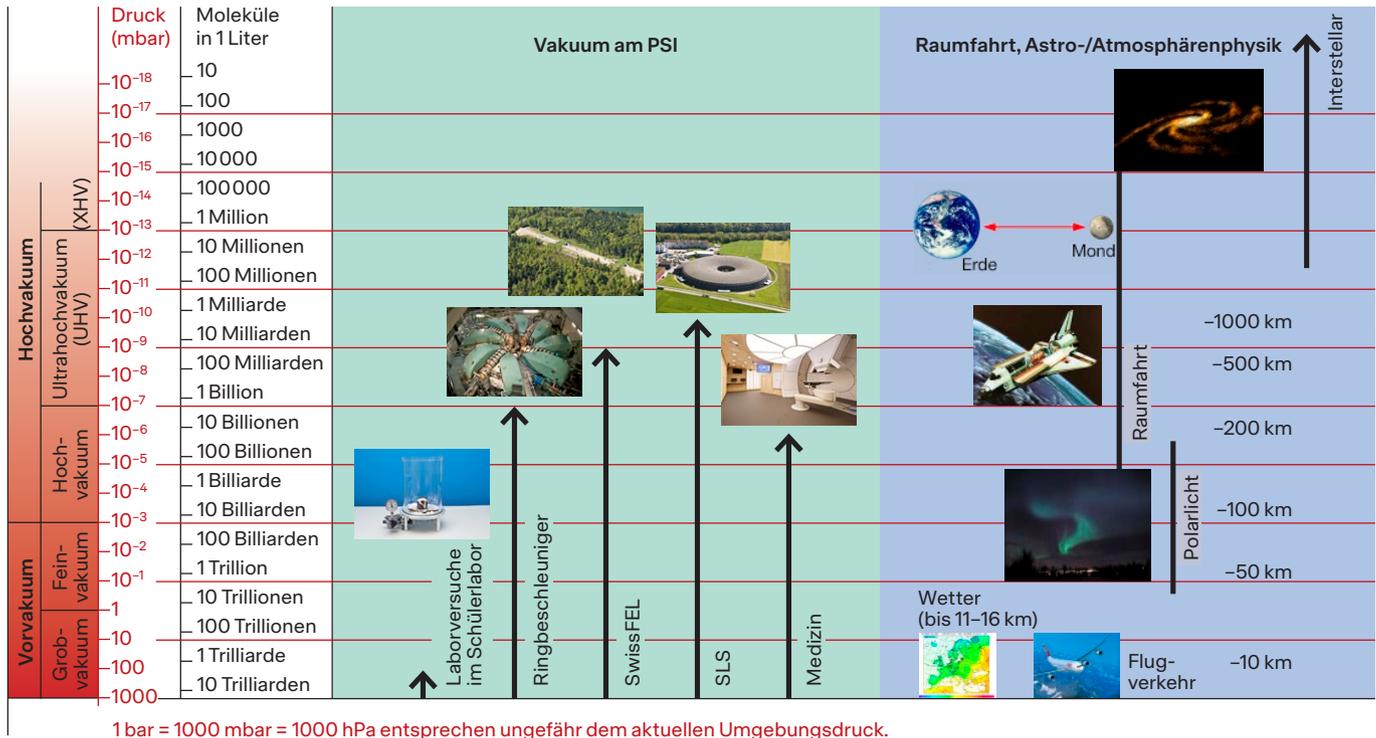


Experimente mit Vakuum

— am PSI iLab

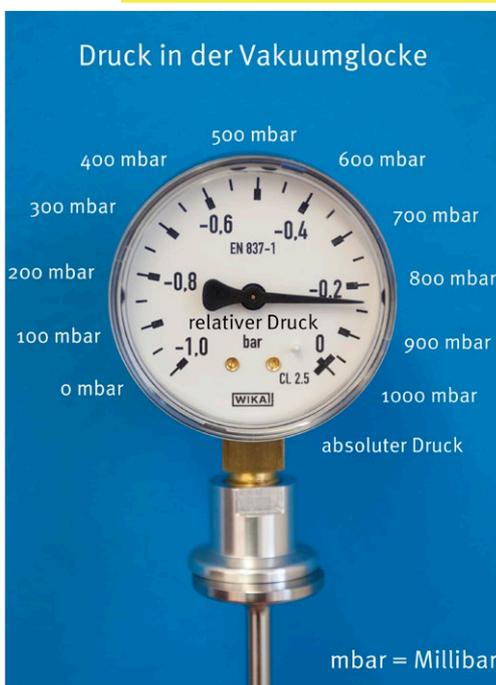


Für die Forschung am PSI benötigen wir ein Vakuum von bis zu einem Milliardstel Millibar (10^{-9} mbar)



Zu beachten bei allen Experimenten

- **Die Vakuumpumpe darf keinesfalls ausgeschaltet werden, solange im Behälter Unterdruck herrscht!** Wird die Vakuumpumpe (in Öl laufende Drehschieberpumpe) bei vorhandenem Unterdruck abgeschaltet, fließt Öl durch die weissen Schläuche in das Vakuumgefäß. Das anschliessende Reinigen ist umständlich und zeitraubend! Das Vakuumventil muss daher vor dem Abschalten der Pumpe immer geöffnet werden.
- Es ist stets darauf zu achten, dass **kein Wasser, Schaum oder sonstiges Material ins Saugrohr** gelangt. Die Vakuumpumpe könnte dadurch beschädigt werden. Stell deshalb bei Experimenten mit Flüssigkeiten das Gefäß in die Plexiglasglocke und schliess die Plexiglasglocke kopfüber mit der Bodenplatte von oben.
- Das Vakuumventil bitte nur leicht zudrehen.
- Nach dem Einschalten der Vakuumpumpe muss eventuell die Plexiglasglocke etwas angedrückt werden, damit die Gummidichtung gut schliesst.



Das Manometer zeigt den Druck in Bar an. 1 bar entspricht 1000 mbar (Millibar). Unser Manometer zeigt die Abweichung vom normalen Umgebungsdruck, also den relativen Druck an. Steht auf der Anzeige -0.4 bar, herrscht demnach ein absoluter Druck von 600 mbar. In dieser Anleitung wird der Druck stets in mbar angegeben.

Ballons und PET-Flaschen

- Blas einige Ballons leicht auf und leg sie unter die Vakuumlöcke.
- Was passiert beim Abpumpen der Luft aus der Vakuumlöcke?
- Du kannst das Experiment auch mit PET-Flaschen (normal und zusammengedrückt) wiederholen.



→ Wenn man die Luft in der Vakuumlöcke abpumpt, sind in den Ballons auf gleichem Raum mehr Luftmoleküle vorhanden als ausserhalb. Mit durchschnittlich etwa Schallgeschwindigkeit (343 m/s) stossen diese gegen die Ballonwand und drücken sie nach aussen, ähnlich wie wenn Menschen bei einem Gedränge die Abschränkungen wegdrücken. Deshalb füllen die nur leicht aufgeblasenen Ballons nach und nach fast das ganze Volumen der Vakuumlöcke aus.



Ein Wetterballon erreicht in 20–30 km Höhe (Stratosphäre) die Grösse eines Hauses.

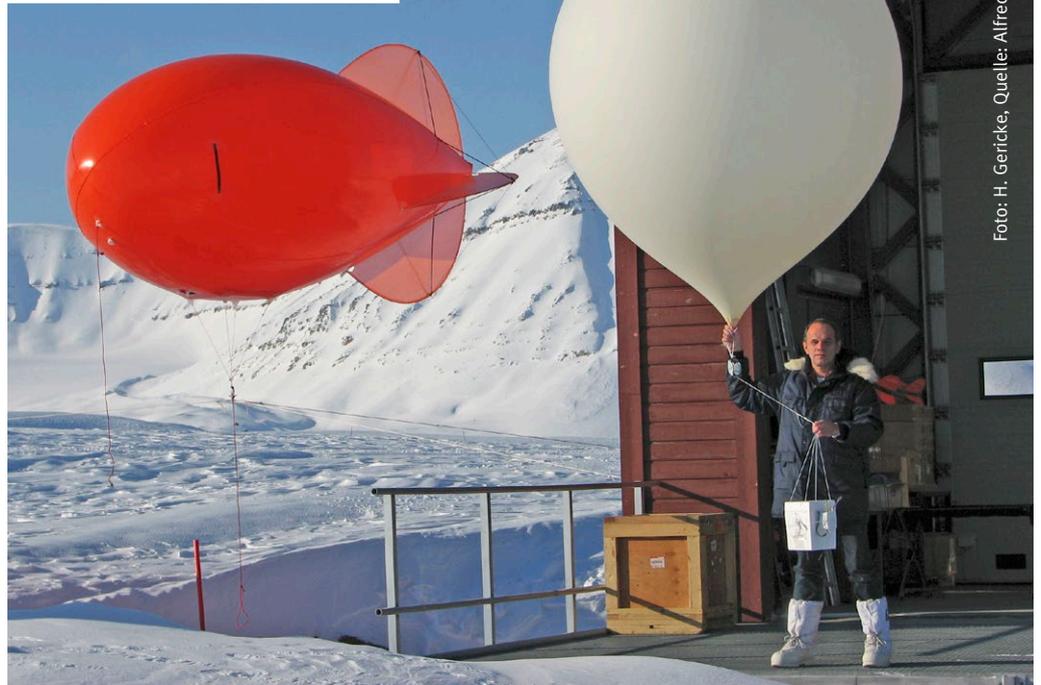


Foto: H. Gericke, Quelle: Alfred-Wegener-Institut



Dasselbe passiert mit den Ballons eines Flugwettbewerbs, wenn sie an Höhe gewinnen: Sie werden grösser, bis sie platzen.

