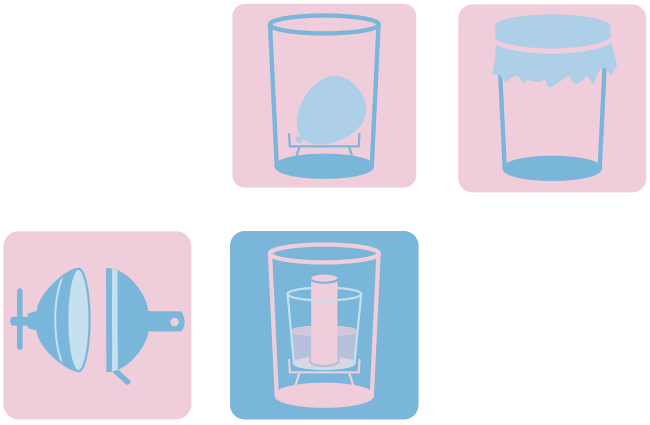
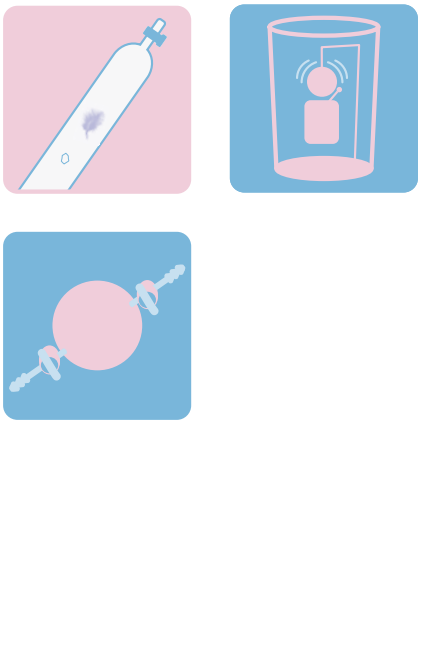
Vakuummappe

physik.begreifen



physik.begreifen
HAMBURG
Vakuumlabor

http://physik-begreifen.desy.de



HELMHOLTZ
GEMEINSCHAFT

DESY

Hinweise

Allgemeines

- Lasst euch Zeit bei den Versuchen.
  Ihr braucht nicht alle Versuche durchzuführen, die Reihenfolge ist nicht festgelegt.

- Nutzt die Bücher und diese Theoriemappe zur Problemlösung.

- Fragen dürfen immer gestellt werden.

- Nach vorheriger Rücksprache könnt ihr gerne eigene Versuchsideen ausprobieren.

Sicherheit

- Bei sachgerechtem Gebrauch (sogar durch Schüler) kann nichts kaputt gehen.

- Achtet auf die Plexiglasbehälter (Rezipienten).
  Sie dürfen nicht fallengelassen, zerkratzt oder sonstwie beschädigt werden. Wenn euch Schäden auffallen, solltet ihr unbedingt einen Betreuer informieren.

- In die Pumpen darf kein Dreck, Müll oder sonstige Gegenstände gelangen.

© physik.begreifen, DESY

Inhaltsverzeichnis

4 Was ist Vakuum?
5 Was ist Luft?
6 Was ist Luftdruck?
9 Was ist Schall?
10 Was ist Wärme?
11 Was ist Schwerkraft?
12 Was ist Schwerelosigkeit?
13 Was ist Dichte?
14 Was ist Auftrieb?
15 Was sind Aggregatzustände?
17 Geschichte des Vakuums
21 Vakuum im Alltag
24 Grundaufbau der Experimentierplätze
25 Prinzip einer Membranpumpe
26 Prinzip einer Drehschieberpumpe
27 Verwendete Vakuummessgeräte
28 Vakuumübersicht
29 Maßeinheiten und Zehnerpotenzen
30 Luftbestandteile und Luftdichte
31 Vakuumpumpen

© physik.begreifen, DESY

Was ist Vakuum?

Wenn man den Begriff „Vakuum“ benutzt, denkt man im allgemeinen an einen luftleeren oder genauer ausgedrückt materiefreien Raum, wie es sich ja schon aus der Bedeutung des Wortes ergibt. Schließlich heißt „vacuus“ auf deutsch frei oder leer. Für die Praxis ist diese Definition jedoch nicht ausreichend, denn sie beschreibt nur das so genannte ideale oder absolute Vakuum, eine Vorstellung, die in der Realität nicht verwirklicht werden kann. Trotz ausgefeilter Technik sowie ständiger Fortschritte in der Pumpenentwicklung und des Einsatzes verschiedener Pumpen ist es nicht möglich, aus einem Raum alle Teilchen zu entfernen.

Habt ihr schon gewusst...

... dass das Vakuum im Universum nicht perfekt ist. Es beinhaltet immer noch einige Wasserstoffmoleküle pro Kubikmeter.

In der experimentellen Physik muss das Vakuum also praktikabler definiert werden. Damit alle Physiker und Ingenieure, die diesen Begriff verwenden, auch das gleiche darunter verstehen, hat das Deutsche Institut für Normung die Definition des Begriffs Vakuum festgelegt.

In der DIN-Norm 28.400 steht:

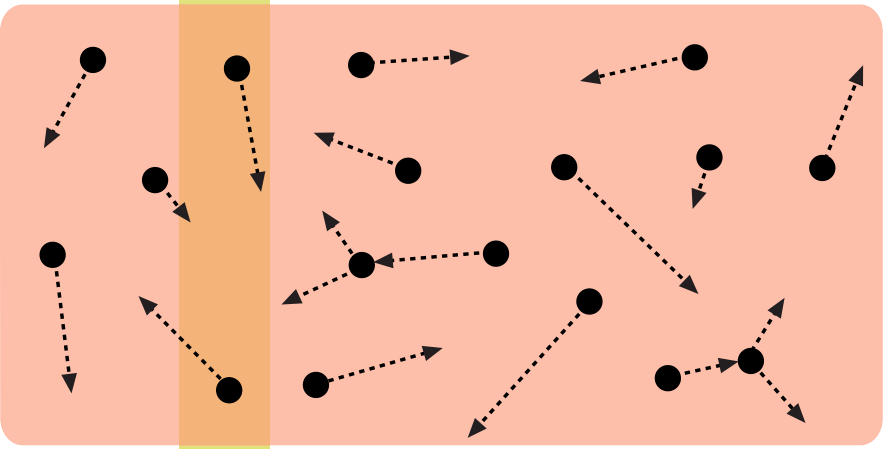
„Vakuum heißt der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d.h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck“.

Nach dieser Definition kann man schon von einem Vakuum sprechen, wenn nur ein kleiner Teil der Luft aus dem Behälter abgepumpt worden ist. Dann ist der Innendruck schon geringer als der Außendruck. Man erhält also vom Beginn des Abpumpvorganges an ein Vakuum.

© physik.begreifen, DESY

Was ist Luft?

Die Luft ist eine Mischung aus unsichtbaren und geruchlosen Gasen. Sie besteht zum größten Teil aus Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), einer kleinen Menge anderer Gase wie Kohlendioxid (CO_2), Ozon (O_3), Wasserstoff (H_2) und Wasserdampf (H_2O).



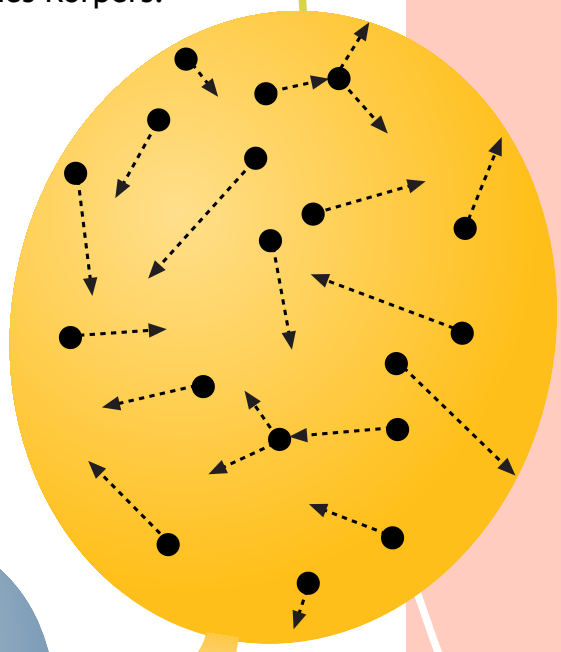
Man kann sich auch vorstellen, dass die Luft aus kleinsten Teilchen besteht, die immer in Bewegung sind.

Diese Teilchen bewegen sich unregelmäßig und stoßen dabei immer wieder miteinander zusammen. Zwischen den Teilchen existieren keine Anziehungskräfte.

© physik.begreifen, DESY

Was ist Luftdruck?

Man kann sich die Luft als winzige Teilchen vorstellen, die immer in Bewegung sind und ständig miteinander zusammenstoßen. Bringt man in die Luft einen Gegenstand, stoßen die Teilchen natürlich auch an dessen Oberfläche. Die zahlreichen Stöße können mit bloßem Auge nicht beobachtet werden. Vielmehr registriert man die Wirkung der Stöße als dauernden Druck. Je höher der Druck ist, desto größer sind die Kräfte auf die Oberfläche des Körpers.



Je mehr Teilchen sich in einem bestimmten Volumen befinden, umso höher ist der Druck.

Ist das Gas Luft, spricht man von Luftdruck.

Infolge ihrer thermischen Bewegung trommeln die Gasteilchen auf jede Fläche, die das Gas begrenzt.

© physik.begreifen, DESY

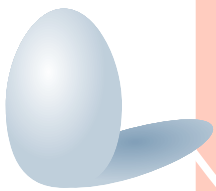
Der Luftdruck ist so groß, dass er z.B. an einer Fingernagelfläche eine Kraft wirken lässt, die der Gewichtskraft eines Liters Wasser entspricht

Der Luftdruck ist nicht an jedem Ort gleich. Die Luft der Atmosphäre wird mit zunehmender Höhe dünner, die Dichte nimmt ab und damit auch der Druck.

