war – übersättigt. Der überschüssige Wasserdampf kondensiert als **Tau**. Die Temperatur bei der Tau möglich wird, heisst **Taupunkt**.

Die Luftfeuchtigkeit wird mit dem Hygrometer gemessen. Das Haarhygrometer benützt den Umstand, dass Haare infolge der Feuchtigkeit länger werden. (Bei Seilen ist das gerade umgekehrt – nass gewordene Knoten lassen sich nicht mehr gut lösen.)

c) Gasteilchen – Moleküle

Sie sind die kleinsten Teilchen eines Stoffes, die sich durch mechanisches Zerschneiden, Lösen oder Verdampfen nicht weiter zerkleinern lassen. Das heisst, die in Gasen umherschwirrenden Teilchen sind in der Regel Moleküle (Ausnahmen siehe unten).

Die Durchmesser der Moleküle sind meistens kleiner als 10^{-9} m.

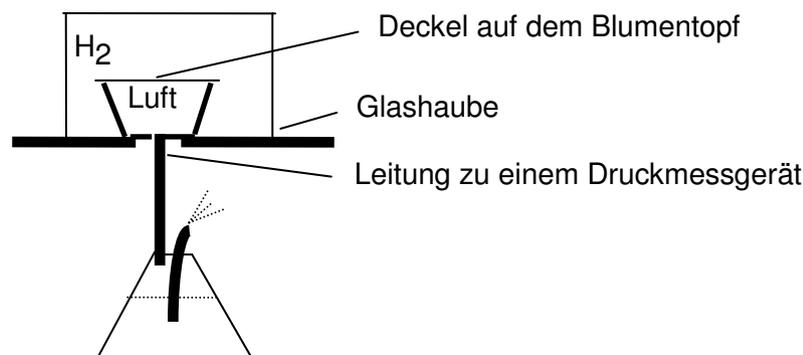
Das Wasserstoffmolekül H_2 besitzt eine Masse von $3,3 \cdot 10^{-27}$ kg. Ein Kubikmeter Gas im Normalzustand enthält $2,7 \cdot 10^{25}$ Moleküle. (Wenn wir diese grosse Anzahl Moleküle auf ein Meer verteilen, das die ganze Erdkugel gleichmässig mit 1 km Tiefe bedeckt, kämen davon auf jeden Liter Wasser 2,2 Millionen Moleküle!).

Die Moleküle berühren sich nicht direkt, sondern sind noch durch Zwischenräume getrennt. Bei Volumenveränderungen werden nur diese Zwischenräume vergrössert oder verkleinert, die Moleküle selber bleiben unverändert. Die Moleküle sind aus Atomen zusammengesetzt, welche durch chemische Bindungen zusammengehalten werden. Stoffe, die aus lauter Atomen der gleichen Sorte zusammengesetzt sind, heissen Elemente. Die Edeltasteilchen sind einatomig, ebenso die Metaldämpfe. Hier sind die Gasteilchen also einzelne Atome. Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Chlor sind zweiatomig.

Moleküle lassen sich mit dem Lichtmikroskop nicht sichtbar machen, da Licht als Beobachtungsinstrument «zu grob» ist (d.h. die Lichtwellenlänge ist viel grösser als der Durchmesser der Moleküle). Indirekt lässt sich ihre Existenz mit dem bereits erwähnten Experiment «Brownsche Bewegung» zeigen. Dabei werden z.B. Zigarettenrauch-Partikel in der Luft oder eine Milchmulsion mit einer 100fachen Vergrösserung beobachtet. Die Rauchpartikel werden von den Luftmolekülen, die Milchtröpfchen von den Wassermolekülen in Zitterbewegung versetzt, die sich beobachten lässt.

Obwohl Brommoleküle unter dem Lichtmikroskop unsichtbar sind, können wir Bromdampf sehen. (Es genügt, einen Tropfen Brom in ein Reagenzglas zu geben).

Dass Moleküle je nach Stoffart unterschiedlich gross sind, kann mit einem unglasierten gebrannten Ton- topf gezeigt werden.



Der Druck im Blumentopf steigt zuerst, dann nimmt er langsam wieder ab. Der Druck kann mit einem U-Rohr-Manometer durch das Loch des Blumentopfes gemessen werden.