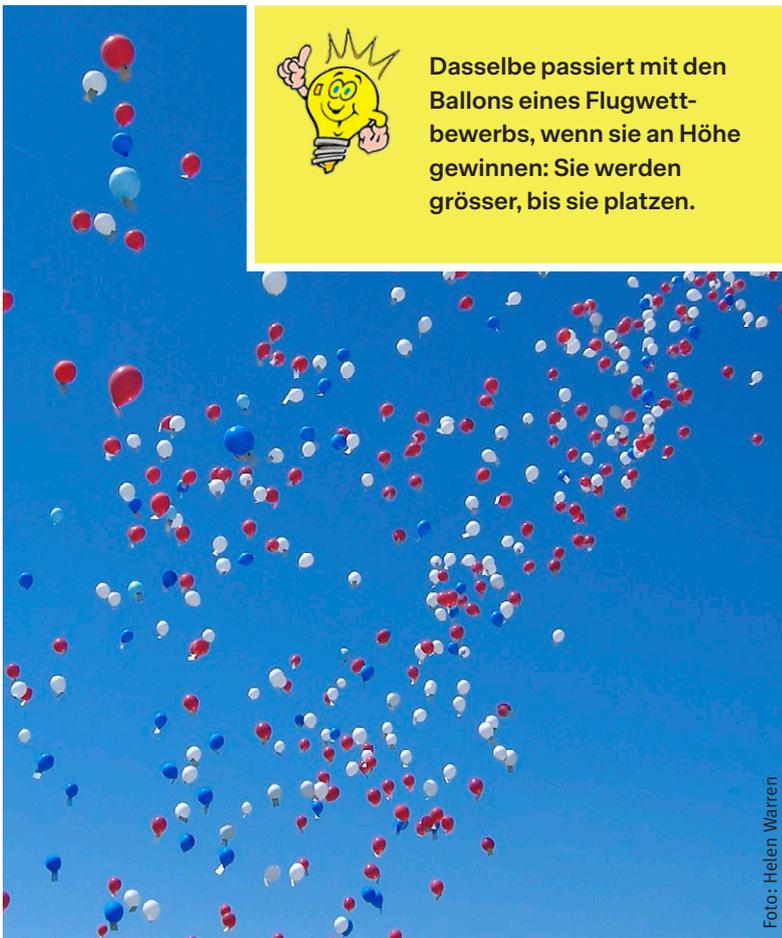


Foto: Helen Warren

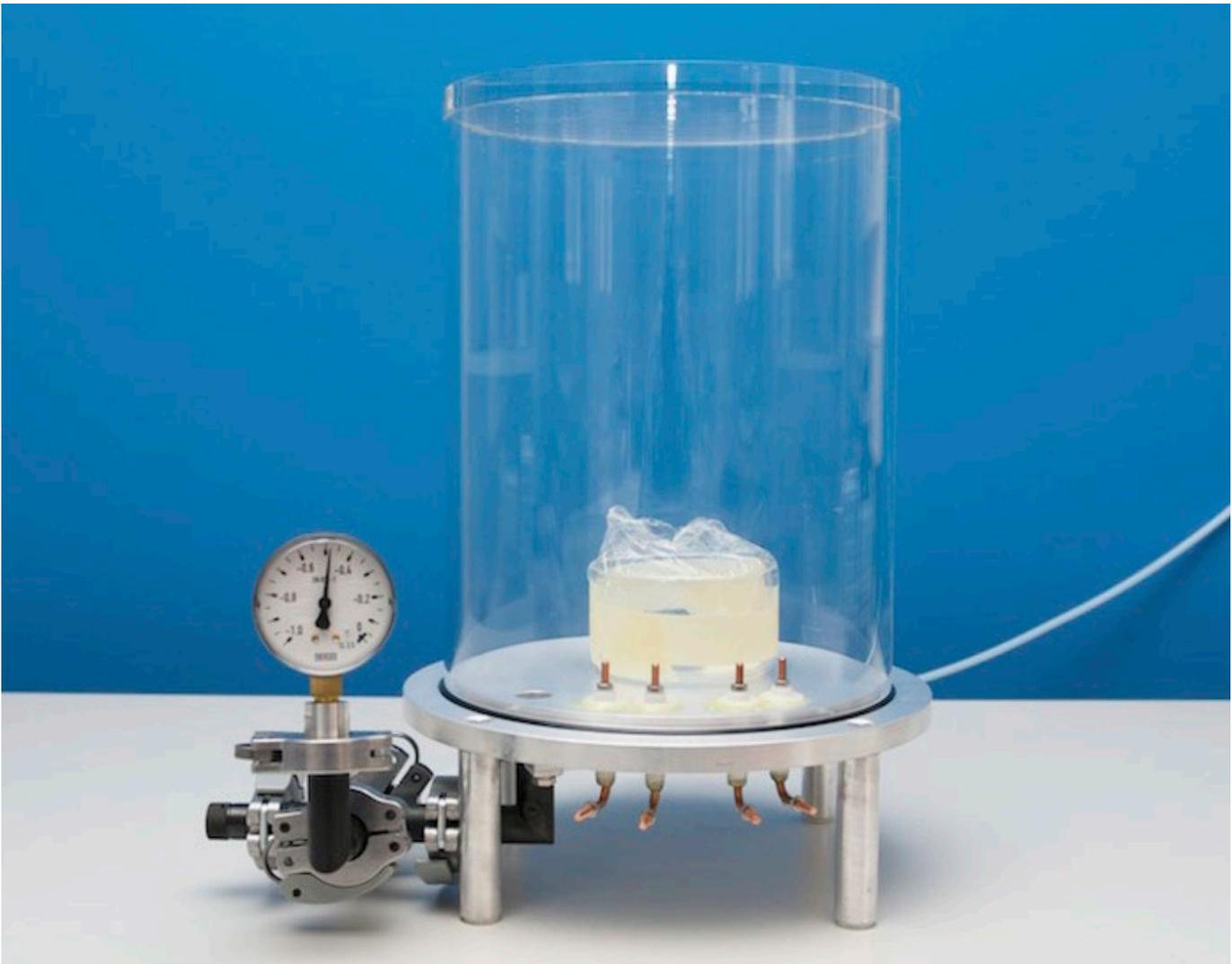


In einem Bergrestaurant sind alle Joghurtdeckel nach aussen gewölbt, weil die Joghurts im Flachland bei grösserem Luftdruck abgefüllt wurden.

Die im Bergrestaurant halb mit Wasser aufgefüllte PET-Flasche ist bei der Ankunft im Tal etwas zusammengedrückt durch den nun grösseren Luftdruck.

Folie

- Spann ein Stück Frischhaltefolie über die Öffnung eines Glasgefässes und kleb sie mit Klebeband fest.
- Pump die Luft bis 100 mbar (-0.9 bar auf der Anzeige) ab und lass diese anschliessend durch Öffnen des Ventils schnell wieder einfließen.



→ Beim Abpumpen entweicht die Luft aus dem Glasgefäss durch mehrere kleine Spalte zwischen Folie und Gefäss. Beim anschliessenden Einströmen der Luft in die Vakuumpumpe drückt diese die Folie auf das Glasgefäss und schliesst es luftdicht ab. Dadurch entsteht eine Druckdifferenz zwischen innerhalb und ausserhalb des Gefässes. Auf eine 20 cm^2 grosse Folie wirkt so nach einem vollständigen Vakuum eine Kraft, die dem Gewicht von etwa 20 kg Masse entspricht: Die Folie zerreisst.