Der Normaldruck wurde auf 1,01325 bar = 1013,25 mbar festgelegt. Er soll dem mittleren Druck auf Meereshöhe entsprechen.
Die in den Schulen gebräuchliche Einheit für den Druck ist hPa, wobei 1 hPa = 1 mbar.

Habt ihr schon gewusst...

... dass man ein Ei in den Bergen länger kochen muss bis es hart ist?

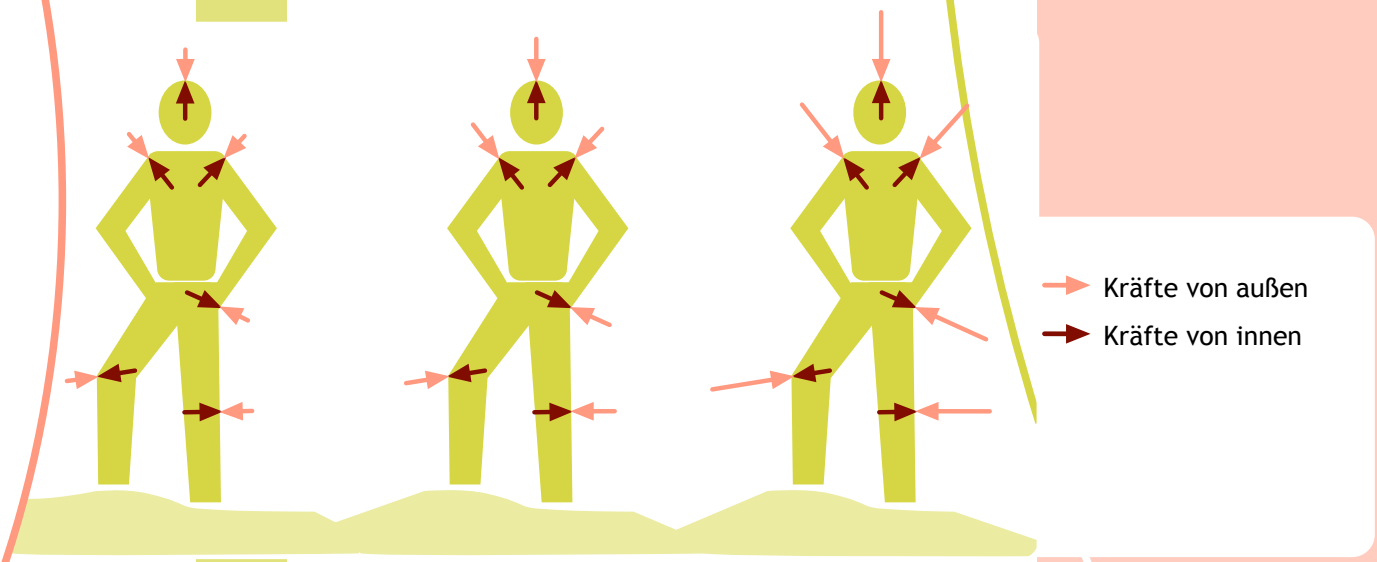


© physik.begreifen, DESY

Der Körper unter verschiedenen Druckeinflüssen

Auch wenn sich der Außendruck ändert, bleibt der Druck in unserem Körper nahezu gleich. Ist der Außendruck zum Beispiel größer als der Innendruck - wie beim Tauchen - kann das Schmerzen in den Ohren verursachen.

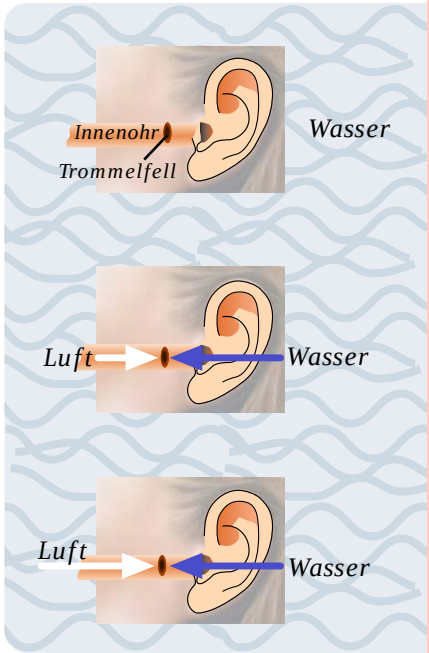
Ganz besonders wirkt sich der Außendruck auf jene Körperteile aus, die Gase enthalten, das sind luftgefüllte Hohlräume wie z.B. Magen, Lunge und Ohr.



Taucht man tief unter Wasser, so spürt man einen schmerzhaften Druck in den Ohren. Unter Wasser hat das Trommelfell die Funktion einer Trennwand zwischen Wasser und Luft.

Je tiefer man taucht, desto stärker wird das Trommelfell vom Wasser ins Ohr gedrückt.

Abhilfe schafft ein Druckausgleich: man presst Luft ins Innenohr, so dass der äußere Druck vom Wasser genauso groß ist wie der innere Druck der Luft.



© physik.begreifen, DESY

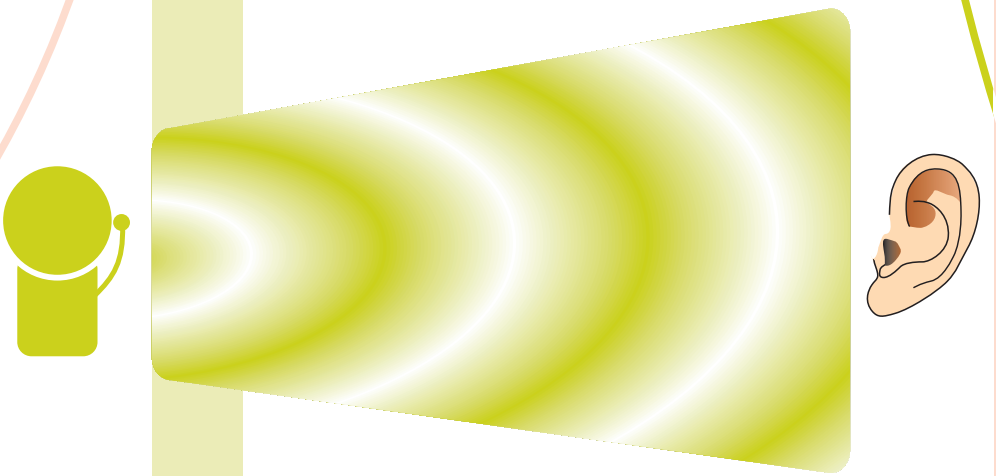
Was ist Schall?

Schall nennt man allgemein alles, was wir hören können. Neben dem Auge ist das Ohr ein wichtiges Sinnesorgan, mit dem wir die Umwelt wahrnehmen können. Aber wie entstehen die Geräusche?

An dem Entstehungsort des Geräuschs wird die Luft durch einen schnell schwingenden Schallerreger weggedrückt, so dass sie dichter zusammengedrückt wird. Die Moleküle der Luft schwingen hin und her, längs der Ausbreitungsrichtung der Welle. Die Moleküle geben dieses Verhalten an Nachbarmoleküle weiter und bewirken so die Ausbreitung der Welle. Mit Schallgeschwindigkeit (343 m/s bei 20°C) breiten sich so in der Luft abwechselnd die Schichten von dichter Luft und nicht so dichter Luft in alle Richtungen aus.

Habt ihr schon gewusst...

...dass sich der Schall im Wasser viermal so schnell ausbreitet wie in Luft?



Die schwingenden Luftmoleküle versetzen das Trommelfell ebenfalls in Schwingung. Das Gehirn „übersetzt“ diese Signale schließlich in Geräusche.

© physik.begreifen, DESY

Was ist Wärme?

In der Luft bewegen sich die Luftmoleküle ungeordnet und stoßen aneinander. Je schneller sie sich bewegen, desto höher ist die Temperatur der Luft. Natürlich bewegen sich nicht alle Luftmoleküle gleich schnell. Es kommen alle Geschwindigkeiten von langsam bis schnell vor, allerdings unterschiedlich häufig. Die Temperatur ist ein Maß für die durchschnittliche oder mittlere Geschwindigkeit der Luftmoleküle. Um die Temperatur eines Körpers zu ändern, muss man ihm Wärme zuführen oder entziehen.

Die **Wärmeübertragung** von einem Körper auf einen anderen kann auf drei verschiedene Arten stattfinden:

Wärmeströmung

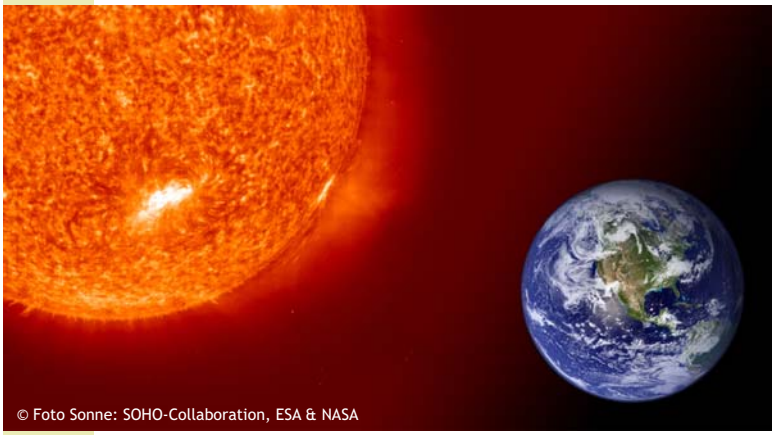
Flüssige oder gasförmige Stoffe können den Ort wechseln und dabei die Wärme selbst mitnehmen.
Beispiel: An heißen Heizkörpern strömt die Luft vorbei und transportiert die Wärme ins Zimmer.