Erklärung: Die kleinen Wasserstoffmoleküle durchwandern die Poren des gebrannten Tones rascher als die grossen Stickstoffmoleküle der Luft.

d) Kräfte zwischen Molekülen

Zwischen den Molekülen wirken normalerweise anziehende Kräfte. Es handelt sich dabei um elektrische Kräfte. Mit abnehmendem Abstand der Moleküle werden diese Anziehungskräfte zwar immer grösser, aber es treten bei kleinem Abstand auch Abstossungskräfte auf, welche bei sehr kleinem Abstand rasch wachsen. Deshalb bleiben die Moleküle auf Distanz zueinander. Sind die Moleküle weit von einander entfernt, nehmen die Molekularkräfte rasch ab, der Zusammenhalt geht verloren. Die Molekularkräfte wirken innerhalb einer Kugel von rund 50 Moleküldurchmessern um das Molekül. Bei grösseren Abständen sind sie fast nicht mehr nachweisbar. Kräfte zwischen Molekülen unterschiedlicher Stoffe heissen **Adhäsionskräfte**, Kräfte zwischen den Molekülen des gleichen Stoffes hingegen **Kohäsionskräfte**.

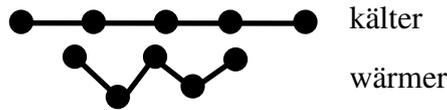
Die Moleküle zweier Bruchflächen lassen sich nicht so nahe zueinander bringen, dass sie haften bleiben. Die Zwischenräume können aber durch eine später härtende Flüssigkeit (Leim) aufgefüllt werden. Die Leimmoleküle stellen dann durch ihre eigenen Molekularkräfte die Verbindung wieder her. Zwischen Leim und Bruchmaterial wirkt Adhäsion, im Leim selber Kohäsion.

e) Aggregatzustände

Bei vielen Körpern sind die Kohäsionskräfte so stark, dass sie eine unveränderliche, bei den Kristallen sogar eine völlig regelmässige gegenseitige Anordnung der Moleküle erzwingen: Der Stoff befindet sich im festen Aggregatzustand. (Gegenbeispiel: Glas zeigt in gewisser Hinsicht das Verhalten von Flüssigkeiten, auch wenn es fest ist. Im festen Zustand ist seine Struktur nicht kristallin, sondern amorph).

Bei Wärmezufuhr werden die Moleküle gezwungen, sich rascher um ihre Ruhelage zu bewegen. Sie stossen heftiger gegen einander und schaffen sich so immer mehr eigenen Raum.

Folgerung: Viele Körper erfahren eine Volumenausdehnung beim Erwärmen (Gegenbeispiel: Gummi besteht aus fadenartigen Molekülen. Diese verkürzen sich, wenn sich die zu Fäden aufgereihten Atome mehr Platz verschaffen).



Die Moleküle vieler Stoffe werden bei weiterer Energiezufuhr gegeneinander verschiebbar, die Stoffe werden flüssig. (Gegenbeispiel: Holzmoleküle sind so verschachtelt, dass sie durch Energiezufuhr – noch bevor sie sich gegenseitig verschieben lassen – zerstört werden).

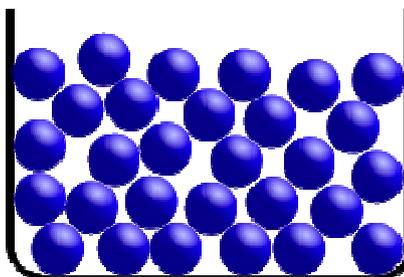
Bei weiterer Energiezufuhr lösen sich die Moleküle ganz aus ihrem Zusammenhang. Der Stoff wird gasförmig. (Gegenbeispiel: Verschiedene Kunststoffe besitzen Moleküle, die sich nicht verflüchtigen lassen. Sie werden vorher zerstört).

Die drei oben beschriebenen Materiezustände heissen Aggregatzustände.

