Mechanik der Flüssigkeiten und Gase

9 Ruhende Flüssigkeiten (Hydrostatik)

Allgemeine Eigenschaften einer Flüssigkeit:

Die atomaren Bausteine (meist Moleküle) einer Flüssigkeit sind im Gegensatz zu festen Körpern nicht regelmäßig angeordnet. Die Kräfte zwischen den Molekülen sind kleiner als in festen Körpern. Daher können sich die Moleküle relativ frei gegeneinander verschieben. Als Folge davon besitzt die Flüssigkeit keine bestimmte Form, sondern nimmt stets die des Behälters an. Der Widerstand (innere Reibung) gegen eine Verschiebung der Teilchen ist sehr gering. Allerdings besitzen Flüssigkeiten ein bestimmtes Volumen, das sich nur durch sehr hohe Kräfte geringfügig verändern lässt.

Ideale Flüssigkeiten sind reibungsfrei und inkompressibel.
Für viele Betrachtungen setzt man ideale Flüssigkeiten voraus.

9.1 Hydrostatischer Druck

Der Druck in einer ruhenden Flüssigkeit wird als hydrostatischer Druck bezeichnet. Druck kann einer Flüssigkeit von außen durch einen Kolben aufgezwungen werden. Aber auch durch das Eigengewicht (Schwerkraft) der Flüssigkeit stellt sich ein Druck ein.

$$Gesamtdruck = Kolbendruck\ (äußerer\ Druck) + Schweredruck$$

Kolbendruck:

Genau wie ein fester Körper steht auch eine Flüssigkeit bei Krafteinwirkung unter "Spannung". Diese Spannung wird als Druck bezeichnet. Mit einem Kolben lässt sich auf eine Flüssigkeit ein Druck ausüben.

$$Druck = \frac{Kraft}{Fläche}$$

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

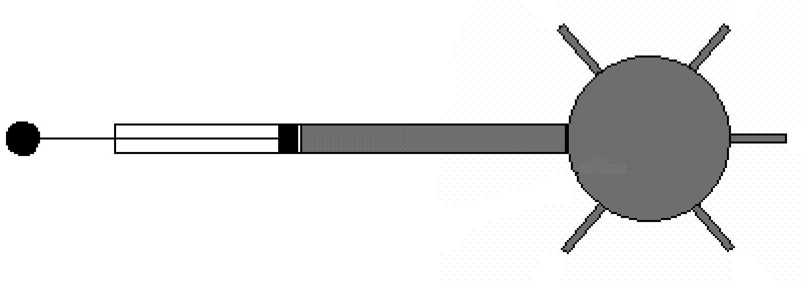
$$[p] = 1\frac{N}{m^2} = 1Pa \quad \text{(Pascal)}$$

$$1\ bar\ =\ 10^5\ Pa$$

Gesetz von Pascal:

Ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich nach allen Richtungen hin gleichmäßig fort.

Versuch: Ein Spritzigel wird mit Wasser gefüllt und durch den Kolben unter Druck gesetzt.



Das austretende Wasser hat überall auf Grund der gleichmäßigen Druckausbreitung die gleiche Austrittsgeschwindigkeit (auch nach hinten – also entgegen der Richtung der Kraft auf den Kolben!).

Der Druck hat keine bestimmte Richtung, er ist daher ein Skalar. Der Druck in einer Flüssigkeit macht sich an jeder Fläche als Kraft bemerkbar, die senkrecht auf jede Begrenzungsfläche wirkt. Oft wird der Druck durch Pfeile dargestellt. Diese geben dann die Kraft pro Flächeneinheit an.

Beispiel: In einem Druckbehälter herrscht ein Wasserdruck von 4,5 bar. Eine Öffnung von 40 mm Durchmesser ist durch eine Platte abgeschlossen. Welche Kraft wirkt auf diese Platte?

($4{,}5bar = 4{,}5 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$.

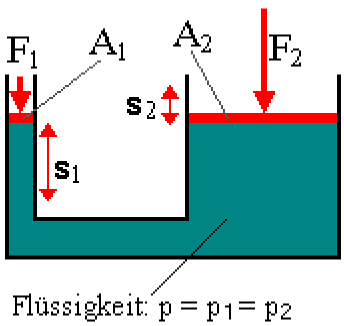
$$p = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = pA = p\frac{d^2\pi}{4}$$

$$F = 4{,}5 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-2} m)^2 \pi}{4} = 565{,}5N$$

)

Je größer die betrachtete Fläche ist, desto größer ist die durch die Flüssigkeit verursachte Kraft (Druckkraft): $F = p \cdot A$.

Das Prinzip der hydraulischen Presse:



Dabei ist der Druck auf den Kolben 1 (Trieb-, Kraftkolben): $p_1 = \frac{F_1}{A_1}$,

der Druck auf den Kolben 2 (Arbeits-, Lastkolben): $p_2 = \frac{F_2}{A_2}$

Nach dem Gesetz von Pascal ist nun $p_1 = p_2$. Daraus folgt $\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$

Die Kolbenkräfte verhalten sich wie die Querschnittsflächen der Kolben.