Wärmeleitung

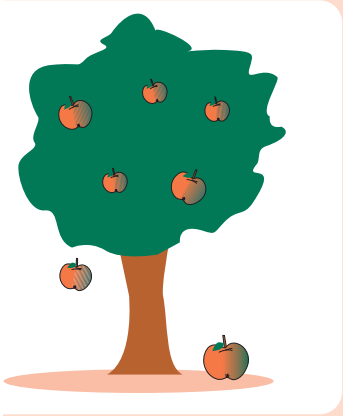
Die Moleküle eines Stoffes geben ihre Bewegungsenergie an benachbarte Moleküle weiter, und somit wird die Wärme weitergeleitet.
Beispiel: Die Wärme des Herdes wird durch den Topf auf den Inhalt übertragen.

Wärmestrahlung

Wärme wird ohne Luftteilchen durch elektromagnetische Wellen (Infrarotstrahlung) übertragen.
Beispiel: Bei schönem Wetter spürt man die Wärme der Sonnenstrahlung auf der Haut.

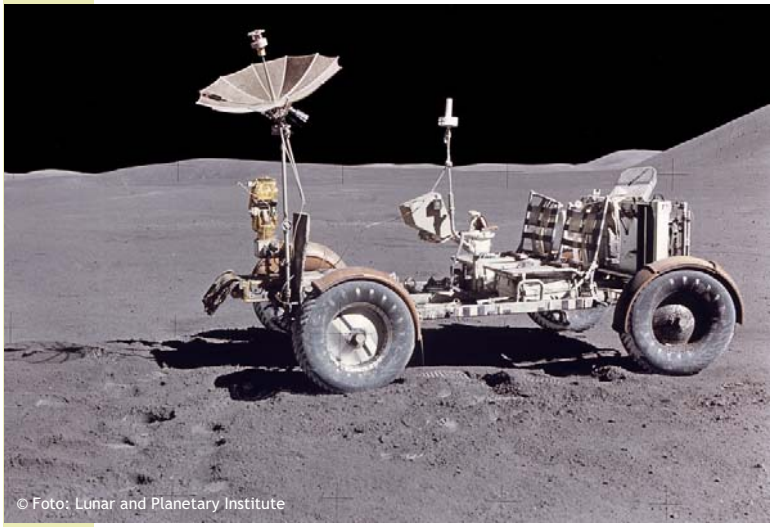

© Foto Sonne: SOHO-Collaboration, ESA & NASA

Was ist Schwerkraft?



Sir Isaac Newton entdeckte, dass zwischen den Körpern im Universum eine Massenanziehungskraft (Gravitation) wirkt. Alle Vorgänge auf der Erde werden von dieser Gravitation bzw. Schwerkraft beeinflusst. Die Anziehung hängt von der Masse der Körper und deren Entfernung ab. Je größer die Masse der Körper, desto stärker ist die Anziehung.

Die **Masse** m ist eine Eigenschaft des Körpers, die die Menge der Materie angibt, aus der dieser Körper besteht. Die Masse eines Körpers ist also überall im Universum dieselbe. Spricht man dagegen von dem Gewicht eines Körpers, meint man im Allgemeinen die **Gewichts-** oder **Schwerkraft**, die auf einen Körper wirkt. Diese ist, anders als die Eigenschaft Masse, ortsabhängig. Man erhält den Betrag der Gewichtskraft G eines Körpers an einem bestimmten Ort, wenn wir die nur vom Körper abhängige Masse m mit der nur vom Ort abhängigen **Fallbeschleunigung** g multiplizieren ($G = m \cdot g$). Auf der Erde beträgt die Fallbeschleunigung 9,8 m/s^2 und ist für alle Körper gleich.



Als Beispiel betrachten wir ein Mondfahrzeug. Die Masse dieses Fahrzeugs ist auf der Erde und auf dem Mond dieselbe. Um es in Bewegung zu setzen, muss man auf dem Mond wie auch auf der Erde die gleiche Kraft aufwenden. Anders verhält es sich mit den Gewichtskräften. Aufgrund der geringeren Masse des Mondes ist die Gewichts- oder Schwerkraft ungefähr 6x kleiner als auf der Erde, weil die Fallbeschleunigung geringer ist.

© physik.begreifen, DESY

Was ist Schwerelosigkeit?

Mit Schwerelosigkeit wird ein Zustand bezeichnet, in dem auf einen Körper nur noch die Schwerkraft wirkt. Diesen Zustand erreicht man im freien Fall; Schwerelosigkeit bedeutet also nicht das Fehlen von Schwerkraft, wie oft fälschlicherweise angenommen wird, sondern das Fehlen einer der Schwerkraft entgegen gesetzten Kraft, die uns zum Beispiel daran hindert, durch den Boden hindurch zum Erdmittelpunkt zu fallen. Das Gefühl der Schwerelosigkeit kennt man übrigens von der Fahrt nach unten in einem Aufzug oder einer Achterbahn, die in die Tiefe rauscht.

Die Schwerelosigkeit z. B. auf der Raumstation ISS hat übrigens nichts damit zu tun, dass im Weltraum ein Vakuum herrscht, sondern vielmehr damit, dass sich die Station im freien Fall um die Erde befindet. Zur Erklärung dient die kleine Skizze.

Springt ein Astronaut vom Dach eines 400 km hohen Gebäudes, befindet er sich zunächst im freien Fall, bis er auf dem Boden aufkommt [1].
Springt er mit einer gewissen Geschwindigkeit nach vorn ab [2], fällt er zwar weiter, kommt aber trotzdem irgendwann auf dem Boden an. Ist die Vorwärtsgeschwindigkeit groß genug (ca. 28.000 km/h), trifft der Astronaut nicht mehr den Boden, sondern fällt an der Erde vorbei auf einer kreisförmigen Bahn [3] (Umlaufbahn). Ist die Geschwindigkeit zu groß (mehr als 40.000 km/h), überwindet der Astronaut die Anziehungskraft der Erde [4] und verschwindet ins Weltall.

© physik.begreifen, DESY

Was ist Dichte?

Die **Dichte**, Formelzeichen ρ, eines Stoffes ist eine physikalische Eigenschaft eines Materials. Sie ist durch den Quotienten aus der Masse *m* und dem Volumen *V* definiert:

$$\rho = m / V$$

Die offizielle Einheit der Dichte, die abgeleitete SI-Einheit, ist **kg/m³**.
Üblich und weit verbreitet ist bei festen Körpern und Flüssigkeiten die Einheit **g/cm³**, was 1000 kg/m³ entspricht. Bei Gasen verwendet man auch die Einheit **g/l**, die vom Zahlenwert mit der SI-Einheit übereinstimmt. Dabei ist 1 l = 1 dm³.

In der Tabelle auf Seite 30 kann man die Abhängigkeit der Luftdichte von Temperatur und Luftdruck sehen.

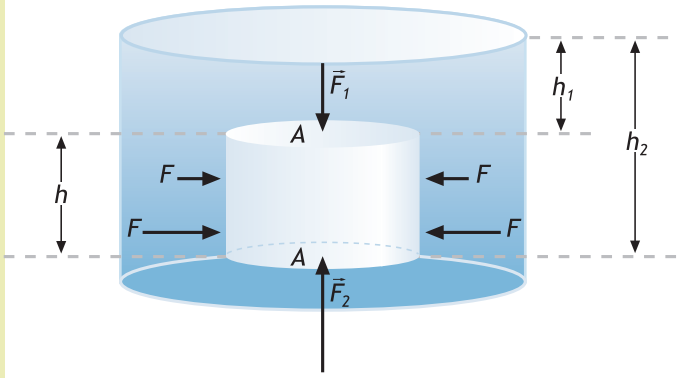
© physik.begreifen, DESY

Was ist Auftrieb?

Jeder kennt das Phänomen, dass z.B. auf einen Plastikball, den man versucht unter Wasser zu drücken, eine Kraft nach oben wirkt. Diese nach oben gerichtete Kraft heißt Auftriebskraft oder auch kurz Auftrieb und lässt einen Körper im Wasser viel leichter erscheinen. Sie täuscht eine Verminderung der nach unten gerichteten Gewichtskraft vor.
Schon im alten Griechenland hatte Archimedes beim Baden in einer Wanne eine geniale Beobachtung gemacht. Das Wasser schwappt über den Rand der bis oben gefüllten Wanne, wenn man sich hineinsetzt. Die verdrängte Wassermenge entspricht dem Volumen des Körpers im Wasser. Er dachte sogar noch etwas weiter nach und kam schließlich zu folgendem Schluss, der heute als Satz des Archimedes bekannt ist:

Der Auftrieb ist so groß wie die Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit.

Aber wie entsteht die Auftriebskraft?
Der Druck im Wasser wird mit zunehmender Tiefe größer. Dieses Phänomen hat jeder schon einmal beim Tauchen selbst erfahren können. Betrachtet man nun einen Zylinder im Wasser und den Druck der auf ihn ausgeübt wird, kann man erkennen, dass sich die Kräfte auf die Seitenflächen gegenseitig aufheben. Die untere Fläche erfährt eine nach oben gerichtete Kraft, die vom Betrag her größer ist als die nach unten gerichtete Kraft auf die obere Fläche des Zylinders.
Auftriebskräfte gibt es nicht nur in Flüssigkeiten sondern auch in Gasen.