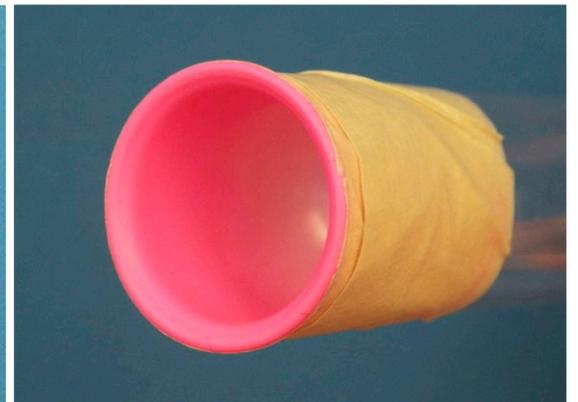


Analog kann bei zu schnellem Abtauchen das Trommelfell infolge des Wasserdruckes platzen, da der Druckausgleich durch die eustachische Röhre zwischen Mund und Mittelohr zu langsam erfolgt. Dasselbe gilt beim Auftauchen.

Die Zu-/Abnahme des Druckes in einem Gewässer beträgt rund 1 bar (= 1000 mbar) pro 10 m.



- Dieser Versuch kann auch mit einem Stück Ballonhaut über einem Reagenzglas durchgeführt werden.



Seifenblasen

- Gib wenig Flüssigseife und Wasser in ein Gefäß, rühr kräftig um oder schüttle es und stell es in die Vakuumblocke.
- Schliess die Vakuumblocke kopfüber mit der Bodenplatte von oben (siehe Foto).
- Was passiert beim Abpumpen der Luft aus der Vakuumblocke?



Achtung:

Achte darauf, dass kein Wasser oder Schaum ins Saugrohr gelangt!
Die Anlage könnte sonst beschädigt werden.



→ Analog dem Experiment 1 mit den Ballons dehnt sich die Luft in den Seifenblasen aus, deshalb wachsen die Seifenblasen im Vakuum.

Spritze mit Luft oder Wasser

- Füll einen Messbecher bis zur Hälfte mit Wasser.
- Stell die mit Luft gefüllte Spritze in den Messbecher.
- Platziere den Messbecher in der Vakuumglocke, schliesse die Vakuumglocke kopfüber mit der Bodenplatte von oben und pump die Luft ab.
- Was kannst du beim Abpumpen der Luft beobachten?



→ Beim Abpumpen der Luft sinkt der Luftdruck ausserhalb der Spritze ab. Dadurch entsteht in der Spritze ein Überdruck: Die in der Spritze eingeschlossene Luft dehnt sich aus, entweicht aus der Spritze und bildet deutlich sichtbare Blasen. Wird die Luft wieder in die Vakuumglocke gelassen, herrscht in der Spritze gegenüber der Glocke ein Unterdruck. So drückt die einströmende Luft in der Vakuumglocke das Wasser vom Messbecher in die Spritze, die Spritze füllt sich. (Siehe auch Experiment 5, Einfaches Luftdruck-Messgerät)

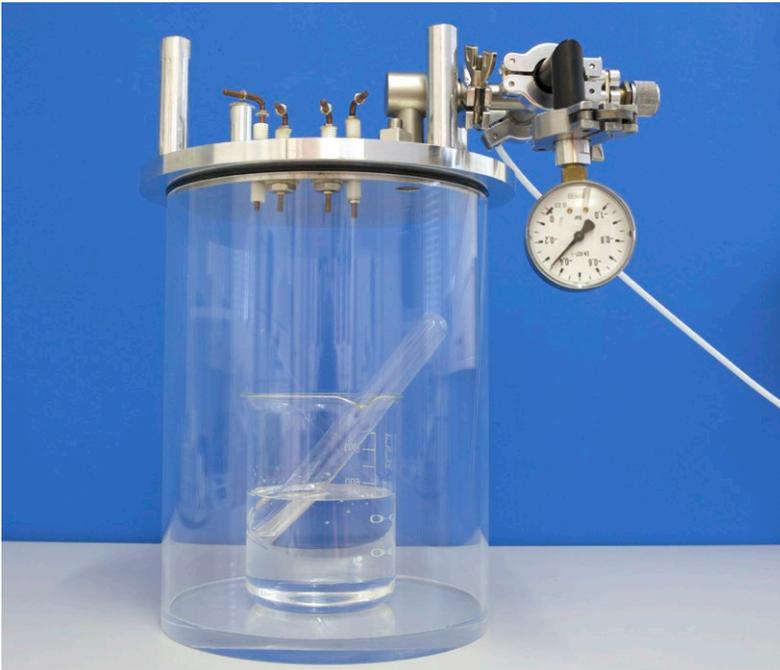
Noch ein Experiment

- Füll die Spritze vollständig mit heissem Wasser und sorg dafür, dass kein Luftbläschen zurückbleibt.
- Stell sie in einen leeren Messbecher und pump so lange Luft ab, bis der Druck des Wasserdampfes das Wasser aus der Spritze hinausdrückt.

Experiment 5

Einfaches Luftdruck-Messgerät (Barometer)

- Stell ein Reagenzglas mit der Öffnung nach unten in einen bis zur Hälfte mit Wasser gefüllten Messbecher.
- Platziere den Messbecher in der Vakuumblocke und schliesse die Vakuumblocke kopfüber mit der Bodenplatte von oben. Pump die Luft ab und beobachte, was passiert.
- Lass wieder Luft in die Glocke zurückfließen.



→ Beim Abpumpen dehnt sich die Luft im Reagenzglas aus und entweicht durch die Öffnung. Lässt man die Luft wieder in die Glocke einströmen, steigt der Druck auf die Wasseroberfläche wieder an und presst Wasser ins Reagenzglas. Dadurch wird die Restluft im Reagenzglas zusammengedrückt, bis ganz oben nur noch eine kleine Luftblase sichtbar ist.

→ Statt mit einem Reagenzglas könnte man dasselbe Experiment mit einem 11 m langen, oben geschlossenen Rohr durchführen. Das Wasser könnte am Ende aber höchstens rund 10 m aufsteigen, weil eine Wassersäule von 10 m Höhe gerade einen Druck von einer Atmosphäre (1 bar = 1000 mbar) ausübt. Wasser- und Luftdruck sind somit im Gleichgewicht. Sinkt der Luftdruck, sinkt

auch die Höhe der Wassersäule und umgekehrt. So funktioniert ein Wasserbarometer.

→ Für ein Quecksilberbarometer braucht man nur ein Rohr von 80 cm Höhe, weil Quecksilber eine rund 14-mal größere Dichte als Wasser hat. Eine Quecksilbersäule von 76 cm Höhe ist somit im Gleichgewicht mit dem Luftdruck.



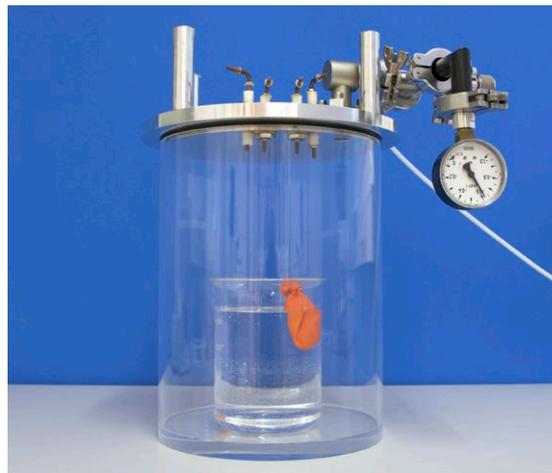
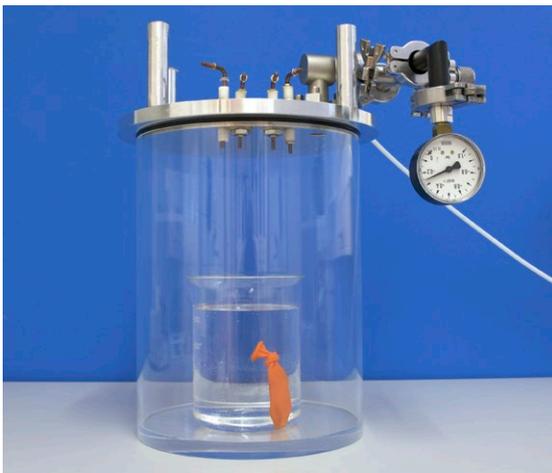
Über welche maximale Höhendifferenz kann eine Pumpe Wasser «ansaugen»?



Blutabnehmerörchen sind luftleer, nur so kann Blut hineinfließen.

Kartesischer Taucher

- Gib ein, zwei Steinchen in einen fast luftleeren Ballon und verknote ihn.
- Füll einen Messbecher mit Wasser und gib den Ballon hinein. Der Ballon soll bis zum Boden des Messbechers absinken.
- Stell den Messbecher in die Vakuumbglocke, schliess die Vakuumbglocke kopfüber mit der Bodenplatte von oben und pump die Luft ab.