Mit geringen Kräften am Triebkolben mit kleinem Querschnitt können große Kräfte am Arbeitskolben mit großem Querschnitt erzeugt werden.

Wir betrachten nun die Zusammenhänge der Volumsänderungen in den beiden Zylindern bei Bewegung der Kolben:

V_1 ... Volumsabnahme der Flüssigkeit im Kolben 1 beim Verschieben um den Weg s_1

V_2 ... Volumszunahme der Flüssigkeit im Kolben 2 beim Verschieben um den Weg s_2

Ideale Flüssigkeiten lassen sich nicht zusammendrücken, daher gilt für die Volumina V_1 und V_2:

$V_1 = V_2$ (Inkompressibilität!)

$A_1 s_1 = A_2 s_2 \quad | \cdot p$

$pA_1 s_1 = pA_2 s_2$ (Gesetz von Pascal)

$F_1 s_1 = F_2 s_2$

$W_1 = W_2$ (Energieerhaltungssatz!)

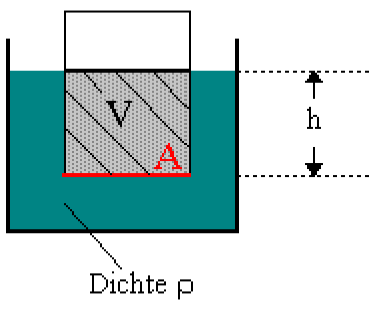
Die Arbeit am Triebkolben einer hydraulischen Presse ist gleich der Arbeit am Lastkolben.

Goldene Regel der Mechanik: Was an Kraft gewonnen wird, geht an Weg verloren. (Siehe auch das Hebelgesetz: $F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$.)

Anwendungen der hydraulischen Presse sind z.B. Wagenheber, Bremsanlagen. Baumaschinen, hydraulische Gestänge.

Schweredruck: Druck in einer Flüssigkeit auf Grund des Gewichts der Flüssigkeit selbst.

Auch ohne Wirkung eines Kolbens ist in einer Flüssigkeit ein Druck vorhanden. Beim Tauchen spüren wir die durch den Wasserdruck verursachte Kraft in den Ohren.



Auf ein Flächenstück A in der Tiefe h drückt die Gewichtskraft F_G der darüber befindlichen Flüssigkeitssäule.

$$F_G = mg = V\rho g = Ah\rho g$$

Druck: $p = \frac{F_G}{A} = \frac{Ah\rho g}{A} = h\rho g$

In der Tiefe h herrscht der Schweredruck $p = \rho g h$.

Der Schweredruck ist nicht
- von der Fläche A und
- von der Gefäßform (siehe später) abhängig,

sondern nur
- von der Tiefe h,
- der Dichte ρ der Flüssigkeit und
- der Fallbeschleunigung g.

Der Druck einer Flüssigkeit am Boden eines Gefäßes wird als **Bodendruck** bezeichnet.

Beispiel: Der Druck einer $10\,m$ hohen Wassersäule beträgt $0{,}981\,bar$. D.h. alle $10m$ nimmt der Wasserdruck etwa um $1bar$ zu.
($p = \rho gh = 1000\frac{kg}{m^3}\cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}\cdot 10m = 98100Pa$)

Beispiel: Welche Höhe muss eine Quecksilbersäule besitzen, damit am Boden ein Druck von 1 bar herrscht?
($1\,bar = 10^5\,\frac{N}{m^2}, \rho_{Hg} = 13600kg/m^3$

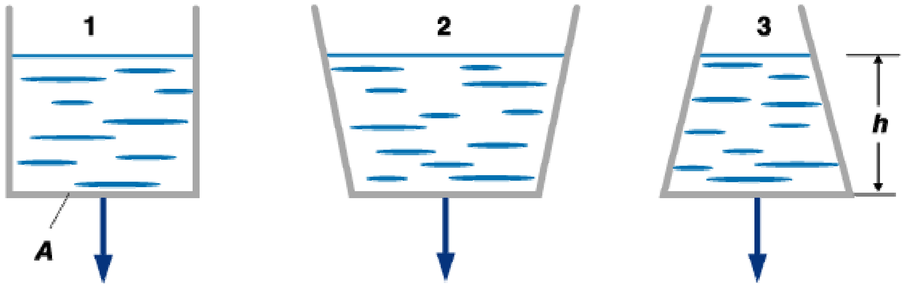
$$p = h\rho g \Leftrightarrow h = \frac{p}{\rho g},\ h = \frac{10^5\,\frac{N}{m^2}}{13600\frac{kg}{m^3}\cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}} = 0{,}75m$$

)

Allgemein muss man für den Druck in einer Flüssigkeit neben dem Schweredruck auch eventuelle äußere Beiträge (p_0) berücksichtigen (Luftdruck, Kolbendruck, ...).