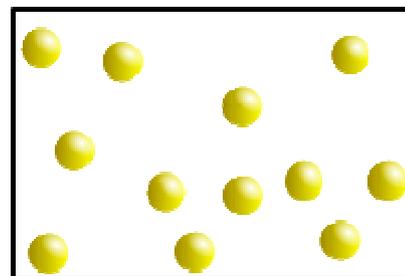
Wird ein Stoff (bei sehr hohen Temperaturen) eines Teils seiner Elektronen beraubt, kann er in einen weiteren Zustand kommen, er wird Plasma genannt (z.B. Lichtbogen beim Schweißen). Voll ionisierte Plasmen bestehen aus Atomen, die vollständig von ihren Elektronen getrennt sind. In solchen Plasmen sind Kernfusionen möglich (10⁷ bis 10⁸ K). Natürliche Plasmen existieren im Innern von Sternen.

4.7.2. Druck in Flüssigkeiten

Die Situation in Flüssigkeiten unterscheidet sich in einem wesentlichen Punkt von derjenigen in idealen Gasen. Da sich in einer Flüssigkeit die Teilchen gegenseitig berühren, sind Flüssigkeiten nicht komprimierbar (ausser bei sehr hohem Druck, dies ist aber für die folgenden Betrachtungen bedeutungslos). Die Berechnung des Drucks, der durch eine Flüssigkeit ausgeübt wird, geht somit ähnlich wie bei Feststoffen. Der Druck kann aber im Unterschied zu Feststoffen relativ einfach auch im Innern einer Flüssigkeit bestimmt werden.



Flüssigkeit

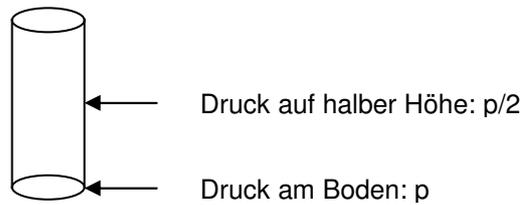


Gas

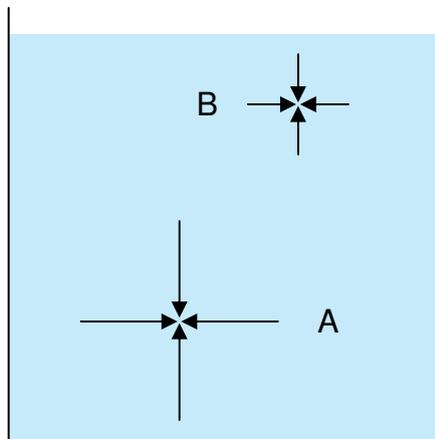
Der Innendruck einer Flüssigkeit in einem offenen Gefäß ist durch den Atmosphärendruck und durch den eigenen Gewichtsdruck der Flüssigkeit bestimmt. Der Atmosphärendruck hängt von der Höhe über Meer ab (siehe Kap. 4.8).

Gewichtsdruck von Flüssigkeiten (Hydrostatischer Druck)

In einem Gefäss, welches mit Wasser gefüllt ist, ist der Druck am Boden am grössten, weil dort die Gewichtskraft der gesamten Flüssigkeitssäule wirkt. Auf halber Höhe wirkt nur noch die Gewichtskraft der halben Flüssigkeitssäule, also ist auch der Druck nur noch halb so gross.



Der hydrostatische Druck ist eine skalare Grösse und damit richtungsunabhängig. Die aus ihm sich ergebenden Kräfte wirken an jeder Stelle gleich stark in alle Richtungen, also auch auf jede Seite und nach oben. Dies kann mit dem Teilchenmodell erläutert werden. Der Druck wird, analog zur Situation in Gasen, durch Stösse der sich regellos und ungeordnet bewegenden Teilchen verursacht – und gestossen wird **in alle Richtungen**. Dass dies tatsächlich so ist kann man jederzeit spüren. Wenn man den Kopf so hält, dass ein Ohr Richtung Himmel, das andere Richtung Boden gerichtet ist, spüren wir in beiden Ohren (Trommelfellen) den gleichen Druck. Das heisst von unten wirkt der gleiche Luftdruck wie von oben (weil die Höhendifferenz zwischen den Ohren zu klein ist).