→ Bei der Reduktion des Luftdrucks im Vakuumbgefäss dehnt sich die Luft im Ballon aus, weil der Druck auf die Wasseroberfläche und damit auf die Ballonhülle kleiner wird. Der Ballon wird dadurch grösser und verdrängt mehr Wasser: Der Auftrieb vergrössert sich entsprechend und der Ballon steigt auf.



Unterseeboote regulieren ihre Tauchtiefe ähnlich. Sie verändern aber nicht das Volumen, sondern ihre Masse. Zum Sinken wird Wasser in eine Kammer eingelassen. Zum Aufsteigen wird das Wasser wieder hinausgepumpt.



Bei Fischen steuert eine ballonähnliche Schwimmblase die Tauchtiefe, wobei es zwei Gruppen gibt:

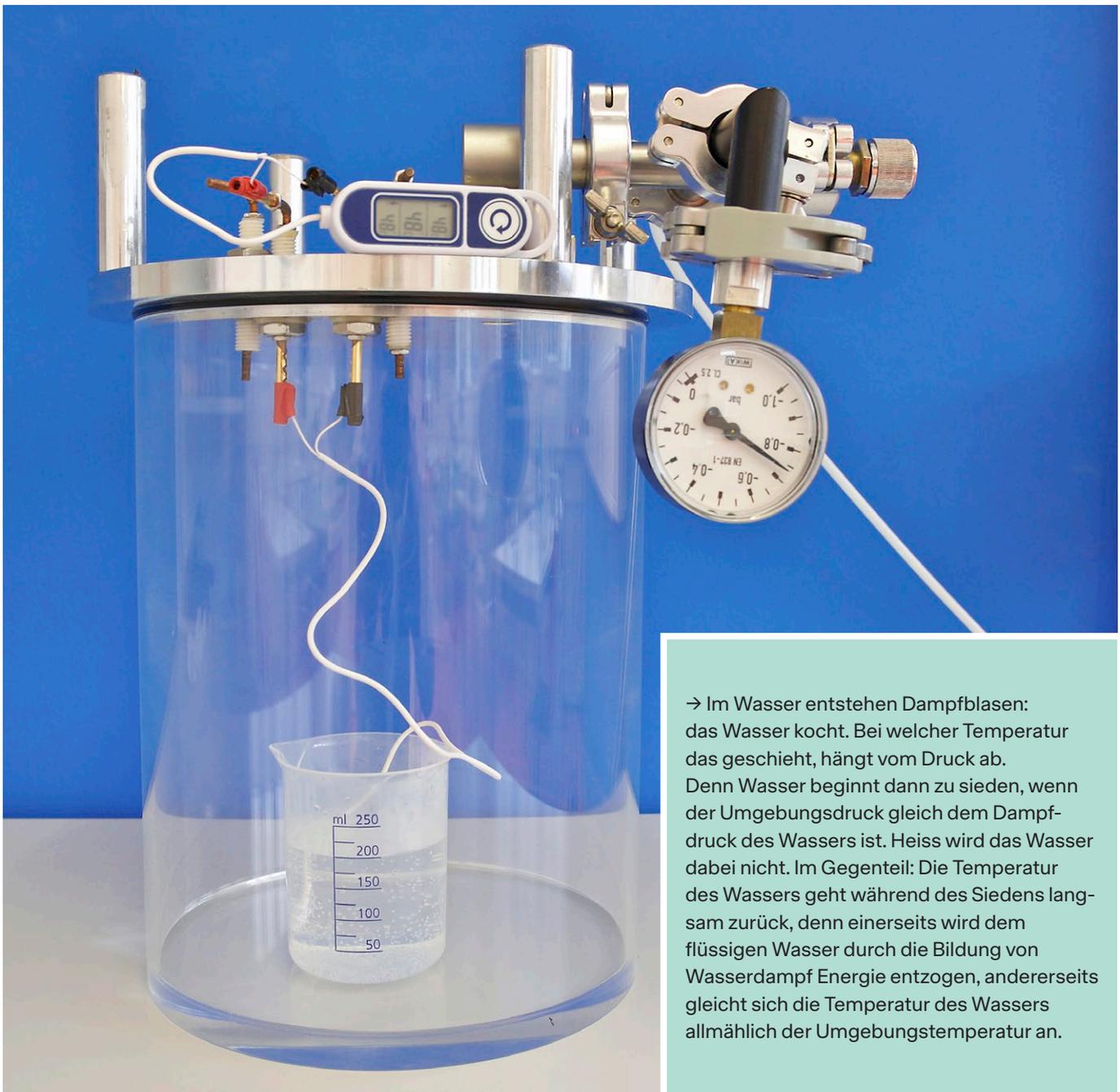
Bei den **Physostomen** (stoma griech. = Mund) ist der Darm mit der Schwimmblase verbunden, sodass sie durch Schlucken von Luft gefüllt werden kann. Oft haben Raubfische diese Eigenschaft.



Bei den **Physoklisten** (klisto griech. = geschlossen) ist die Schwimmblase abgeschlossen, wie beispielsweise bei Tiefseefischen. Der Gasaustausch erfolgt durch Gasdrüsen via Blutgefässe.

Dampfdruck

- Füll einen 250 ml-Messbecher bis zur 200 ml-Marke mit warmem Wasser (ca. 50 °C).
- Platziere den 250 ml-Messbecher in der Vakuumglocke.
- Schliesse das Thermometer wie in der Abbildung an die Bodenplatte an, damit der Fühler in den Messbecher hängen kann und sich die Anzeige ausserhalb der Vakuumglocke befindet.
- Schliesse die Vakuumglocke mit der Bodenplatte von oben und pump die Luft ab.
- Was passiert mit dem Wasser?



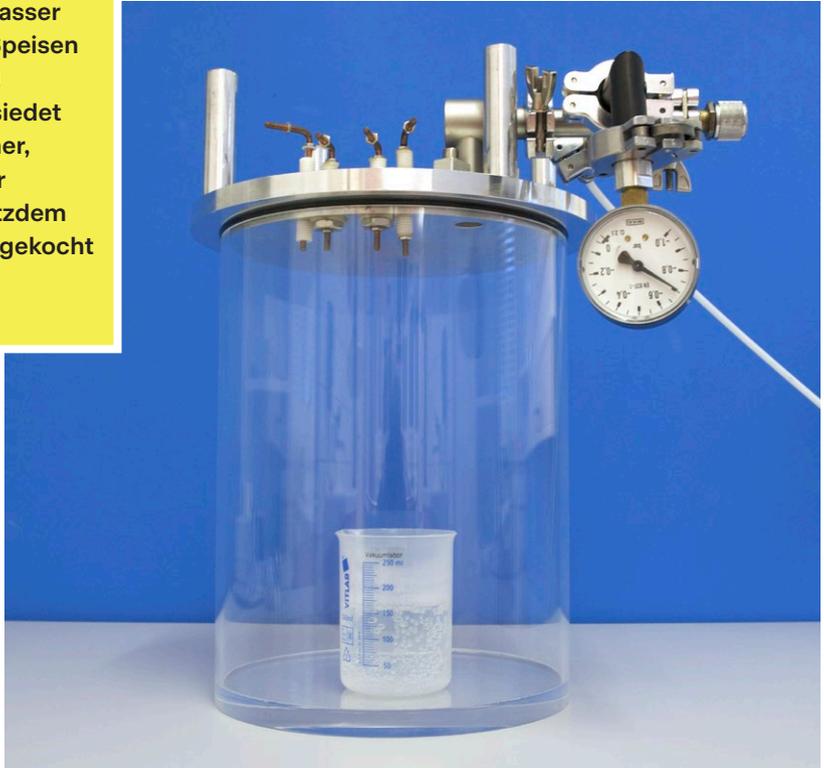
→ Im Wasser entstehen Dampfblasen: das Wasser kocht. Bei welcher Temperatur das geschieht, hängt vom Druck ab. Denn Wasser beginnt dann zu siedens, wenn der Umgebungsdruck gleich dem Dampfdruck des Wassers ist. Heiss wird das Wasser dabei nicht. Im Gegenteil: Die Temperatur des Wassers geht während des Siedens langsam zurück, denn einerseits wird dem flüssigen Wasser durch die Bildung von Wasserdampf Energie entzogen, andererseits gleicht sich die Temperatur des Wassers allmählich der Umgebungstemperatur an.