Der hydrostatische Druck in einer Flüssigkeit ist $p = p_0 + \rho gh$.
(Gesamtdruck = äußerer Druck + Schweredruck)

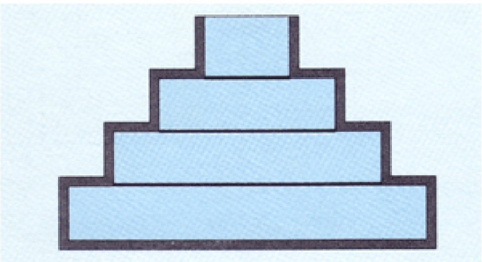
Hydrostatisches Paradoxon:



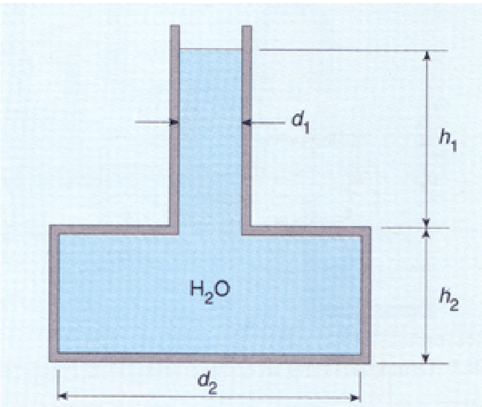
Alle Gefäße haben die gleiche Bodenfläche und sind bis zur selben Höhe gefüllt.

Hydrostatisches Paradoxon: Der Bodendruck ist nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule, nicht aber von der Form des Gefäßes und damit von der enthaltenen Flüssigkeitsmenge abhängig.

Zur Erklärung des hydrostatischen Paradoxons stellt man sich vor, dass Gefäße mit verschiedenen Querschnitten durch einen Kolben getrennt sind. Durch diesen gedachten Kolben wird der Druck der darüber liegenden Flüssigkeit übertragen (und zwar unabhängig davon, welche Gestalt das darunter liegende Gefäß hat).



Beispiel:



Ein Gefäß ist mit Wasser gefüllt. Berechne den Bodendruck und die Bodendruckkraft. Der Bodendruck ist nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule abhängig.

$h_1 = 5m$, $h_2 = 1{,}2m$, $d_1 = 50mm$, $d_2 = 1m$.

Bodendruck:

$$p = \rho g(h_1 + h_2) = 1000\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}(5m + 1{,}2m) = 60800 Pa = 0{,}608 bar$$

Bodendruckkraft:

$$F = pA = p \cdot \frac{d_2^2 \pi}{4} = 60800 Pa \frac{(1m)^2 \pi}{4} = 47750 N$$

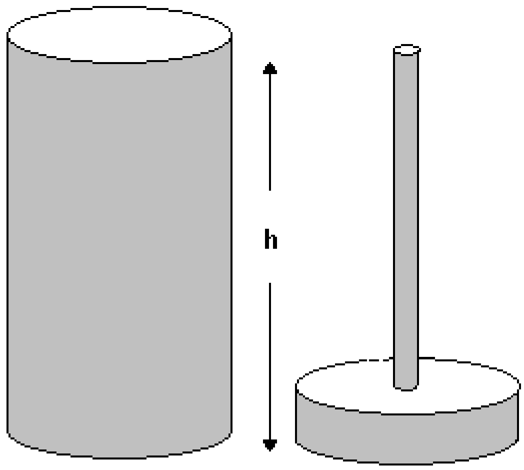
Der Bodendruck ist unabhängig von der Fläche, die Bodendruckkraft nicht!

Nicht richtig ist es, mit der Gewichtskraft der eingefüllten Flüssigkeit und der Bodenfläche zu rechnen!

$$F_G = \frac{d_1^2 \pi}{4} h_1 \rho g + \frac{d_2^2 \pi}{4} h_2 \rho g = 9342 N$$

Die Gewichtskraft der Flüssigkeit ist viel kleiner als die Bodendruckkraft!

Beachte:

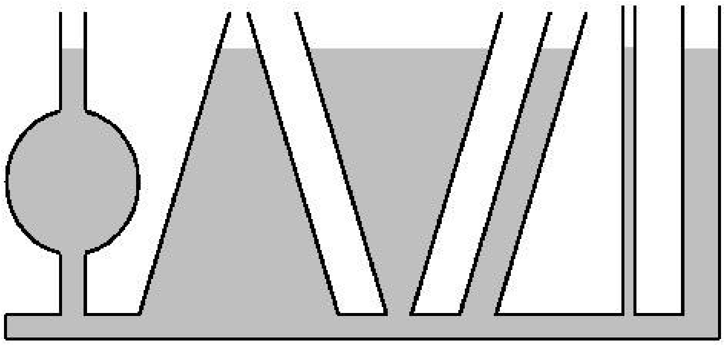


In diesen beiden Gefäßen ist der Bodendruck auf Grund der gleich Höhe der Flüssigkeit und die Bodendruckkraft auf Grund des gleichen Bodendruckes und der gleichen Grundfläche gleich groß. Das Gewicht der eingefüllten Flüssigkeit ist aber stark unterschiedlich.
Hydrostatisches Paradoxon: unterschiedliches Gewicht – gleiche Bodendruckkraft.
)

Nur bei Gefäßen mit lotrechten Wänden und gleichbleibender Querschnittsfläche ist die Gewichtskraft der Flüssigkeit gleich der Bodendruckkraft.