Die Grösse des Drucks in einer Flüssigkeit (symbolisch mit Pfeilen dargestellt) ist abhängig von der Tiefe (A, resp. B) unter der Oberfläche. Beachte, dass sich der Druck in alle Richtungen gleich stark auswirkt.

4.8. Luftdruck

Der Luftdruck kommt durch die Gewichtskraft FG der auf einer Fläche A lastenden Luftsäule der Masse m zustande. Betrachtet man die ganze Atmosphäre und nicht nur ein kleines Gasvolumen wie im Kapitel 4.7.1., muss das Gewicht der weiter oben liegenden Luftschichten berücksichtigt werden. Dadurch entsteht eine ähnliche Situation wie in Flüssigkeiten (siehe Kapitel 4.7.2.). Der Druck ist von der Höhenlage abhängig. Anders als bei Flüssigkeiten verändert sich in der Luft je nach Druck auch die Dichte, weil Gase komprimierbar sind. Das heisst die Gasteilchendichte der Luft in Bodennähe ist grösser als in höher gelegenen Luftschichten, weil diese aufgrund ihres Gewichts Druck auf die darunter liegenden Luftschichten ausüben.

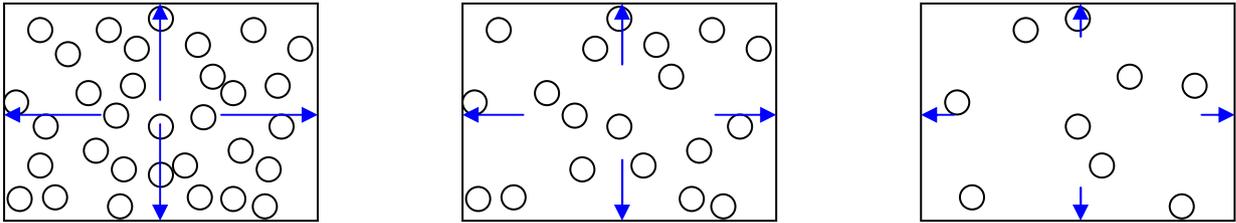


Abbildung: Modellhafte Darstellung eines Ausschnittes aus der Atmosphäre in Bodennähe (links), in mittlerer Höhe (Mitte) und in grosser Höhe (rechts, z. B. auf 10000 m.ü.M.). Die Pfeile symbolisieren den Druck, welcher mit abnehmender Höhe kleiner wird.

Auf Meeresebene beträgt der Luftdruck im Jahresmittel 1013 hPa (= 101300 Pa). Das bedeutet, dass die über 1cm² lastende Luftsäule von der Erdoberfläche bis zum oberen Rand der Atmosphäre eine Masse von 1.03 kg hat. Auf jeden cm² unserer Körperoberfläche drückt also eine Last, die etwa dem Gewicht eines Körpers mit der Masse 1kg entspricht – und zwar von oben, von unten und von der Seite und ohne, dass wir etwas davon merken!

Luftgewicht

Dass Luft selber Raum einnimmt und ein Gewicht hat zeigt ein Versuch, bei dem ein Glaskolben auf einer Präzisionswaage evakuiert wird. Dabei kommt heraus, dass 1l Luft bei 20°C und p = 1 bar ca. 1.2 g wiegt (ca. 1 Tausendstel des Gewichts von Wasser). Das entspricht etwa $2,4 \cdot 10^{22}$ «Luftteilchen».