Beispiele für Siedetemperaturen auf verschiedenen Höhen			
Ort	Höhe in m ü. M.	Luftdruck in mbar	Siedetemperatur von Wasser in °C
Venedig	0	1013	100.0
PSI	333	974	98.9
Gotthardpass	2106	778	92.8
Matterhorn	4478	578	85.0
Mount Everest	8848	335	71.7

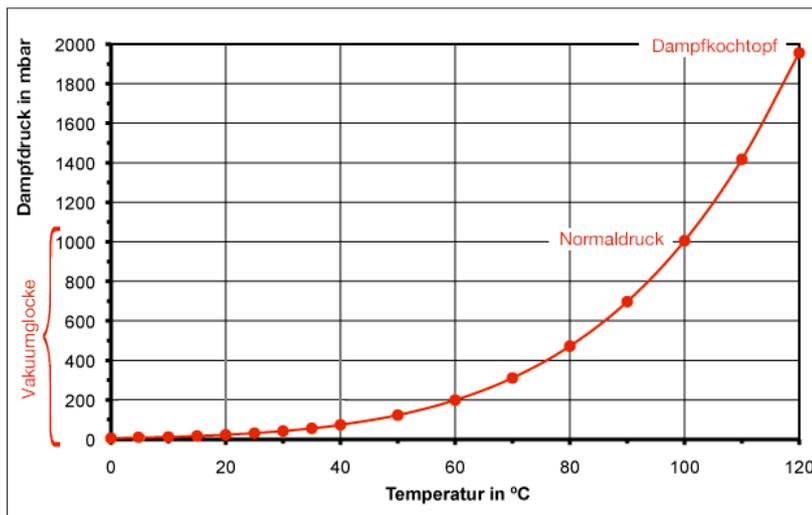


Im Dampfkochtopf ist der Innendruck etwa doppelt so hoch wie der normale Luftdruck. Deshalb siedet das Wasser erst bei rund 120 °C. So können Speisen schneller weichgekocht werden!

In der Höhe hingegen siedet das Wasser zwar rascher, da die Temperatur aber tiefer ist, dauert es trotzdem länger, bis die Speisen gekocht sind.

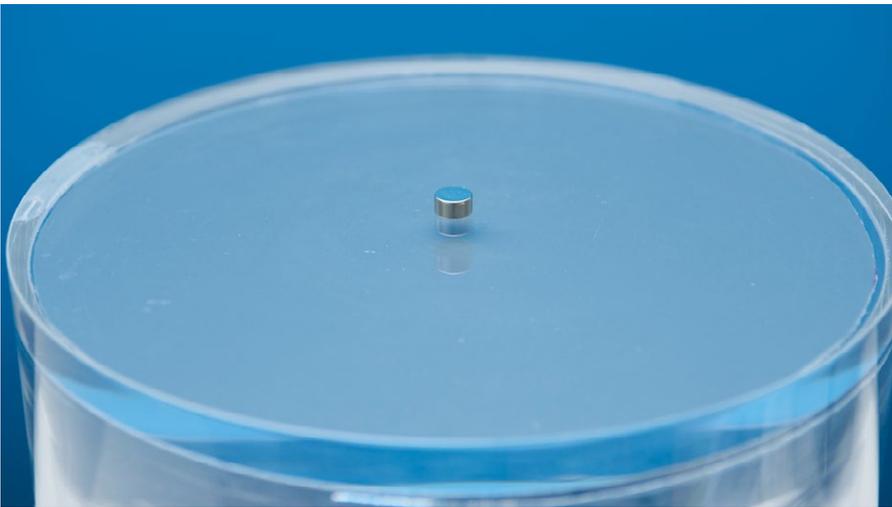
Dampfdruckkurve	
Temperatur in °C	Dampfdruck in mbar
0	6.1
5	8.7
10	12.3
15	17.4
20	23.4
25	31.7
30	42.4
35	56.2
40	73.8
50	123.0
60	199.0
70	311.0
80	472.0
90	697.0
100	1005.0
110	1417.0
120	1956.0



Experiment 8

Fallversuch

- Befestige die Platte, ein Papierstück oder eine Feder mit zwei Magneten an der Decke der Vakuumglocke, je einem Magneten innen und aussen.
- Lass die Platte/Feder in Luft fallen, indem du den Magneten oben auf der Vakuumglocke senkrecht nach oben hin wegnimmst.
- Nun wiederholst du denselben Versuch im Vakuum.



→ Eine Platte, welche die Querschnittsfläche des Vakuumgefäßes einnimmt, fällt in Luft nur langsam nach unten, ähnlich einem offenen Fallschirm.

Im Vakuum müssen wesentlich weniger Luftmoleküle durch den schmalen Spalt rund um die Platte nach oben fließen: Die Platte fällt deshalb beinahe ungebremst.





Im Vakuum fallen alle Körper gleich schnell: Ein Papierstück fällt so schnell wie ein Golfball! Beobachten kann man dieses Phänomen auch im 4 m hohen Fallturm des PSI Visitor Centers.



Saugnapf

- Befestige ein Stofftier mit dem Saugnapf an der Innenseite der Vakuummotte, vorzugsweise am Deckel.
- Was passiert beim Abpumpen der Luft aus der Vakuummotte?
- Das Experiment kannst du nun mehrmals wiederholen, indem du den Saugnapf mehr oder weniger fest andrückt. Welche Unterschiede kannst du dabei feststellen?

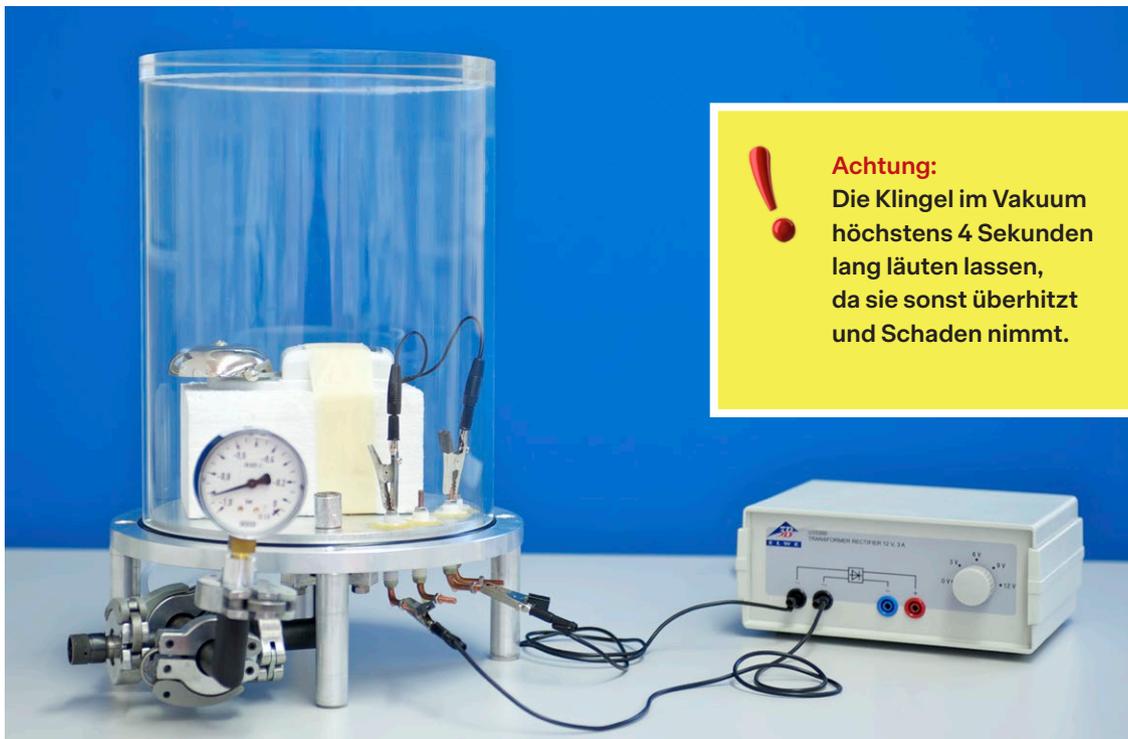


Der gewöhnliche Oktopus besitzt an seinen Fangarmen bis zu 2000 Saugnäpfe. Er kann jeden Saugnapf einzeln bewegen und erzeugt pro Saugnapf einen Unterdruck von bis zu 1 bar, was einem Atmosphärendruck entspricht.

→ Beim Befestigen des Saugnapfs an einer glatten Oberfläche wird die Luft zwischen dem Saugnapf und der Oberfläche herausgedrückt. Dadurch entsteht in der Wölbung ein Unterdruck. Die umgebende Luft mit höherem Druck presst den Saugnapf fest an die Oberfläche und hält ihn so an Ort und Stelle. Wird nun die Luft aus der Vakuummotte abgepumpt, nimmt der äussere Luftdruck ab. Je geringer der äussere Druck wird, desto schwächer ist die Kraft, die den Saugnapf an die Oberfläche drückt. Sobald der äussere Druck dem Druck unter der Wölbung des Saugnapfs entspricht, löst sich dieser und das Stofftier fällt herunter.