<u>Verbundene Gefäße (Kommunizierende Gefäße):</u>

In miteinander verbundenen Gefäßen sind die Flüssigkeitsspiegel gleich hoch, wenn überall der gleiche äußere Druck wirkt.



Der Druck an den Verbindungsstücken zwischen zwei einzelnen Röhren ist von beiden Seiten her gleich groß, da sonst Ausgleichsbewegungen stattfinden würden. Da der Druck aber nur von der Höhe (und von der in allen Röhren gleichen Dichte und Fallbeschleunigung) abhängt, sind die Höhen in allen Röhren gleich.
($p_1 = p_2 \Leftrightarrow \rho g h_1 = \rho g h_2 \Rightarrow h_1 = h_2$)

Möglichkeiten, unterschiedliche Höhen zu erreichen:
- verschiedene äußere Drücke,
- zwei Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Dichte, die sich nicht vermischen.

Versuche!

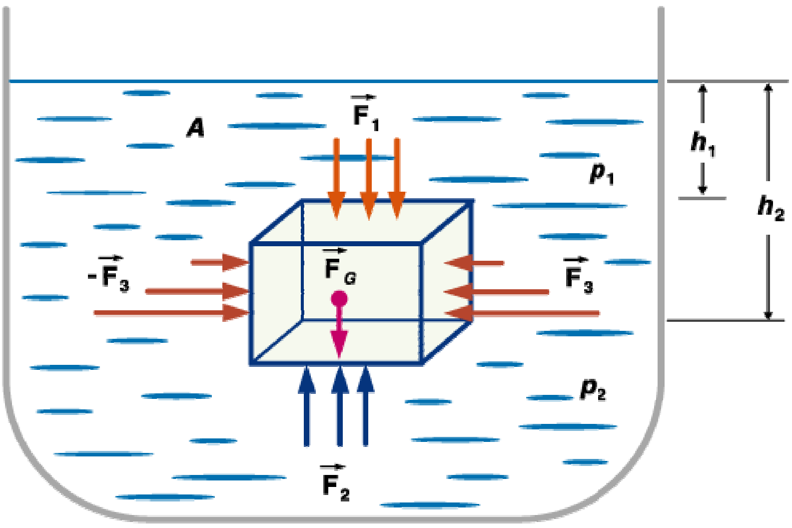
9.2 Auftrieb

Wird ein an einem Kraftmesser hängender Körper (Aluminium, Stein, ...) langsam in das Wasser eingetaucht, so nimmt das Gewicht des Körpers beim Eintauchen in das Wasser scheinbar ab. Wird der Versuch mit Spiritus wiederholt, so ist der scheinbare Gewichtsverlust geringer.

In einer Flüssigkeit hat ein Körper scheinbar ein geringeres Gewicht, da eine zusätzliche Kraft nach oben wirkt (Auftriebskraft).

Versuch!

Entstehung des Auftriebes:



Auf alle Flächen eines eingetauchten quaderförmigen Körpers wirkt der Schweredruck, der Druckkräfte verursacht. Die Druckkräfte auf jeweils gegenüberliegende Seitenflächen sind gleich groß und halten sich das Gleichgewicht (z.B. F_3 und F_{-3}). Auf die Deckfläche in der Tiefe h_1 wirkt der Druck $p_1 = \rho_F g h_1$. Er erzeugt eine nach unten gerichtete Druckkraft $F_1 = p_1 A = \rho_F g h_1 A$.

Auf die Grundfläche in der Tiefe h_2, wirkt der Druck $p_2 = \rho_F g h_2$ p. Er erzeugt eine nach oben gerichtete Druckkraft $F_2 = p_2 A = \rho_F g h_2 A$.

Die Resultierende der beiden Kräfte ist nach oben gerichtet. Man nennt sie daher **Auftriebskraft** F_A.

Der Auftrieb ist die Differenz der an Ober- und Unterseite eines Körpers wirkenden (unterschiedlich starken) Schweredruckkräfte.

$$F_A = F_2 - F_1 = \rho_F g h_2 A - \rho_F g h_1 A = \rho_F g A(h_2 - h_1) = \rho_F g A h = \rho_F g V_K .$$

V_K ... Volumen des eingetauchten Körpers.

Das Volumen V_K des eingetauchten Körpers entspricht dem Volumen der verdrängten Flüssigkeit.
V_F ... Volumen der verdrängten Flüssigkeit.

Das Volumen der verdrängten Flüssigkeit ist das Volumen des Körpers unter Wasser.