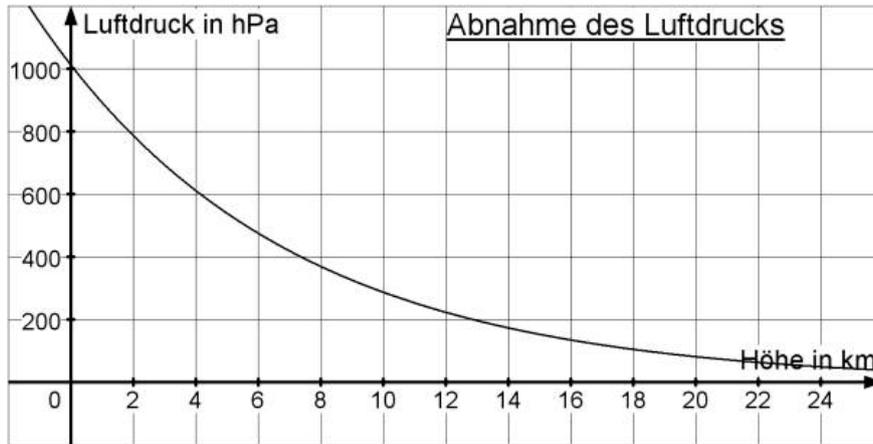
Höhenabhängigkeit des Luftdrucks

Um wie viel nimmt der Luftdruck mit der Höhe ab? Betrachten wir in der Luftsäule eine Luftschicht der Dicke Δh und der Masse Δm . In den unter ihr liegenden Schichten ruft diese Luftschicht eine Druckzunahme Δp hervor:

$$\Delta p = \frac{\Delta m \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot g \cdot A \cdot \Delta h}{A} = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Man kann mit dieser Formel berechnen wie dick eine Luftschicht sein muss, damit sie unter sich eine Druckzunahme von 1 hPa hervorruft. Es ergibt sich eine Dicke von 8.5 m. Dabei haben wir vorausgesetzt, dass die Dichte der Luft in dieser Schicht konstant ist. Der eingesetzte Wert für die Dichte $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ entspricht der Dichte von Luft am Erdboden. Das bedeutet, dass man mit einem Druckmessgerät (Manometer), welches eine Druckdifferenz von 1 hPa nachweisen kann, in einem Gebäude die Veränderung des Luftdruckes messen kann, wenn man sich vom Keller in das 1. oder 2. Obergeschoss begibt! Solche Manometer lassen sich mit einfachen Mitteln bauen (siehe Kapitel 2.2.a)

Da die Dichte der Luft mit zunehmender Höhe abnimmt (siehe oben), nimmt der Luftdruck mit zunehmender Höhe immer langsamer ab.



Grafik aus: <http://www.stromberg-gymnasium.de/unterricht/faecher/ph/stroemungsphysik/druck.htm>

Aus der Grafik wird auch ersichtlich, dass die Atmosphäre keine klar definierte obere Grenze hat. Die Dichte (und somit der Luftdruck) nimmt mit zunehmender Höhe allmählich ab bis der Druck in einigen 1000 km Höhe dem Druck (besser Vakuum) des interplanetaren Raumes entspricht.

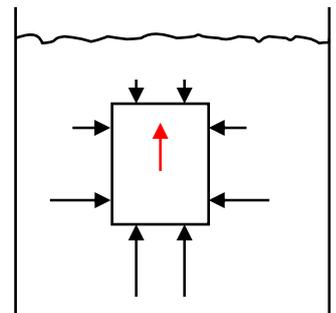
4.9. Auftrieb

Die Erläuterungen in den Kapiteln 4.7. und 4.8. machen deutlich, dass das Phänomen des Auftriebs in allen Fluiden auftreten kann, in Gasen ebenso gut wie in Flüssigkeiten. Es ist das gleiche physikalische Prinzip, welches Schiffe vor dem Untergang bewahrt und Ballons durch die Lüfte schweben lässt: der Auftrieb.

Definition: Der Auftrieb ist die Kraft, mit der ein Fluid wegen des oben und unten unterschiedlichen Schweredruckes auf einen darin eingetauchten Körper wirkt.

Die Auftriebskraft ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit, respektive des verdrängten Gases (auch als **Archimedisches Prinzip** bezeichnet). Das lässt sich für den Spezialfall eines wie im Bild dargestellten völlig in eine Flüssigkeit der Dichte ρ eingetauchten Quaders zeigen:

Es fällt auf, dass sich die seitlichen Kräfte, die aufgrund des in gleicher Tiefe gleich grossen Schweredruckes gegenseitig aufheben. Die Kräfte, welche in der Vertikalen wirken heben sich hingegen nicht auf. Die von unten wirkenden Kräfte sind grösser als die von oben und es resultiert eine nach oben wirkende Kraft, die Auftriebskraft (roter Pfeil). Ist die Gewichtskraft, welche auf den Quader wirkt grösser als diese Auftriebskraft, sinkt der Quader. Ist sie kleiner steigt der Quader. Würde der Quader aus dem gleichen Material bestehen wie die Flüssigkeit, gäbe es keinen Grund für ihn zu steigen oder zu sinken, sondern er würde wie ein Flüssigkeitsvolumen an dieser Stelle schweben. In diesem Fall ist die Gewichtskraft genau gleich gross wie die Auftriebskraft. Mit anderen Worten, die Auftriebskraft F_A entspricht betragsmässig exakt dem Gewicht mg , des dem Quader entsprechenden Flüssigkeitsvolumen V . Da $m = \rho \cdot V$ (ρ = Dichte der Flüssigkeit) ist, gilt: $F_A = \rho \cdot V \cdot g$



In einem Gas ist die Situation ähnlich. Allerdings ist die Dichte eines Gases deutlich kleiner als die einer Flüssigkeit, wodurch der Auftrieb kleiner wird. Dies erklärt warum relativ kleine Schiffe bereits grosse Lasten transportieren können, ein grosser Ballon aber trotz leichter Baumaterialien nur wenige Passagiere befördern kann.

Experimente zum Auftrieb mit einer Balkenwaage

Wird eine Balkenwaage mit zwei Körpern unterschiedlichen Volumens – z.B. eine Bleikugel und ein Styroporklotz – ins Gleichgewicht gebracht und anschliessend (unter einer Vakuumlöcke) die Umgebungsluft um die Waage herum weggepumpt, verringert sich der Auftrieb. Das bringt die Balkenwaage aus dem Gleichgewicht. Der voluminöse Körper sinkt, da hier mehr Auftrieb verloren geht als beim Körper mit dem kleineren Volumen.

Wird eine Balkenwaage mit zwei identischen Körpern ins Gleichgewicht gebracht und anschliessend einer der Körper in ein Wasserbad eingetaucht (durch Anheben eines Wasserbades von unten), gerät die Waage aus dem Gleichgewicht. Der Auftrieb im Wasser ist grösser als in der Luft, wodurch der Balken auf der Seite mit dem Wasserbad nach oben ausschlagen wird. Wie kann die Balkenwaage wieder ins Gleichgewicht gebracht werden?

Lösung: Auf der anderen Seite genau soviel Gewicht wegnehmen, wie das Gewicht des Wassers beträgt, das der in die Flüssigkeit getauchte Körper verdrängt.

5. Literaturverzeichnis

Die Quellen zum Bildmaterial sind jeweils direkt bei den Abbildungen aufgeführt. Zudem finden sich auch einzelne Hinweise auf Webseiten mit Animationen oder anderem interaktivem Material. Natürlich kann es vorkommen, dass im Laufe der Zeit solche Links nicht mehr aktuell sind, oder ins «Leere» führen. Die Autoren haben darauf keinen Einfluss.

In der Folge sind einige Lehrbücher, Webseiten, Broschüren, etc. aufgeführt, welche die hier vorgestellte Theorie abdecken. Diese haben uns als Grundlage bei der Entwicklung des Berichtes gedient:

Lehrmittel

Dorn, Bader; *Physik, Gymnasium Gesamtband*; Schroedel, Braunschweig (2007)
Halliday; *Physik*, WILEY-VCH (2003)
Litz; *Urknall*; Klett und Balmer, Zug (2007)
Metzler; *Physik*; Schroedel (2008)
Physik Oberstufe, Gesamtband; Cornelsen, Berlin (2005)
Seiler, Hardmeier; *Lehrbuch der Physik*; Polygraphischer Verlag, Zürich (1975)
Tipler; *Physik*; Spektrum akademischer Verlag, Heidelberg (1994)
Walz; *Physik*, Schroedel (1974)

Internet

<https://lernarchiv.bildung.hessen.de/sek/index.html>
<http://leifi.physik.uni-muenchen.de>
www.freunde-alter-wetterinstrumente.de

Nachbearbeitung Vakuum, 7/2025

Paul Scherrer Institut PSI

Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI
Schweiz
www.psi.ch

PSI iLab

+41 56 310 55 40
ilab@psi.ch
[www.psi.ch/de/visit/
angebot-fuer-schulen](http://www.psi.ch/de/visit/angebot-fuer-schulen)