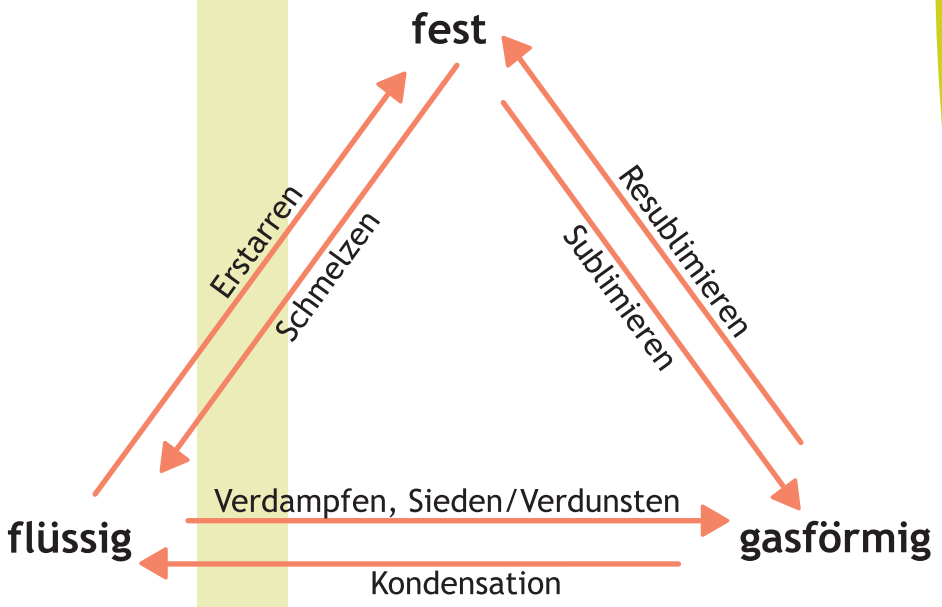


F, F_1, F_2 = Druckkräfte
$F_1 < F_2$
h_1, h_2 = Tiefen
h = Höhe des Körpers

© physik.begreifen, DESY

Was sind Aggregatzustände?

Stoffe können in 3 Erscheinungsformen (fest, flüssig, gasförmig) auftreten. Jedem sind die unterschiedlichen Zustände von Wasser, nämlich Eis, Wasser und Wasserdampf bekannt. Diese Erscheinungsformen bezeichnet man als Aggregatzustände.



Wie kann man sich diese Übergänge vorstellen?

Schmelzen

Das Schmelzen ist der Umkehrprozess des Erstarrens. Dabei wird einem festen Körper (z.B. Eis) Energie zugeführt. Die Folge ist, dass sich die Teilchen in dem Körper schneller bewegen, sie schwingen stärker. Wenn diese Schwingungen stark genug sind, reißt die enge Verbindung zwischen den Teilchen.

Verdampfen oder Sieden

Durch Erhitzen wird die Temperatur und damit die durchschnittliche Geschwindigkeit der Teilchen so weit erhöht, dass sie genug Energie haben, um gegen den Luftdruck die Flüssigkeit zu verlassen. Während des Siedens bleibt die Temperatur gleich. Dies lässt sich auch durch Verringern des Luftdrucks erreichen, da dann schon bei einer niedrigeren Temperatur die Durchschnittsgeschwindigkeit dafür ausreicht. Die Siedetemperatur ist druckabhängig!

© physik.begreifen, DESY

Verdunsten

Auch wenn die Temperatur noch nicht hoch genug ist, können Teilchen die Flüssigkeit verlassen. Die Wasserteilchen haben nicht alle die gleiche Geschwindigkeit, einige sind langsamer, andere schneller. Wenn nun ein schnelleres Teilchen an der Oberfläche ist und sich nach außen bewegt, kann seine Energie ausreichen, um in die Umgebung zu gelangen. Ohne diese Möglichkeit würde Wäsche nie trocken werden. Verdunsten geschieht nur an der Oberfläche!

Kondensation

Die Kondensation ist der Umkehrprozess des Siedens. Kühlt ein Gas weit genug ab, dass die Teilchen bei den Stößen eine lockere Bindung eingehen, verflüssigt sich das Gas. Auch die Temperatur, bei der ein Gas kondensiert, also flüssig wird, ist druckabhängig. Die Gase, die den Hauptanteil in der Luft ausmachen, kondensieren erst bei so niedrigen Temperaturen, dass sie auf der Erde nie natürlich in flüssiger Form vorkommen.

Erstarren oder Gefrieren

Wenn eine Flüssigkeit immer weiter abgekühlt wird, erreicht sie irgendwann den Punkt, wo die Geschwindigkeit der Teilchen so gering ist, dass sie bei Stößen nicht mehr voneinander abprallen, sondern zusammen bleiben. Da dies gleichzeitig mit vielen Teilchen geschieht, entsteht ein fester Körper, in dem die Moleküle auf eine bestimmte Art angeordnet sind (Kristalle).

Sublimieren

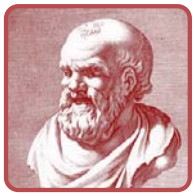
Wenn bei den Druck- und Temperaturbedingungen kein flüssiger Zustand des Stoffes existiert, kann dieser beim Erwärmen vom festen direkt in den gasförmigen Zustand übergehen. Dies geschieht z.B. bei Trockeneis, gefrorenem Kohlendioxid. Die Sublimation ist aber auch verantwortlich dafür, dass es auch im Winter bei starkem Frost und trockener Luft möglich ist, trotz Kälte im Freien Wäsche zu trocknen. Die Feuchtigkeit im Wäschestück gefriert hierbei zunächst und sublimiert dann zu Wasserdampf.

Resublimieren

Die Resublimation ist der umgekehrte Vorgang. Er ist verantwortlich für die Raureifbildung an kalten Tagen. Wenn die Luftfeuchtigkeit hoch genug ist, kristallisieren Wassermoleküle aus der Luft.

© physik.begreifen, DESY

Geschichte des Vakuums



Demokrit (*um 460 v.Chr., †um 375 v.Chr.)
Schon im alten Griechenland machten sich Philosophen Gedanken über das Vakuum. Es begann mit einer äußerst komplizierten Formulierung des Philosophen Demokrit, der sagte: „Das Ichts“, gemeint ist die Materie, „existiert nicht mehr als das Nichts.“
Was er damit sagen wollte ist, dass „das Leere“, also das Vakuum, real ist. Er argumentierte weiter, dass es ohne „das Leere“ keine Bewegung geben könne, denn Materie könne sich nur bewegen, wenn sie einen Raum einnimmt, der vorher leer gewesen sein muss.

Aristoteles (*384 v.Chr., †322 v.Chr.)
Es gab im alten Griechenland auch Philosophen, die den Gedanken von Demokrit widersprachen. So war Aristoteles der Meinung, dass mit dem Nichts keinerlei Wechselwirkung stattfinden könne, und etwas ohne Wechselwirkung könne nicht Gegenstand einer Naturphilosophie sein. Am Ende seiner Überlegungen war er sich sicher, dass die Natur kein Vakuum kennt und jeder Ort mit „Stofflichem“ ausgefüllt ist. Die Bewegung von Körpern erklärte er sich nicht wie Demokrit durch das Ausfüllen der Leere, sondern durch Umschichtung und Platzwechsel der Materie.

MITTEL-
ALTER

Wissenschaft im Mittelalter
Die Wissenschaft war bis in das 17. Jahrhundert hinein stark geprägt durch die Gedanken von Aristoteles. Daher wurde in der von der katholischen Kirche beeinflussten Naturphilosophie des Mittelalters die Existenz eines leeren Raumes für unmöglich gehalten. Eine Erklärung dafür war der „horror vacui“, die Abscheu der Natur vor der Leere.

© physik.begreifen, DESY

Galilei (*1564, †1642)
Nach langer Zeit wurde erstmals von Galilei das Prinzip des „horror vacui“ in Frage gestellt. Sein Ansatz war: „ Wenn das Vakuum weder mit den Sinnen noch mit dem Verstand erkannt werden kann, wie haben die Philosophen es eigentlich fertig gebracht heraus zu bekommen, dass es gar nicht existiert?“
Allerdings konnte auch ein Galilei sich nicht ganz von dem Gedanken des „horror vacui“ lösen. Das sieht man zum Beispiel an seiner Erklärung für die maximale Wassersaughöhe einer Pumpe von 18 Ellen (= 10 m). Seiner Meinung nach ließ sich das Phänomen dadurch erklären, dass die Wassersäule unter ihrem eigenen Gewicht reißt und sich der entstandene luftleere Raum sofort wieder mit Luft auffüllt. Das bedeutete, dass man ein Vakuum kurzzeitig erzeugen aber nicht aufrechterhalten kann.

Torricelli (*1608, †1647) / **Viviani** (*1622, †1703)
Mit einem einfachen Experiment konnten die Schüler Galileis den „horror vacui“ widerlegen. Sie füllten ein etwa 1 m langes Rohr, das an einer Seite geschlossen war, mit Quecksilber und stellten es kopfüber in ein Quecksilberbad. Mit einem zweiten Rohr verfuhren sie ebenso. Die Form des zweiten Rohres unterschied sich allerdings von dem des ersten durch eine Hohlkugel am oberen Ende des Rohres. Die Quecksilbersäule sank in beiden Rohren unabhängig von der Form auf 76 cm.
Dieses Experiment zeigte, dass die Kraft, die das Quecksilber am Herausfließen hinderte, nicht vom Vakuum oder irgendeiner anderen Substanz im Vakuum herrühren konnte. Andernfalls müsste diese Kraft wegen der Hohlkugel am Ende des einen Rohres stärker sein als beim anderen. Die Kraft musste also von außen wirken, und Torricelli argumentierte dann auch mit dem Gewicht einer 50 Meilen hohen Luftsäule, die mit der Quecksilbersäule im Gleichgewicht ist.
Das Quecksilberbarometer war erfunden.