Daher ist das Produkt $\rho_F V_K = \rho_F V_F$ die Masse m_F der verdrängten Flüssigkeit.

Für den Auftrieb gilt daher:

$$F_A = \rho_F g V_K = \rho_F V_F g = m_F g = F_{G,F} .$$

$F_{G,F}$ ... Gewicht der verdrängten Flüssigkeit
ρ_F ... Dichte der Flüssigkeit
V_F ... Volumen der verdrängten Flüssigkeit

Achtung: Nur bei einem vollständig eingetauchten Körper ist das Körpervolumen gleichzeitig das Volumen der verdrängten Flüssigkeit.

Gesetz des Archimedes: $F_A = F_{G,F}$ **.**
Die Auftriebskraft ist gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit.

Das Gesetz des Archimedes gilt nicht nur für einen eingetauchten Quader, sondern für jeden beliebigen Körper.

Das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit und damit der Auftrieb $F_A = \rho_F g V_F$ **ist abhängig von**

- **dem verdrängten Volumen**
- **der Dichte der Flüssigkeit**
- **der Schwerebeschleunigung**

Anmerkung: Es gilt $\mathrm{F_A} = \rho_F g \mathrm{V_K}$. Da $V_K = \frac{m}{\rho_K}$, gilt daher: $\mathrm{F_A} = \frac{\rho_F}{\rho_K} gm = \frac{\rho_F}{\rho_K} \mathrm{F_G}$.
Der Auftrieb ist das Dichteverhältnis mal das Gewicht des Körpers.

Beispiel: Ein Stein ($\rho = 2500\ kg/m^3$) hat eine Masse von $12\ kg$. Wie groß ist seine scheinbare Gewichtskraft unter Wasser?
(
Gewichtskraft (an der Luft): $F_G = m\,g = 12 \cdot 9{,}81 N = 117{,}7\ N$.

Volumen: $V = \frac{m}{\rho} = \frac{12 kg}{2500\ kg/m^3} = 0{,}0048 m^3$

Scheinbare Gewichtskraft unter Wasser: $F_G^* = F_G - F_A = V\rho g - V_F \rho_F g = Vg(\rho - \rho_F)$

$F_G^* = 0{,}0048\ m^3 \cdot 9{,}81\ m/s^2\,(2500 - 1000)\ kg/m^3 = 70{,}6\ N$
$F_A = 47{,}1N$

Anmerkung: da $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho}$ gilt auch $F_G^* = F_G\text{-}F_A = mg\text{-}V_F\rho_F g = mg(1\text{-}\frac{\rho_F}{\rho})$ und daraus $F_A = mg\frac{\rho_F}{\rho}$)

Steigen, Sinken, Schweben und Schwimmen:

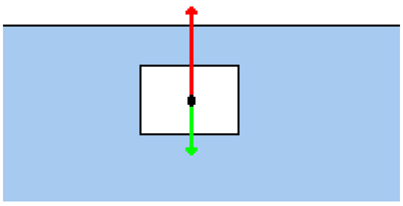
(V_K ist das Volumen des Körpers, V_F ist das Volumen der verdrängten Flüssigkeit, $F_{G,F}$ ist das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit, F_G das Gewicht des Körpers, F_A der Auftrieb des Körpers).

Ein Körper wird in eine Flüssigkeit eingetaucht und losgelassen:

Ein untergetauchter Körper verdrängt sein Volumen.

- Ist die Auftriebskraft größer als die Gewichtskraft des Körpers, so ist die resultierende Kraft nach oben gerichtet, der Körper steigt.

$V_F = V_K$
$F_A > F_G \Rightarrow V_F\rho_F g > V_K\rho_K g \Rightarrow \rho_F > \rho_K$



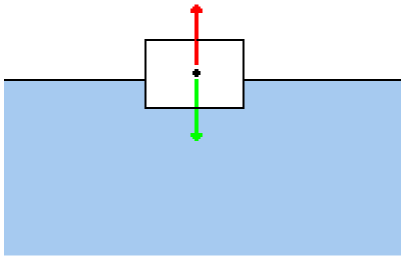
$\rho_F > \rho_K$
Der Körper steigt an die Oberfläche und schwimmt.

Ein schwimmender Körper taucht gerade so tief ein, dass das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit (der Auftrieb des Körpers) gleich dem Körpergewicht ist.
Ein schwimmender Körper verdrängt also sein Gewicht.

Da $F_G = F_A$ ist, ist $\rho_K V_K g = \rho_F V_{untergetaucht} g$. Damit gilt auch $\rho_K V_K = \rho_F V_{untergetaucht} \Leftrightarrow m_K = m_F$.
Ein schwimmender Körper taucht gerade so tief ein, dass die Masse der verdrängten Flüssigkeit gleich der Masse des Körpers ist.

Beispiel: Der Wasserspiegel in einem Becher, in dem Eiswürfel schwimmen, bleibt während des Schmelzvorganges konstant.