Klingelversuch

- Schliess die Klingel an die schwarzen Wechselstrombuchsen des Netzgerätes an und wähl eine Spannung von 6 Volt. Schalt die Klingel wieder aus.
- Pump die Luft aus der Vakuumglocke ab und schalt die Klingel mehrere Male für maximal 4 Sekunden ein.



→ Schallwellen sind Druckschwankungen: Ohne ein Medium (z.B. Luft) kann sich Schall nicht ausbreiten. Die Klingel wird umso leiser, je weniger Luft im Gefäss vorhanden ist.



Im Weltall ist es absolut still. Schall findet dort kein Medium, um sich auszubreiten. Sonst würden wir zum Beispiel die gewaltigen Eruptionen auf der Sonne hören. In Science Fiction Filmen hört man manchmal das Schliessen von Luken, selbst wenn sich die Kamera ausserhalb des Raumschiffes befindet. Dies entspricht nicht der Wirklichkeit!

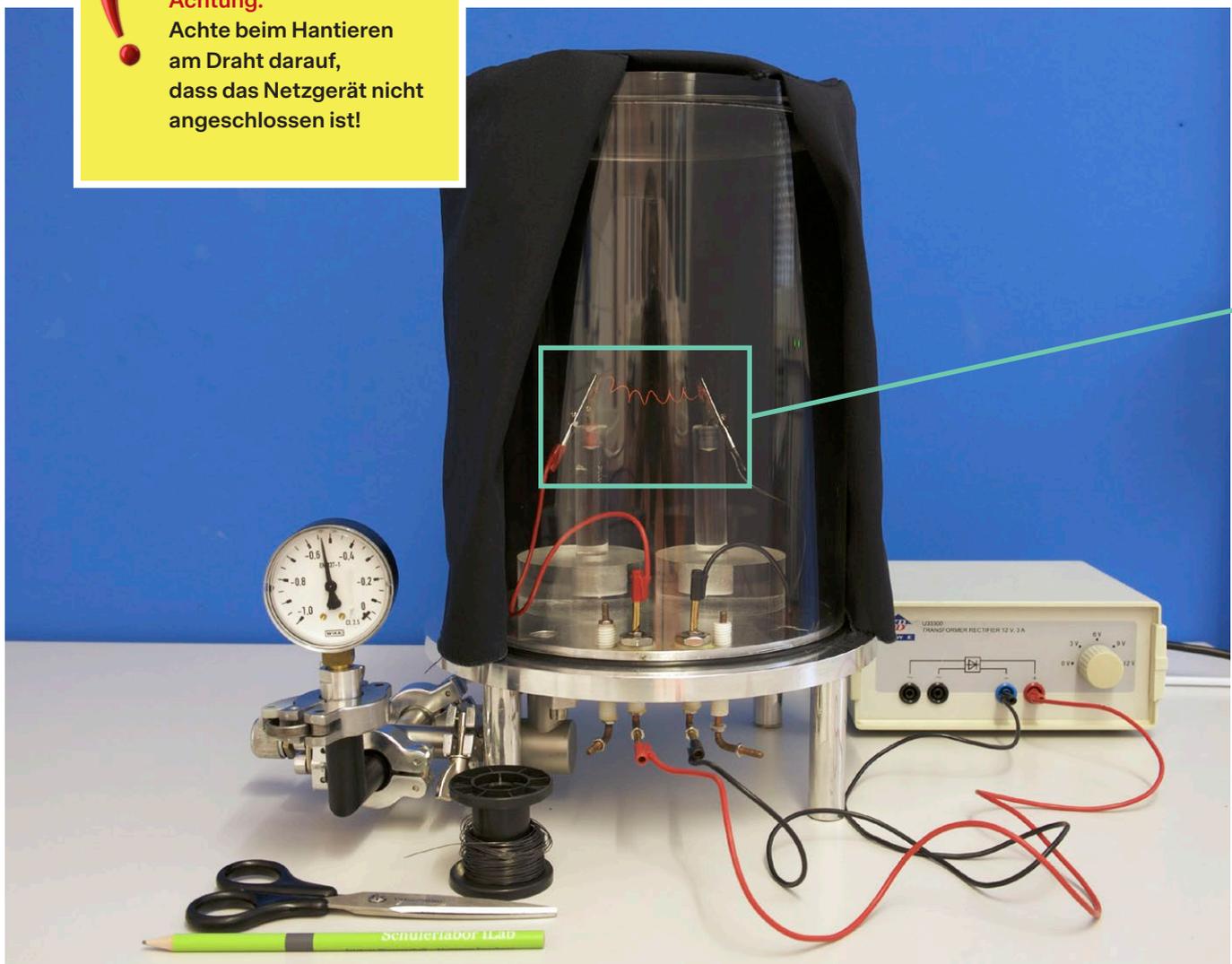
Glühdraht

- Nimm ein 20 cm langes Stück des Widerstandsdrahtes (Konstantandraht) mit Durchmesser 0.2 mm oder 0.3 mm und wickle es um einen Bleistift, sodass eine Spirale entsteht.
- Kratz mit einer Schere die Beschichtung von den Enden des Drahtes.
- Spann den Draht zwischen zwei Klemmen und prüf mit 3 Volt, ob ein Strom fließt: Entsteht etwas Rauch? Falls nein, erhöh die Spannung auf 6 Volt. Sobald Rauch entsteht, stell sofort auf 0 Volt. Falls kein Rauch entsteht, schalt ebenfalls auf 0 Volt und überprüf die Anschlüsse.
- Setz die Vakuumblocke auf und wähl kurzzeitig 6 bis 9 Volt am Netzgerät. Beobachte den Draht beim Abpumpen der Luft mit 6 bis 9 Volt.
- Beobachte, was beim Einströmen der Luft passiert.



Achtung:

Achte beim Hantieren am Draht darauf, dass das Netzgerät nicht angeschlossen ist!



→ Ohne Luft wird der Widerstandsdraht heisser (er glüht heller), weil er von den Luftmolekülen nicht mehr gekühlt wird. Luft ist ein wichtiges Kühlmittel.

→ Bei 9 bis 12 Volt fliesst ein Strom von 3 bis 8 Ampere durch den Draht. Er wird dann so heiss, dass er durchbrennen und die Stromleitung unterbrechen kann. So funktioniert eine Schmelzsicherung. Sie verhindert, dass bei zu grossen Strömen die Stromleitung in der Wand durchbrennt oder gar ein Brand entsteht.



Achtung:

Bei Überlastung des Netzgerätes durch Ströme von mehr als 3 Ampere schaltet sich dieses durch einen thermischen Überlastschutz selbst aus. Drehe die Spannung auf 0 Volt und warte ca. 1 Minute, bis sich das Gerät wieder einschaltet.