© physik.begreifen, DESY

Pascal(*1623, †1662)
Der französische Philosoph und Physiker Blaise Pascal konnte zeigen, dass die Steighöhe im Quecksilberbarometer abnimmt, je höher man auf einen Berg steigt. Pascal machte dazu eine ironische Bemerkung: „ Scheut sich die Natur denn weniger auf den Bergen als in den Tälern vor dem Vakuum?“

von Guericke (*1602 in Magdeburg, †1686 in Hamburg)
Ohne etwas von Experimenten von Torricelli und Pascal gehört zu haben machte sich in Deutschland der Ingenieur und spätere Bürgermeister von Magdeburg Otto von Guericke Gedanken über das Vakuum. Angeregt durch Keplers Erkenntnisse über die Bewegung der Planeten vertrat er die Auffassung, dass der leere Raum das Natürlichste der Welt sein sollte. Sonst müssten die Planeten auf ihren Bahnen schon längst durch den Widerstand des umgebenden Mediums ihre Bewegungsenergie verloren haben und vom Himmel gefallen sein.
Seine ersten Versuche, ein Vakuum mit einer umgebauten Feuerspritze, einer Kolbenpumpe für Löschwasser, zu erzeugen, scheiterten kläglich. Die mit Wasser gefüllten Behälter, erst Holzfässer und später aus Metall, waren undicht oder sie implodierten. Daraufhin ließ er das Wasser weg und verwendete erfolgreich eine luftgefüllte hohle Metallkugel und eine luftgefüllte Pumpe. So konnte er ein Vakuum erzeugen und war gleichzeitig Erfinder der Luftpumpe (ein Original steht im Deutschen Museum München).
Otto von Guericke erkennt: „Eine Abscheu vor dem leeren Raum ist in der Natur nicht vorhanden; an seine Stelle ist der Druck der umgebenden Luft zu setzen.“
Neben einer Reihe anderer Experimente entwickelte von Guericke einen der berühmtesten Schauversuche. Zwei mal acht Pferde schafften es nicht, zwei evakuierte Kupferhalbkugeln mit einem Durchmesser von ca. 50 cm, abgedichtet durch einen mit Wachs und Terpentinöl getränkten Lederstreifen, zu trennen. Ein Kind dagegen konnte die Verbindung der beiden „Magdeburger Halbkugeln“ leicht durch das Öffnen eines Ventils lösen.

© physik.begreifen, DESY

Boyle(*1627, †1691)
Angeregt durch von Guerickes Versuche führte auch der irisch-britische Physiker Sir Robert Boyle Versuche über den Luftdruck und das Vakuum durch. Er erkannte die Abhängigkeit des Siedepunktes vom Luftdruck und bewies Galileis Behauptung, dass alle Körper im Vakuum gleich schnell fallen. Auch die Entdeckung des später unter anderem nach ihm benannten Druck-Volumen-Gesetzes der Luft, dessen Begründung Mariotte nachlieferte, steht im Zusammenhang mit dem Vakuum. Aber aus dem Streit um das Wesen des Nichts hielt er sich heraus.

Geißler(*1814, †1879)
1857 entwickelte Geißler eine Quecksilberluftpumpe. Das flüssige Metall tropft eine Fallröhre runter und presst so die Luft aus dem Apparat. Dazu musste das unten aufgefangene Quecksilber zahllose Male wieder oben nachgefüllt werden.

Bunsen(*1811, †1899)
Eine Wasserstrahlpumpe, deren Bedienung weit weniger körperlichen Einsatz bedurfte, wurde 1870 von Bunsen gebaut. Das durchströmende Wasser reißt die Luft mit sich, wodurch ein Unterdruck entsteht.

JAHR-HUNDERT 20.

20. Jahrhundert
Die Entwicklung von immer besseren Pumpen wurde durch die zunehmende Industrialisierung und Elektrifizierung vorangetrieben. Ebenso trugen der Bedarf bei der Herstellung von Glühlampen, Radioröhren und die Entwicklung des Fernsehers zur rasanten Pumpenentwicklung bei.
In der Wissenschaft forderten die Massenspektroskopie, die Transmissions- und Rasterelektronenmikroskopie und schließlich die Elementarteilchenphysik die Erzeugung eines immer besseren Vakuums. Mit Pumpen, die zum Teil gezielt für Forschungsaufgaben entwickelt wurden, erreicht man heutzutage Drücke, die dem Druck auf der Mondoberfläche entsprechen.

© physik.begreifen, DESY

Vakuum im Alltag

Ein Putztag ohne Staubsauger ist heutzutage nicht mehr vorstellbar. Der englische Name „vacuum cleaner“ sagt allerdings mehr über das Prinzip dieses Haushaltsgerätes aus. Im Staubsauger wird mit Hilfe eines Motors eine Pumpe betrieben, die im Staubsauger einen Unterdruck, also ein Vakuum erzeugt. Der äußere Luftdruck treibt die Luft durch die Düse in den Staubsauger hinein, wobei kleine Teilchen (Staub) mitgerissen werden und sich in einem Auffangbehälter sammeln. Dieser Effekt tritt auch auf, wenn man eine Flüssigkeit mit einem Strohhalm aufsaugt.

Möchte man bei der Abflussreinigung auf chemische Hilfsmittel verzichten, kann man einen „Pümpel“ einsetzen. Auch zur Befestigung von Haken an der Wand werden kleine Saugnäpfe verwendet (Handtuchhalter). Die größeren Saugnäpfe dienen zur Halterung von Geräten auf der Arbeitsplatte. Eine weitere Anwendung ist der Saugheber, mit dem man zum Beispiel Glas- oder Steinplatten transportieren kann.

Beim Einkaufen findet man eine Menge Lebensmittel, die vakuumverpackt angeboten werden, wie zum Beispiel Kaffee oder Erdnüsse. Die Aromastoffe bleiben im vakuumverpackten Lebensmittel erhalten.

Im Haushalt werden auch Vakuumvorratsdosen zur Aufbewahrung verwendet, wo mit einer kleinen Handpumpe Luft abgepumpt wird.

Beim Thermoformen werden vorgewärmte Kunststoffplatten auf ein ebenfalls temperiertes Werkzeug gelegt. Im Werkzeug wird ein Vakuum erzeugt, worauf der Kunststoff in das Werkzeug hineingedrückt wird und so dessen Form übernimmt. Auf diese Weise werden große Teile wie Gehäuse, Badewannen und Armaturenbretter hergestellt, aber auch Joghurtbecher und Verpackungsmaterial.

Vakuum ist weit mehr als nur nichts. Seine Eigenschaften helfen uns beim täglichen Leben: Vakuum sorgt dafür, dass unsere verpackten Lebensmittel haltbar bleiben, hilft bei der Isolierung, z.B. in Thermoskannen und auch im Fernseher ermöglicht uns das Vakuum ein scharfes Bild.

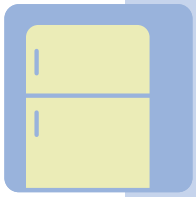
© physik.begreifen, DESY

In Rettungswagen kommen Vakuumformkissen und -matratzen zum Einsatz. Wenn Brüche bis zur Weiterbehandlung ruhig gestellt werden sollen, legt man z.B. den Arm in ein solches Formkissen, das mit einem Granulat gefüllt ist, und pumpt die Luft ab. Das Kissen legt sich eng an den Arm an und wird fest und stabil.

Eine andere „All-tägliche" Anwendung des Vakuums ist eine Weltraumhose. Aufgrund der Schwerelosigkeit im Weltall befindet sich dort mehr Blut im Gehirn der Astronauten als auf der Erde. Dies ist eine der Ursachen für die Weltraumkrankheit. Die Russen haben dagegen eine Hose entwickelt, mit der an den Beinen ein Vakuum erzeugt werden kann. Die Blutdruckverhältnisse im Körper sind dann ähnlich wie auf der Erde.

Die doppelwandige Thermoskanne hält den Kaffee nur deshalb so lange warm, weil zwischen den beiden Kannen fast keine Luft ist, die die Wärme nach außen transportieren könnte. In einer Thermoskanne bleiben übrigens nicht nur heiße Getränke warm sondern auch kalte Getränke kalt.

Wir brauchen — so erstaunlich das auch klingen mag — ein Vakuum zum Leben. Wir können nur deshalb atmen, also Luft einsaugen, weil der Druck in unserer Lunge geringer ist als außerhalb. Dieser Unterdruck entsteht dadurch, dass das Lungenvolumen vergrößert wird. Wenn jemand an unserer Haut ein Vakuum erzeugt, entsteht dort ein Knutschfleck.



Und noch etwas, was wohl mancher schon bemerkt hat. Man holt etwas aus dem Gefrierschrank, schließt die Tür wieder und stellt fest, man hat noch etwas vergessen. Aber die Tür des Gefrierschranks lässt sich plötzlich nicht mehr so leicht öffnen, denn es war wärmere Luft eingeströmt, die sich abgekühlt und zusammengezogen hat. Daher ist der Druck im Inneren kleiner als außen und es dauert einen kleinen Augenblick, bis er sich wieder angeglichen hat.

Segelflieger verwenden zur Bestimmung ihrer Flughöhe einen Höhenmesser. Dieses Instrument nutzt die Tatsache aus, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt. Wenn man das Gerät am Start richtig kalibriert, ist der Luftdruck ein gutes Maß für die Höhe.

© physik.begreifen, DESY

Die Frischhaltung von Lebensmitteln war schon immer von großer Bedeutung. Es kommt darauf an, die Lebensmittel vom Sauerstoff fernzuhalten und das Oxidieren und auch die Entwicklung von Keimen zu verhindern.
Beim Einwecken werden die Lebensmittel erhitzt und Keime werden abgetötet. Das Einkochen geschieht in einem Glas, wobei ein Überdruck in dem Behälter entsteht. Bei sinkender Temperatur verringert sich das Volumen der eingeschlossenen Luft, ohne dass Luft von außen nachströmen kann. In dem verschlossenen Weckglas entsteht ein Vakuum. Die auf diese Weise behandelten Lebensmittel können sogar einige Jahre gelagert werden.