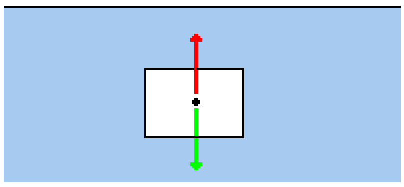
$V_F < V_K$
$F_A = F_G$



- Ist die Auftriebskraft gleich groß wie die Gewichtskraft, dann herrscht Gleichgewicht, der Körper schwebt in jeder Tiefe.

  (**Frage:** Warum? (Da sich die Dichte einer idealen Flüssigkeit mit zunehmender Tiefe nicht ändert (inkompressibel!), ist der Auftrieb von der Tiefe unabhängig.
  Das Gewicht des Körpers hat ebenfalls keinerlei Bezug zur Position des Körpers unter Wasser.)

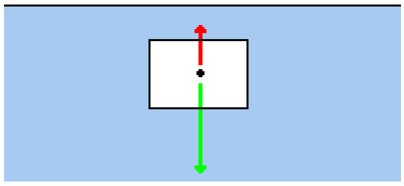
$V_F = V_K$
$F_A = F_G \Rightarrow V_F \rho_F g = V_K \rho_K g \Rightarrow \rho_F = \rho_K$



$\rho_F = \rho_K$
Der Körper schwebt.

- Ist die Auftriebskraft kleiner als die Gewichtskraft, so ist die resultierende Kraft nach unten gerichtet, der Körper sinkt.

$V_F = V_K$
$F_A < F_G \Rightarrow V_F \rho_F g < V_K \rho_K g \Rightarrow \rho_F < \rho_K$



$\rho_F < \rho_K$
Der Körper sinkt.

Beispiel: Wie tief taucht ein Holzwürfel ($\rho = 650\ kg/m^3$) mit einer Kantenlänge von $a = 12\ cm$ in Alkohol ($\rho = 780\ kg/m^3$) ein?

(Ein schwimmender Körper taucht so tief ein, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit gleich dem Gewicht des Körpers ist.

$V_F \rho_F g = V \rho g$

$a^2 h \rho_F = a^3 \rho$, wobei h die Eintauchtiefe ist.

$$\mathrm{h} = \frac{\rho}{\rho_\mathrm{F}} \cdot \mathrm{a} = \frac{650\mathrm{kg/m^3}}{780\mathrm{kg/m^3}} \cdot 12\mathrm{cm} = 10\mathrm{cm}$$

In Wasser ($\rho = 1000\ kg/m^3$) taucht der Körper $7{,}8cm$ ein.

Alternative: Eiswürfel $\rho = 0{,}9168\mathrm{g/cm^3}$

Alternativer Ansatz:
Damit der schwimmende Körper zwischen Auftrieb und Gewicht im Gleichgewicht ist, muss für die Drücke auf die untere Fläche des Körpers gelten:

$Bodendruck_{Körper} = F_G/A = Schweredruck\ der\ Flüssigkeit\ in\ dieser\ Tiefe$.

$$\rho a^3 g / a^2 = \rho_F g h \Rightarrow h = \frac{a\rho}{\rho_F}$$

)

Dichtemessung von Flüssigkeiten:

Die Dichte einer Flüssigkeit lässt sich mit einem Aräometer bestimmen. Es taucht so tief in die zu messende Flüssigkeit ein, bis die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft des Messgerätes ist. Das Aräometer ist unten beschwert und besitzt am oberen dünnen Teil eine Skala, an der direkt die Dichte in g/cm^3 abgelesen werden kann.

Je dichter die Flüssigkeit, desto geringer die Eintauchtiefe des Aräometers.

Mit Aräometern kann

- der Alkoholgehalt von Getränken,
- der Fettgehalt der Milch,
- der Zuckergehalt von Most oder
- der Salzgehalt von Wasser bestimmt werden.
- Durch Bestimmung der Säuredichte kann auch der Ladezustand eines Akkumulators festgestellt werden.

10 Ruhende Gase

Allgemeine Eigenschaften der Gase:

Die atomaren Bausteine der Gase werden ganz allgemein als Moleküle bezeichnet, auch wenn sie wie Helium nur Atome sind.

Zwischen den Molekülen eines Gases sind nur geringe Kräfte wirksam. Das Eigenvolumen der Gasmoleküle ist klein gegenüber dem Volumen, das dem Gas zur Verfügung steht. Deshalb können sich die Gasmoleküle frei bewegen, abgesehen von Zusammenstößen untereinander.
Werden Eigenvolumen der Moleküle und Kraftwirkung zwischen den Molekülen vernachlässigt, so spricht man von einem idealen Gas.
Für viele Betrachtungen setzt man ein ideales Gas voraus.

Die Bewegung der Gasmoleküle ist ungeordnet. Ein Gas besitzt keine bestimmte Form und kein bestimmtes Volumen. Gase nehmen jeden zur Verfügung stehenden Raum ein. Die Gasmoleküle sind ständig in Bewegung, prallen daher auch gegen die Gefäßwände und verursachen damit Gasdruck.