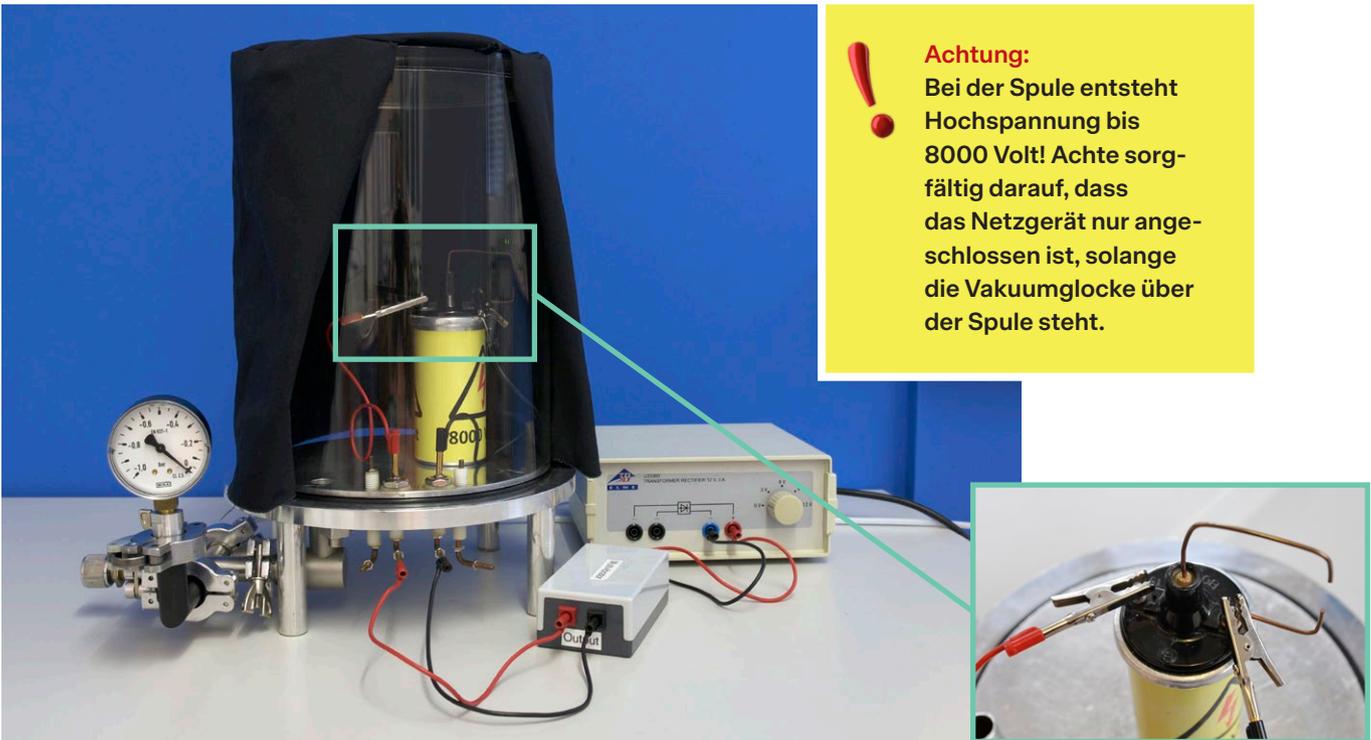


Früher wurde in den Glaskolben von Glühbirnen ein Vakuum erzeugt, damit der Draht heller leuchtet. Weil die Herstellung solcher Glühlampen aufwendig war, werden sie nun meist mit einem Schutzgas gefüllt. Das Schutzgas, z. B. Xenon oder ein Gemisch aus Argon und Stickstoff, hemmt die Verdampfung des Metalls der Glühwendel.

Konstantan: Der Widerstandsdraht besteht aus einer Legierung mit 55% Kupfer, 44% Nickel und 1% Mangan und hat einen ausserordentlich kleinen Temperaturkoeffizienten von $10^{-5}/K$. Sein spezifischer Widerstand von $49 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ entspricht einem Widerstand von 1.4Ω für 20 cm des Drahtes mit 0.3 mm Durchmesser.

Induktionsfunken

- Schliess die Zündspule wie in der Abbildung gezeigt an. Achte darauf, dass du den positiven Pol (rot) durchgehend mit positiven Polen verbindest. Dasselbe gilt für den negativen Pol. Stülp dann die Vakuummantel über die Zündspule.
- Pump die Luft aus der Vakuummantel bis auf etwa 200 mbar (-0.8 bar auf der Anzeige) ab.
- Schliess jetzt das Netzteil an und dreh die Spannung auf. Was passiert, wenn du die Spannung änderst? Was passiert, wenn du den Luftdruck veränderst?
- Halt einen Magneten in die Nähe der Funkenstrecke. Diese sollte möglichst nahe an der Wand der Vakuummantel stehen, sie aber nicht berühren. Was kannst du beobachten, wenn du den Magneten umdrehst?
- Schalt unbedingt die Spannung auf 0 Volt und zieh die Kabel aus dem Netzteil aus, bevor du die Luft wieder in die Vakuummantel einströmen lässt!



→ Die Spule erzeugt eine so hohe Spannung (bis 8000 Volt), dass (negative) Elektronen vom unteren Drahtende (Minuspol) zum oberen (Pluspol) springen. Auf ihrem Weg durch die verdünnte Luft stossen sie immer wieder mit Luftmolekülen zusammen und ionisieren diese.

→ Wir sehen nicht die Elektronen selbst. Wir sehen das emittierte Licht, welches entsteht, wenn ein durch einen

Zusammenstoss mit einem Elektron angeregtes Luftmolekül wieder in seinen Grundzustand fällt. In unserem Fall sehen wir das bläulich-violette Licht der Stickstoffmoleküle.

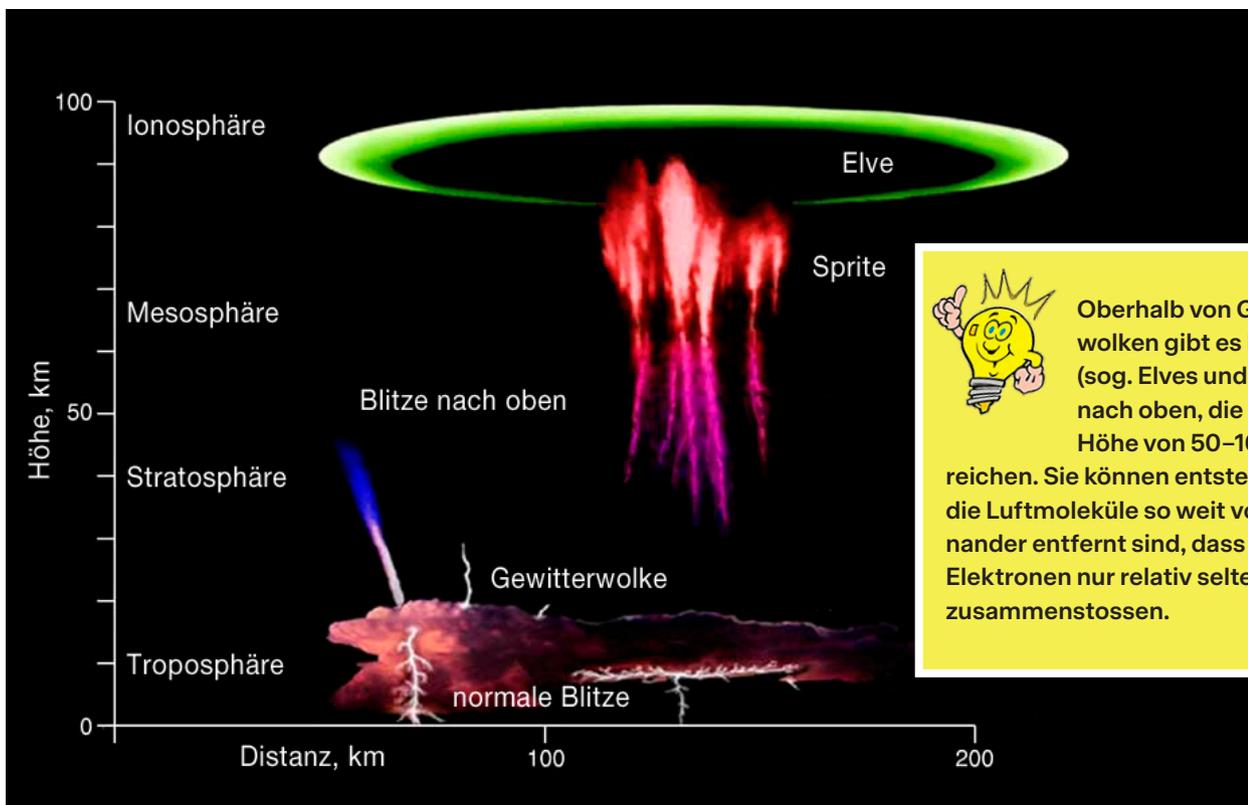
→ In verdünnter Luft (Unterdruck) können die Elektronen besser von einem Drahtende zum anderen fliegen.

→ Die Funkenentladung entsteht erst bei genügend tiefem Luftdruck, denn die Elektronen brauchen eine genügend grosse Geschwindigkeit, um die Luftmoleküle zu ionisieren. Wenn zu viele Luftmoleküle vorhanden sind (zu hoher Luftdruck), stossen die Elektronen früh mit den Luftmolekülen zusammen. Letztere werden dabei nicht ionisiert, weil die Elektronen noch zu langsam sind. Wenn nur wenige Luftmoleküle vorhanden sind (zu tiefer Luftdruck), ist der Lichtbogen nur schwach sichtbar.

→ Mit einem Stabmagnet lässt sich die Ablenkung durch die Lorentzkraft zeigen: Die Ablenkung erfolgt senkrecht

zum Magnetfeld und senkrecht zur Geschwindigkeit der Ionen oder Elektronen. Sie wächst mit zunehmender Spannung, d.h. mit zunehmender Geschwindigkeit der Ionen und Elektronen. Sie ist auch proportional zum Magnetfeld. Umpolen bewirkt eine Ablenkung in die andere Richtung. Dieser Effekt wird in Beschleunigern ausgenutzt, um Protonen oder Elektronen auf Kreisbahnen zu bewegen.

→ Bei richtiger Polung der elektrischen Anschlüsse werden die sich von unten nach oben bewegenden Elektronen durch den Nordpol des Magneten nach links abgelenkt.