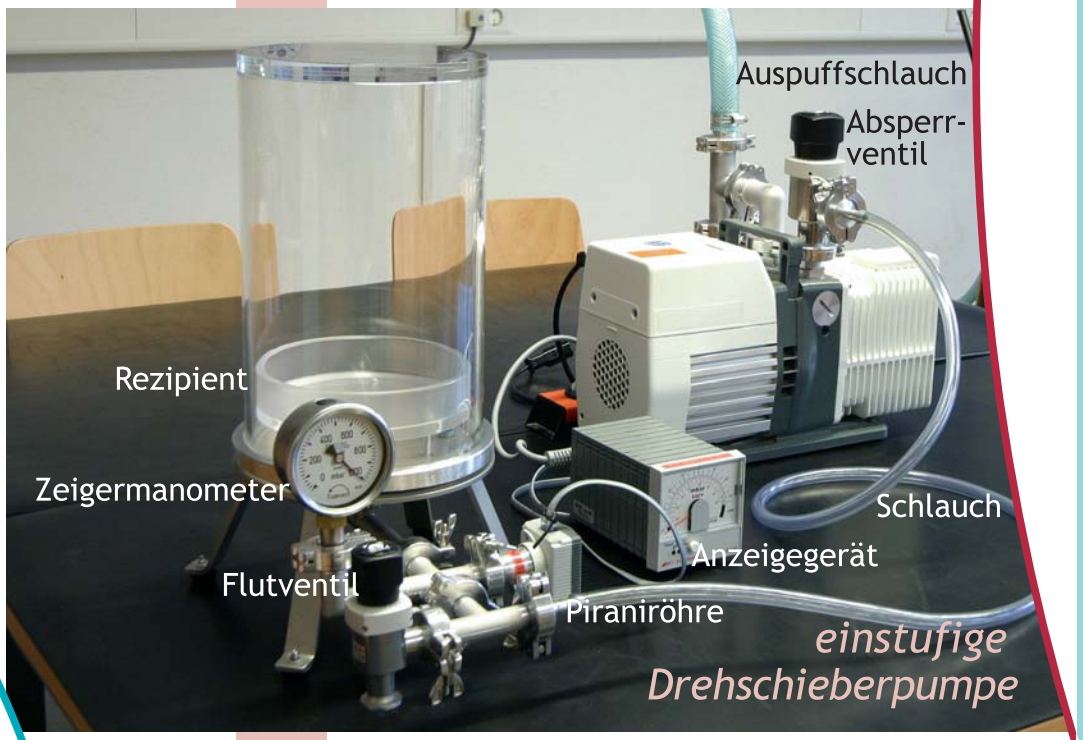
Ein besonders schonendes Verfahren zum Trocknen von Lebensmitteln (z.B. Kräuter, Gewürze, Pilze, Tütensuppen ...), bei dem keine Vitamine und Nährstoffe verloren gehen, ist die Gefriertrocknung. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass auch Eis verdampfen kann. Die Lebensmittel werden zunächst tief gefroren. Anschließend wird in großen Vakuumkammern die Luft und der entstehende Wasserdampf abgepumpt. Dieses Verfahren wird auch benutzt, um feucht gewordene Bücher schonend zu trocknen. Auf diese Weise wurden auch die Bücher, die durch Hochwasser (Dresden 2002) oder Löschwasser (Anna-Amalia-Bibliothek 2005) geschädigt wurden, gerettet.

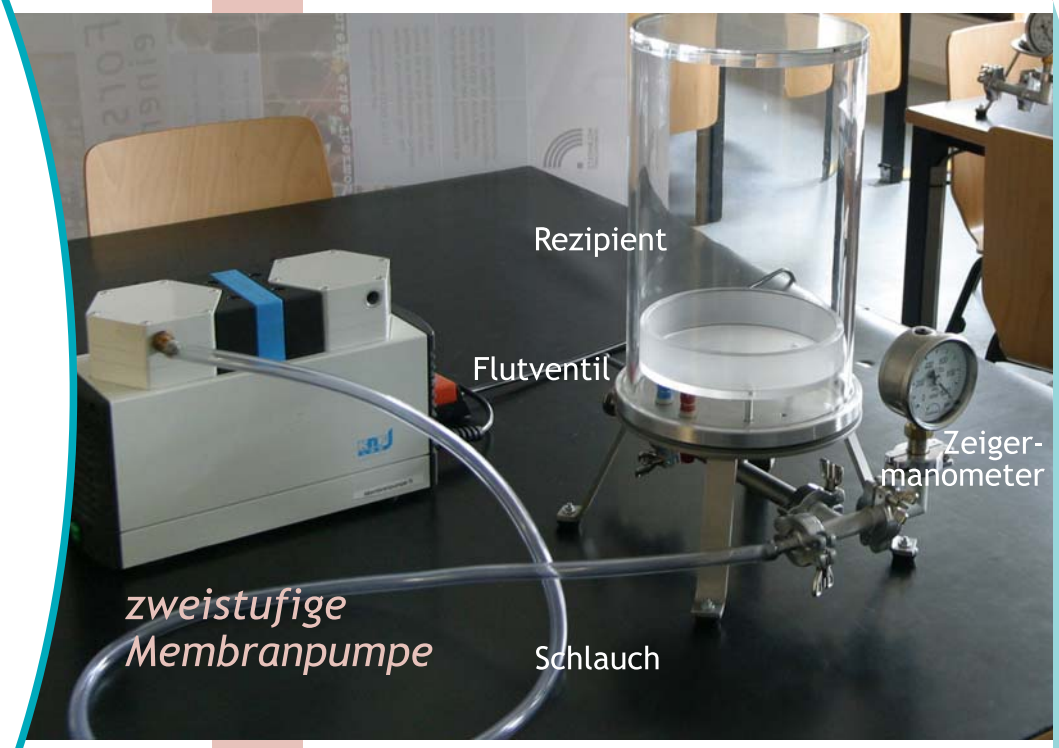
Bei der Weinerzeugung wird versucht, bessere Resultate durch Erhöhung der Mostkonzentration zu erreichen. Dies kann durch Zusatzstoffe, aber auch durch Wasserentzug geschehen. Im letzteren Fall wird der Most zum Sieden gebracht und dabei Wasser abdestilliert. Weil bei 100°C starke Qualitätsverluste durch das Verdampfen der Aromen eintreten, wird ein künstliches Vakuum erzeugt. Das Wasser siedet dann bei ca. 25°C. So kann ohne große Aromenverluste destilliert werden.

Die Entwicklung von Radios wäre ohne Vakuumtechnik nicht möglich gewesen. Inzwischen können sich viele ein Leben ohne die Verwendung des Hochvakuums in der Fernseh- oder Monitorbildröhre nicht mehr vorstellen. Bei der Bilderzeugung werden Elektronen durch magnetische Felder auf den Bildschirm gelenkt. Ohne Hochvakuum würden Luftteilchen die Elektronen stören und es würde kein scharfes Bild entstehen können.

© physik.begreifen, DESY

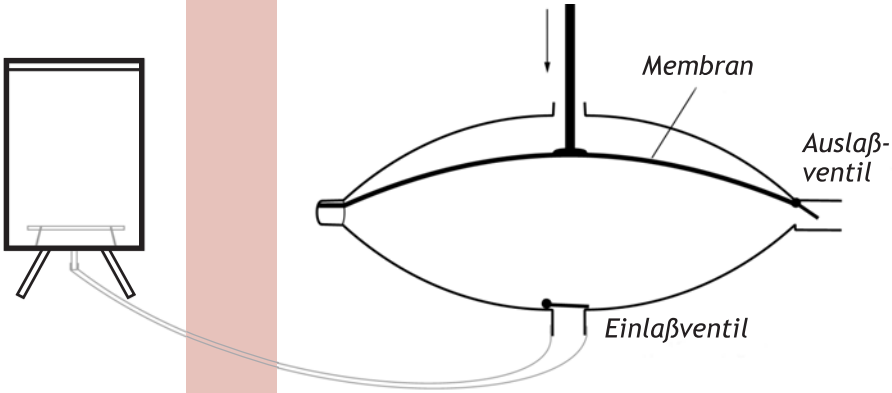
Grundaufbau der Experimentierplätze





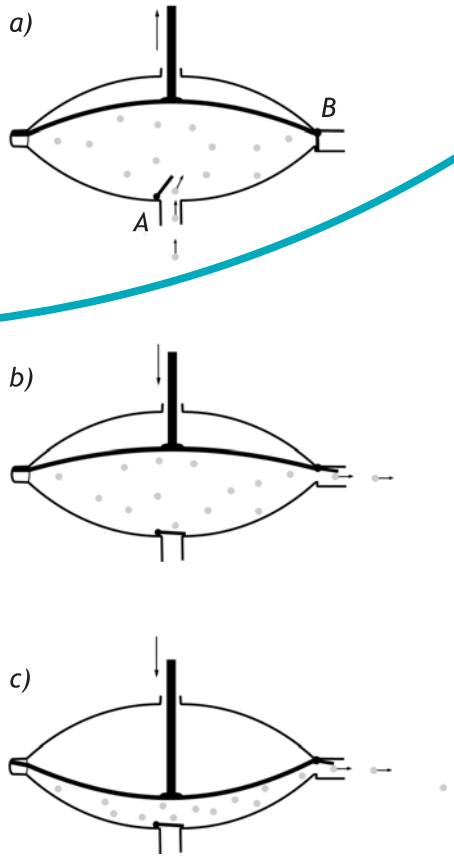
© physik.begreifen, DESY

Prinzip einer Membranpumpe



Unter der Membran entsteht beim Hochziehen ein Unterdruck, und der vorhandene Luftdruck im abzupumpenden Volumen treibt die Luft in die Pumpe.

Beim Abwärtsbewegen der Membran schließt sich das Ventil A, und der Inhalt der Pumpe wird durch B nach draußen gedrückt.