Das Prallen der Gasmoleküle gegen die Gefäßwände verursacht einen Gasdruck.

Verkleinert man das Volumen, so prallen die Moleküle öfter gegen die Wände, folglich steigt der Gasdruck. Die Gasmasse ist gleich geblieben, daher nimmt die Dichte zu. Allerdings spielt auch die Temperatur eine große Rolle. Deshalb wird der Zusammenhang zwischen Druck und Volumen erst in der Wärmelehre behandelt.

Gase lassen sich komprimieren. Der Druck pflanzt sich nach allen Richtungen hin gleichmäßig fort.

10.1 Die Lufthülle (Atmosphäre)

Die Erde ist von einer mehrere hundert Kilometer dicken Lufthülle umgeben. Die Lufthülle verdanken wir der Anziehungskraft der Erde. Ohne diese Krafteinwirkung wurden sich die Luftmoleküle im gesamten zur Verfügung stehenden Raum (Weltraum) ausbreiten. Der Mond mit seiner viel geringeren Schwerkraft besitzt keine Gashülle. Die Atmosphäre der Erde besteht zu 78% aus Stickstoff und zu 21% aus O_2.

Der atmosphärische Luftdruck (der Schweredruck der Lufthülle):

Nachweis des Luftdruckes:

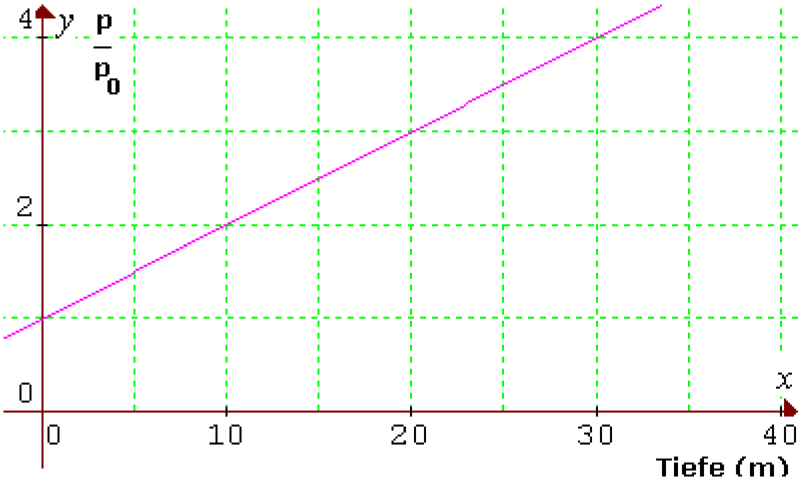
Versuch: Ein Glas wird randvoll mit Wasser gefüllt und mit einem stärkeren Papier zugedeckt. Diese Anordnung wird vorsichtig umgedreht. Jetzt kann man das Papier loslassen, ohne dass Wasser herausfließt. Dem Schweredruck der Flüssigkeitssäule wird durch den äußeren Luftdruck entgegengewirkt.

Versuch: Magdeburger Halbkugeln (Otto von Guericke 1654). Abschätzung der Kraft auf die beiden Schalen: $F = pA = 1013\,\text{mbar} \cdot 4r^2\pi \approx 4582\,\text{N}$ bei einem Radius $r \approx 6\,\text{cm}$. Das entspricht dem Gewicht von einer Masse von 467kg.

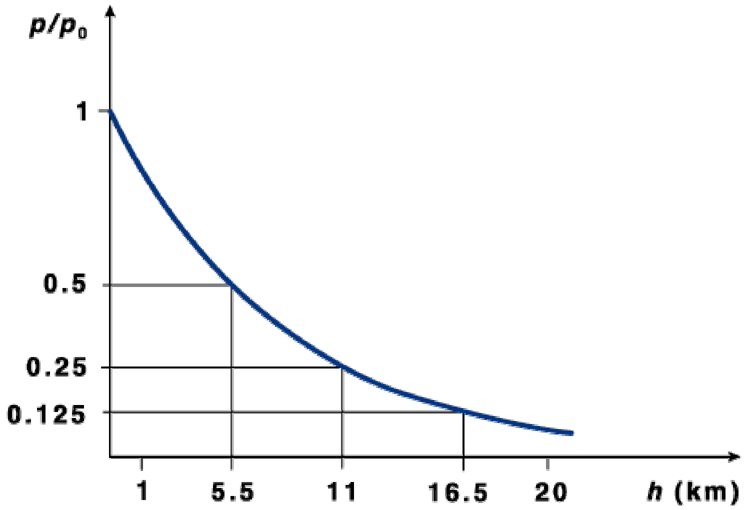
Luftdruck und Höhe:

Der atmosphärische Luftdruck lässt sich gleich erklären wie der hydrostatische Druck. Er wird von der Gewichtskraft der über jedem Flächenstück befindlichen Luftsäule erzeugt. Allerdings besteht zwischen dem Luftdruck und dem Schweredruck in einer Flüssigkeit ein prinzipieller Unterschied.