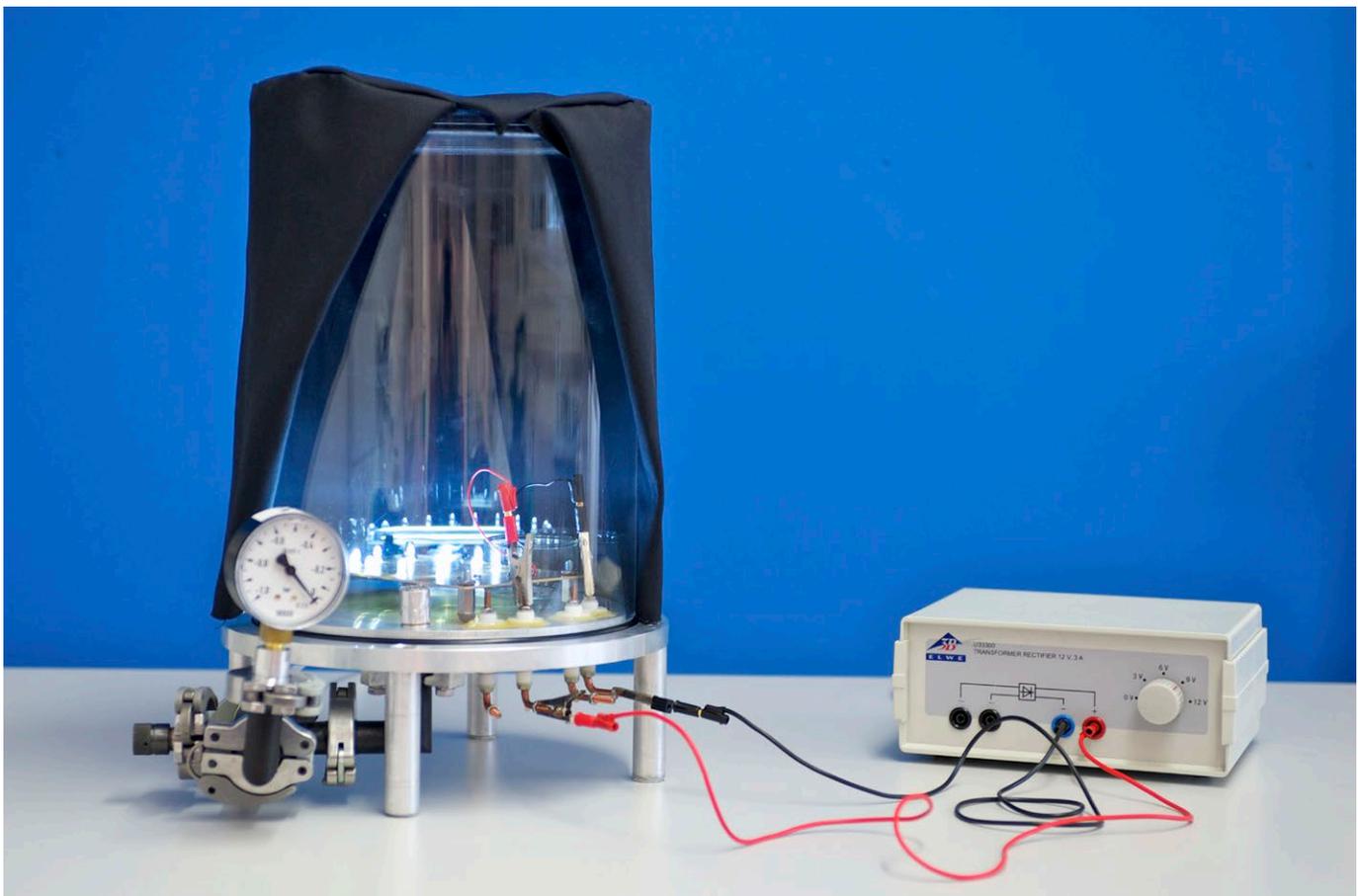


Oberhalb von Gewitterwolken gibt es Blitze (sog. Elven und Sprites) nach oben, die bis in eine Höhe von 50–100 km

reichen. Sie können entstehen, weil die Luftmoleküle so weit voneinander entfernt sind, dass die Elektronen nur relativ selten damit zusammenstossen.

Wolkenbildung

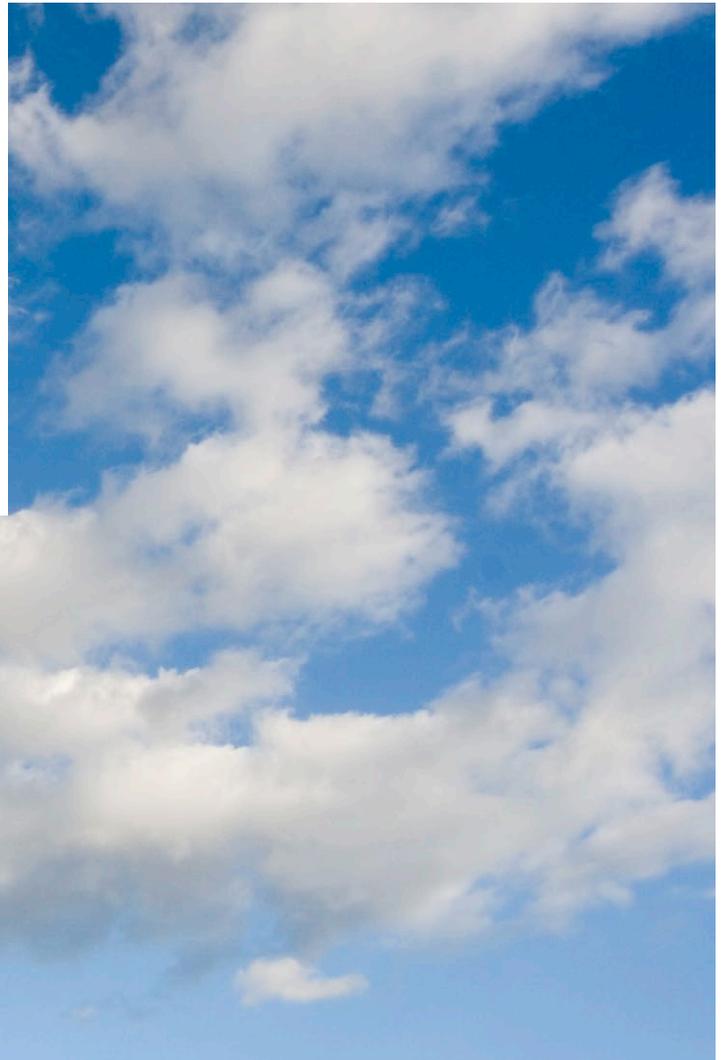
- Schliess die Leuchtdiodenplatte ans Netzgerät an und drehe den Spannungsregler auf 12 Volt.
- Atme 10 Mal tief in die Vakuumbglocke aus. Platzier die Vakuumbglocke auf der Metallplatte und pump langsam die Luft ab. Beobachte, wie ein feiner Wassertröpfchennebel oberhalb der Leuchtdioden entsteht.
- Öffne die Vakuumbglocke und starte das Experiment erneut:
- Atme nochmals 10 Mal tief in die Vakuumbglocke aus und halt danach ein brennendes Streichholz 1 Sekunde lang in die Vakuumbglocke. Pump nun erneut die Luft aus der Vakuumbglocke.
- Siehst du die Wolke, die beim Absaugen der Luft entsteht?



→ In unserem Versuch erhöhen wir die relative Feuchte mit unserer Atemluft. Wenn wir die Luft aus dem Vakuumgefäss abpumpen, dehnt sich die verbleibende Luft aus und kühlt sich dabei ab. Durch diese Abkühlung erhöht sich die relative Feuchte zusätzlich. Mithilfe des Rauches eines Streichholzes erhöhen wir den Aerosolgehalt (Feinstaubkonzentration), sodass mehr kleinere Wassertröpfchen (statt wenige grosse) entstehen: Die daraus entstehende Wolke ist besser sichtbar. Rauch und andere Aerosolteilchen fördern die Wolkenbildung.



In der Atmosphäre hat es überall Wasserdampf und kleine Aerosolteilchen, die als sogenannte Kondensationskeime wirken. Steigt Luft auf (z. B. durch die Thermik im Sommer), kühlt sie sich alle 100 m um 1°C ab, bis eine relative Feuchtigkeit von 100 % erreicht wird und der Wasserdampf um die Aerosolteilchen herum kondensiert – es bildet sich eine Wolke. Die Abkühlung der aufsteigenden Luft rührt daher, dass sie sich infolge des abnehmenden Luftdruckes ausdehnt.



Dasselbe Phänomen kann oberhalb von Flugzeugflügeln beobachtet werden, da dort ein Unterdruck erzeugt wird (um das Flugzeug zum Fliegen zu bringen).

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)