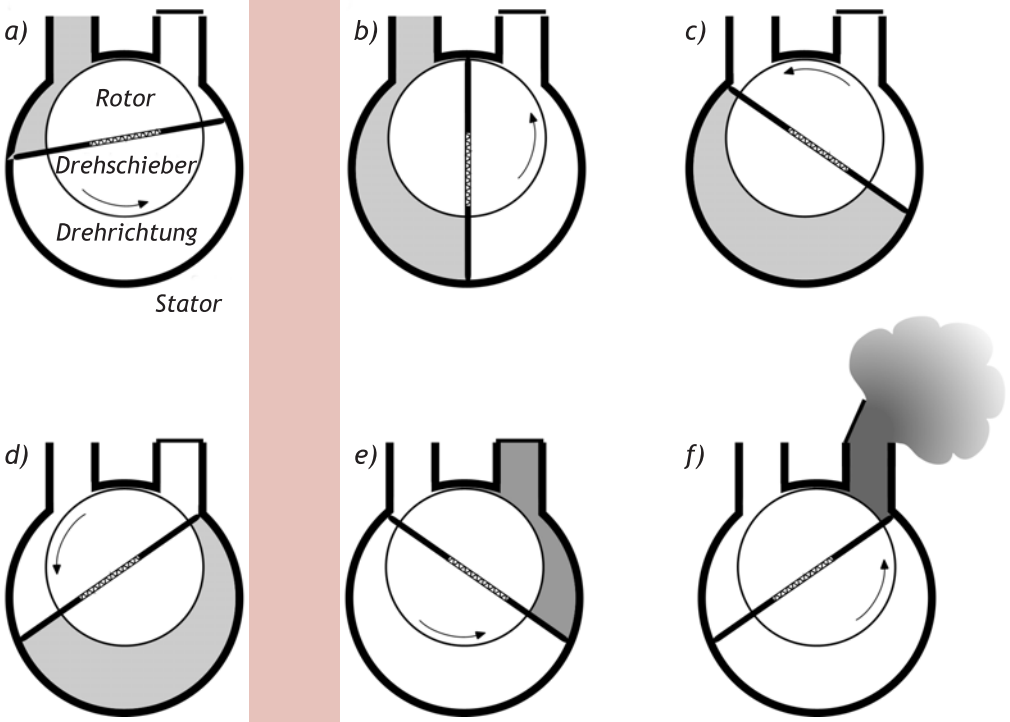
© physik.begreifen, DESY

Prinzip einer Drehschieberpumpe

In einem exzentrisch gelagerten, rotierenden Innenteil (Rotor) sind zwei bewegliche Drehschieber angeordnet, die mit Hilfe von Federn und durch die Rotation an der starren Gehäusewand (Stator) entlanggleiten. Sie vergrößern und verkleinern das Volumen zwischen Rotor und Stator und sorgen so für den Pumpvorgang.

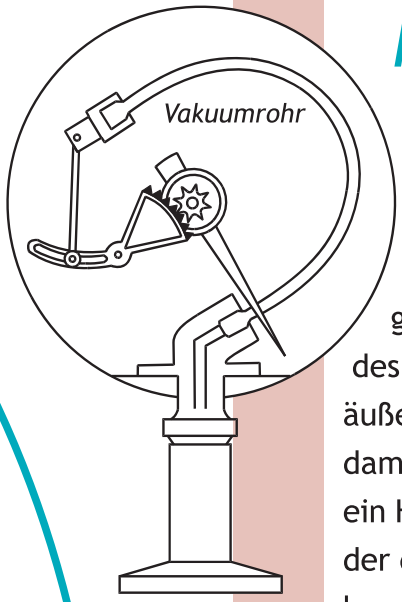
Das abzusaugende Gas strömt in das sich durch die Drehung vergrößernde Volumen (Bild a, b) bis der Raum durch den zweiten Drehschieber vollständig abgeschlossen ist (Bild c). Beim Weiterdrehen (Bild d, e) wird das Volumen durch den Schieber wieder verkleinert und somit das Gas komprimiert, bis sich bei etwa 1050 mbar (d.h. bei leichtem Überdruck) das Auspuffventil öffnet und das Gas ausströmt (Bild f).

Durch die beiden Volumina finden beide Prozesse gleichzeitig statt. Das bedeutet, bei einer von 25 vollständigen Umdrehungen des Rotors pro Sekunde wird zweimal angesaugt und zweimal ausgestoßen.



© physik.begreifen, DESY

Verwendete Vakuummessgeräte



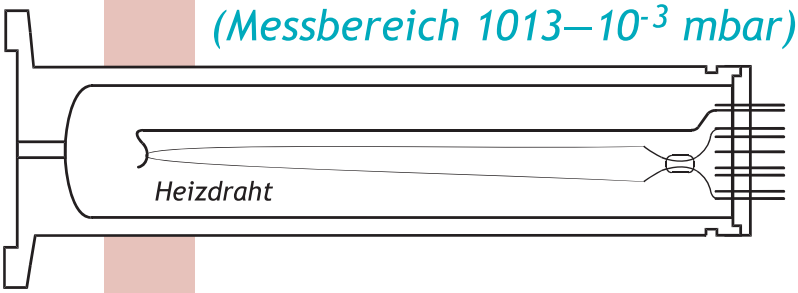
Röhrenfeder-vakuummeter

(Messbereich 1013—10 mbar)

Das kreisförmig gebogene Rohr wird an das zu evakuierende Volumen angeschlossen. Sinkt der Druck im Inneren des Rohres, wird es unter der Wirkung des äußeren Luftdrucks zusammengebogen. Die damit verbundene Wegänderung wird über ein Hebelsystem auf einen Zeiger übertragen, der den Druck auf einer am Manometer angebrachten Skala anzeigt.

Pirani

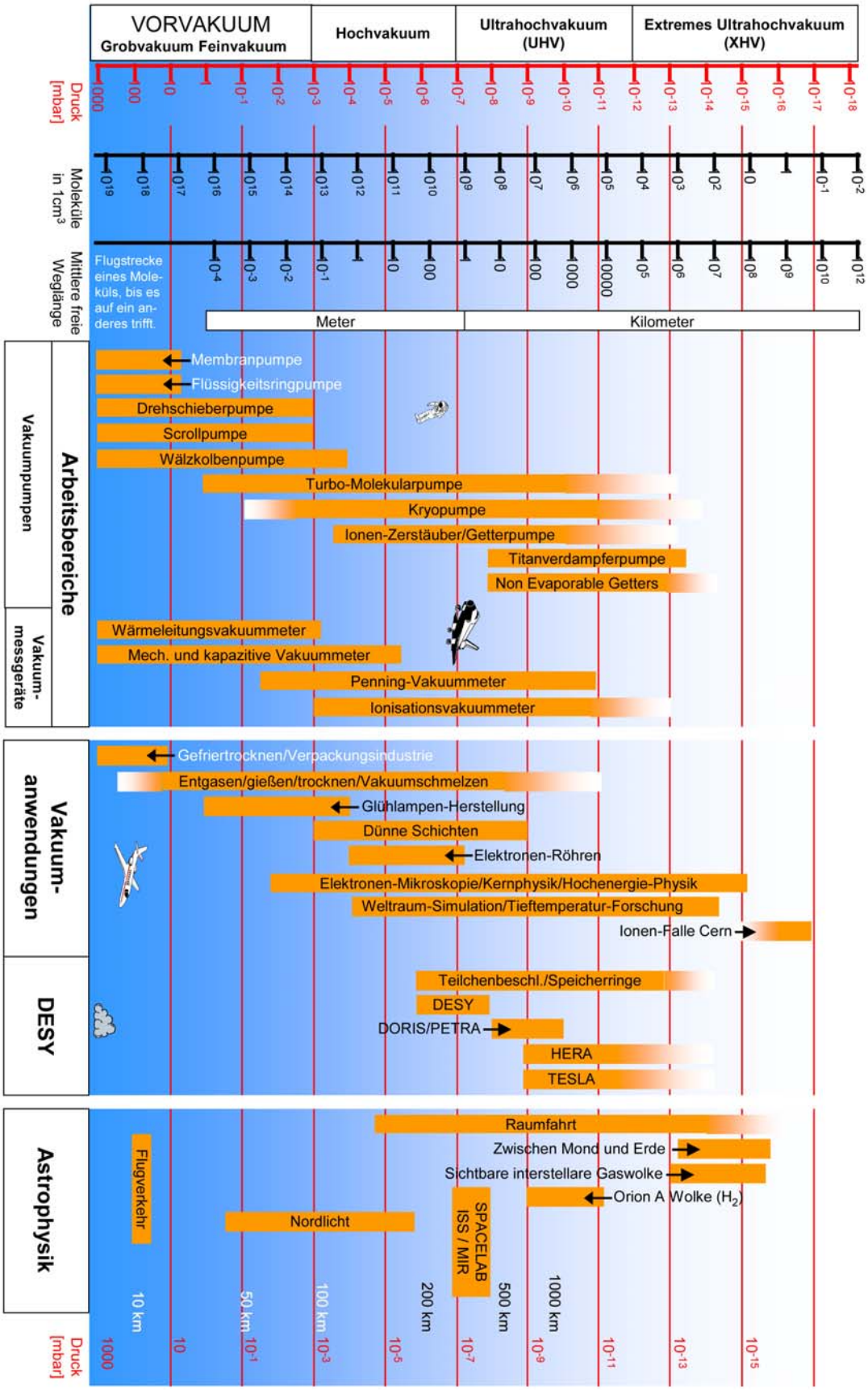
(Messbereich 1013—10^{-3} mbar)



Die Piranis gehören zur Gruppe der Wärmeleitungsvakuummeter. Ihr Aufbau besteht im wesentlichen aus einem sehr dünnen Draht, der durch elektrische Energiezufuhr geheizt wird. Das Prinzip ist relativ einfach: Je weniger Gasmoleküle vorhanden sind, umso weniger Wärme kann “abtransportiert” werden (Thermoskannenprinzip). Das bedeutet, bei konstanter Heizspannung und sinkendem Druck steigt die Temperatur im Heizdraht und dadurch auch sein elektrischer Widerstand. Letzterer wird mit einer Widerstandsmessbrücke gemessen und entsprechend kalibriert als Druck angezeigt.

© physik.begreifen, DESY

Vakuumübersicht



© physik.begreifen, DESY

Umrechnung auf andere Maßeinheiten

		bar	mbar	Pa = N/m^2	hPa
1 bar	=	1	1.000	100.000	1.000
1 mbar	=	0,001	1	100	1
1 Pa = 1 N/m^2	=	0,00001	0,01	1	0,01
1 hPa	=	0,001	1	100	1

Auf einigen alten Messinstrumenten und in der Literatur stehen zum Teil noch andere Druckeinheiten, die heute nicht mehr gebräuchlich sind. Dazu gehören historisch wichtige Einheiten wie Torr und Millimeter Quecksilbersäule (mm Hg), die auch als Einheit für den Blutdruck verwendet wurde.

1 mm Wassersäule = 0,1 mbar

1013 mbar = 1,013 bar = 10.300 mm Wassersäule

Die Luft über uns hat ungefähr das Gewicht einer 10 Meter hohen Wassersäule.

1 Torr	=	4/3 mbar	1 Torr := 1 mm Hg
1 atm	=	1013 mbar	1 atm := 760 Torr = 1 physikalische Atmosphäre
0% Vak.	=	1013 mbar	$X\%\text{Vakuum} = \frac{1013\ \text{mbar-Enddruck}}{1013\ \text{mbar}} \times 100\%$

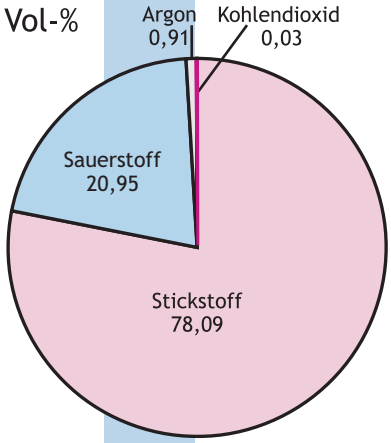
Zehnerpotenzen

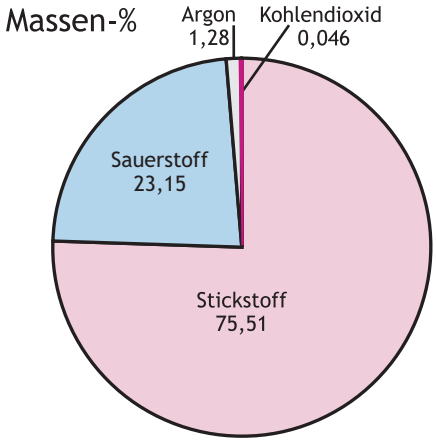
Ziffern		Zehnerpotenz	Name	Vorsilbe	Zeichen
1 000 000 000 000	=	10^{12}	Billion	Tera	T
1 000 000 000	=	10^{9}	Milliarde	Giga	G
1 000 000	=	10^{6}	Million	Mega	M
1 000	=	10^{3}	Tausend	Kilo	k
100	=	10^{2}	Hundert	Hekto	h
10	=	10^{1}	Zehn	Deka	da
1	=	10^{0}	Eins		
0.1	=	10^{-1}	Ein Zehntel	Dezi	d
0.01	=	10^{-2}	Ein Hundertstel	Zenti	c
0.001	=	10^{-3}	Ein Tausendstel	Milli	m
0.000 001	=	10^{-6}	Ein Millionstel	Mikro	µ
0.000 000 001	=	10^{-9}	Ein Milliardstel	Nano	n
0.000 000 000 001	=	10^{-12}	Ein Billionstel	Pico	p
0.000 000 000 000 001	=	10^{-15}	Ein Billiardstel	Femto	f

© physik.begreifen, DESY

Luftbestandteile

Die atmosphärische Luft (Gesamtmenge $5 \cdot 10^{15}$ t) ist ein Gemisch aus:





Ferner: H_2O, Ne, He, CH_4, Kr, Stickoxide, Xe und Spuren weiterer Stoffe.

Luftdichte g/l

	980	990	1000	1010	1013	1020	1030	1040	1050 mbar
0	1,250	1,263	1,275	1,288	1,293	1,301	1,314	1,327	1,340
2	1,240	1,253	1,266	1,279	1,283	1,291	1,304	1,317	1,329
4	1,232	1,244	1,257	1,270	1,274	1,282	1,295	1,308	1,320
6	1,223	1,236	1,248	1,260	1,265	1,273	1,285	1,297	1,310
8	1,214	1,227	1,239	1,252	1,256	1,264	1,276	1,288	1,301
10	1,206	1,218	1,230	1,243	1,247	1,255	1,267	1,279	1,292
12	1,197	1,210	1,222	1,234	1,238	1,246	1,258	1,270	1,282
14	1,189	1,201	1,213	1,225	1,229	1,238	1,250	1,262	1,274
16	1,181	1,193	1,205	1,217	1,221	1,229	1,241	1,253	1,265
18	1,173	1,185	1,200	1,209	1,212	1,221	1,232	1,244	1,256
20	1,165	1,177	1,188	1,200	1,204	1,212	1,224	1,236	1,248
22	1,157	1,169	1,180	1,192	1,196	1,204	1,216	1,228	1,240
24	1,149	1,161	1,172	1,184	1,188	1,196	1,208	1,220	1,231
26	1,141	1,153	1,165	1,176	1,180	1,188	1,200	1,212	1,223
28	1,134	1,145	1,157	1,168	1,172	1,180	1,192	1,204	1,215
30	1,126	1,138	1,149	1,161	1,164	1,172	1,184	1,196	1,207
32	1,119	1,130	1,142	1,153	1,157	1,165	1,176	1,188	1,199
°C									

Die Dichte der Luft beträgt bei 0°C und 1013,3 mbar 1,293 g/l.
Dieser Wert wird als Normdichte bezeichnet.

© physik.begreifen, DESY

Vakuumpumpen

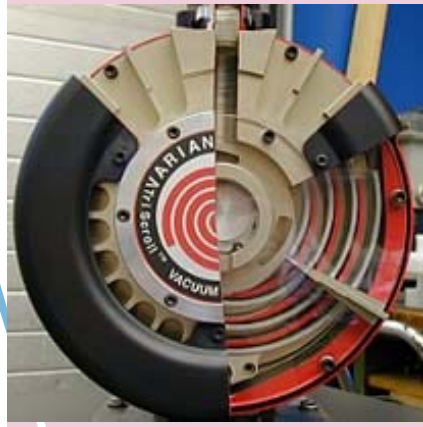
Die Teilchenphysiker bei DESY brauchen für ihre Experimente ein besseres Vakuum, als es im Schülerlabor erreicht wird. Damit die Teilchen die notwendige Geschwindigkeit — sie bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit — erreichen können, benötigt man ein Ultrahochvakuum.

Um es zu erzeugen, wurden im Laufe der Zeit zahlreiche unterschiedliche Pumpentypen entwickelt. Bei DESY verwendet man Scrollpumpen, Turbomolekularpumpen, Ionengetterpumpen und Titan-Sublimationspumpen.

Scrollpumpen

In der Scrollpumpe befinden sich zwei ineinander gesteckte Spiralzylinder. Einer ist drehbar, aber die Achse liegt nicht in der Mitte der Pumpenkammer, sondern etwas daneben.

Es entstehen bei der Drehung des einen Spiralzylinders in der Kammer Bereiche, die sich abwechselnd vergrößern und verkleinern. Auf diese Weise wird Gas in die Pumpe gesaugt, eingeschlossen, verdichtet und ausgestoßen. Ventile sorgen dafür, dass immer nur aus einem Raum Luft entnommen und in den anderen gepumpt wird.

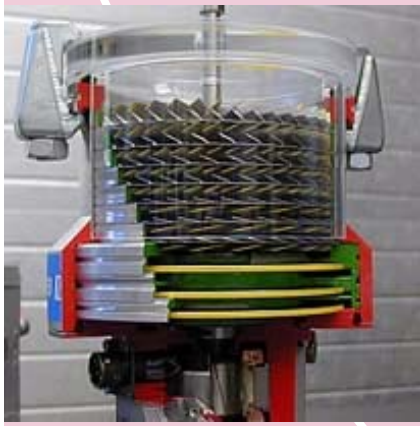


Turbo-Molekularpumpe

Die Turbo-Molekularpumpe, eine Erfindung aus dem Jahre 1958, funktioniert wie ein Ventilator.

Bei diesem Staubsauger für Gasmoleküle erreichen die hochtourigen Schaufelblätter fast Schallgeschwindigkeit. Sie geben den Gasmolekülen einen kräftigen Stoß und befördern sie so nach außen. Im Vakuum herrscht dann ein Luftdruck von einem Milliardstel des Atmosphärendrucks.

Damit Turbo-Molekularpumpen richtig funktionieren, muss der Luftdruck zuvor durch eine andere Pumpe, z.B. eine Scrollpumpe, erniedrigt worden sein.



© physik.begreifen, DESY

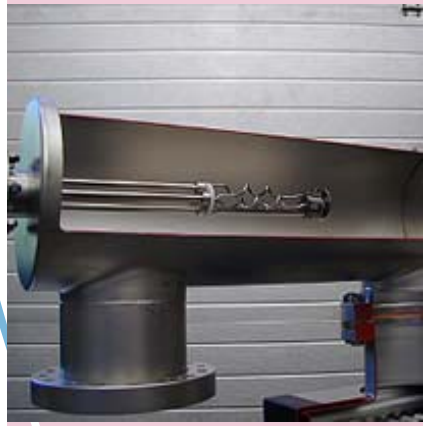
Ionengetterpumpe

In Getterpumpen sind keine beweglichen, mechanischen Teile zu finden. Die Gasmoleküle werden vielmehr im Innern der Pumpe am so genannten Gettermaterial chemisch gebunden.

Dazu wird das Gas ionisiert, d.h. elektrisch aufgeladen und dann mit Hilfe einer Hochspannung auf das Gettermaterial (zum Beispiel Titan) beschleunigt. Dabei wird die Oberfläche durch die auftreffenden Ionen zerstäubt. Das frei gewordene Titan bindet die Gasmoleküle chemisch an sich und setzt sich wieder an den Innenwänden der Pumpe ab.

Titan-Sublimationspumpe

In dieser Pumpe werden Gasmoleküle chemisch gebunden. Dazu wird ein dicker Draht aus Titan durch einen starken Strom bei über 1300 Grad zur Weißglut gebracht. Das Titan verdampft dabei: Es sublimiert. Der Titan-Dampf kondensiert nun an den kälteren Wänden der Pumpe wie Wasserdampf an einer Fensterscheibe und kann dort mit den Luftmolekülen in der Pumpe reagieren: Gase wie Sauerstoff, Stickstoff oder Kohlendioxid werden so chemisch ans Titan gebunden.



© physik.begreifen, DESY