Flüssigkeiten lassen sich nicht komprimieren. Daher enthalten gleiche Volumsteile in unterschiedlichen Tiefen immer gleich viele Moleküle. Als Folge nimmt der Schweredruck gleichmäßig (linear) mit der Tiefe zu,



Gase lassen sich komprimieren. Daher enthalten Volumsteile in unteren Schichten mehr Moleküle als gleich große Volumsteile in oberen Schichten. Als Folge nimmt der Luftdruck mit zunehmender Höhe nicht gleichmäßig (nicht linear) ab.

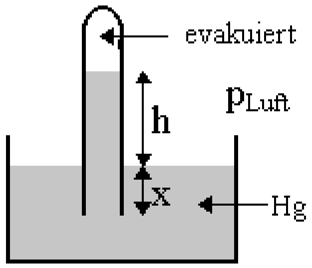


Bei $0°C$ **in Meereshöhe beträgt der Luftdruck im Mittel** $p_0 = 1013 mbar$ **und die Dichte der Luft** $\rho_0 = 1{,}29\ kg/m^3$ **.**

Bis jetzt gemessener Maximalwert: 1085,8 mbar.
Bis jetzt gemessener Minimalwert: 856 mbar.

Luftdruckmessung:

Versuch von Torricelli: Ein etwa 80 cm langes, dickwandiges, einseitig abgeschlossenes Glasrohr wird mit Quecksilber gefüllt. Dann wird die Öffnung zugehalten und das Rohr mit der Öffnung nach unten in ein Quecksilberbad getaucht. Wird die Öffnung freigegeben, so sinkt der Quecksilberspiegel auf etwa 700 mm ab. Der auf dem unteren Quecksilberspiegel wirkende Luftdruck hält dem Schweredruck der Quecksilbersäule das Gleichgewicht. Aus der Höhe der Quecksilbersäule lässt sich der Luftdruck berechnen.



Beispiel: Wie hoch ist die Quecksilbersäule beim Torricelli Versuch, wenn der Luftdruck $1013mbar$ beträgt?
($p = 1013\,mbar = 1{,}013bar = 1{,}013 \cdot 10^5\,Pa$
Bodendruck der Flüssigkeit:

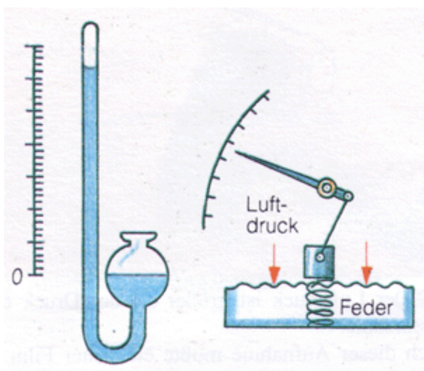
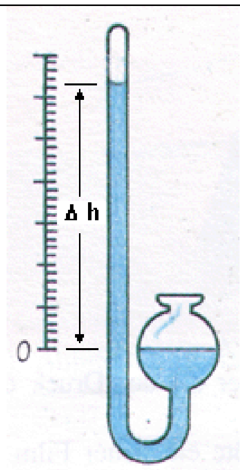
$$p = \rho g h \Leftrightarrow h = \frac{p}{\rho g}$$

$$h = \frac{1{,}013 \cdot 10^5\,Pa}{13600 kg/m^3 \cdot 9{,}81 m/s^2} = 0{,}76m = 760mm\ )$$

Der Druck einer 760 mm hohen Quecksilbersäule wurde früher als physikalische Atmosphäre (atm) bezeichnet.

Der normale Luftdruck lässt sich somit sehr vielfältig angeben:
$p_0 = 1{,}013bar = 1013mbar = 1013hPa = 760Torr = 1atm$.
$760Torr$ heißen auch $760mm$ Hg-Säule.

Luftdruckmessgeräte heißen Barometer.

	 Δh ist ein Maß für den Luftdruck.

Eine besondere Ausführung eines Quecksilberbarometers ist das Birnenbarometer (links). Ändert sich die Höhe der Quecksilbersäule, so ändert sich der Quecksilberspiegel in dem birnenförmigen Gefäß kaum merklich. Daher braucht der Nullpunkt der Skala nicht immer wieder neu eingestellt zu werden.

Weniger genau, aber handlicher als ein Quecksilberbarometer, ist das Dosenbarometer (rechts). Es besteht aus einer luftleer gepumpten Metalldose. Bei Luftdruckänderungen hebt oder senkt sich der wellenförmig ausgebildete Dosendeckel. Seine Bewegungen werden auf einen Zeiger übertragen.

10.2 Der Druck in einem geschlossenen Behälter

Absolutdruck, Unterdruck, Überdruck:

In vielen Fällen interessiert man sich nicht für den Absolutdruck, sondern für den Druck relativ zum atmosphärischen Luftdruck. Es handelt sich dann um einen Überdruck oder einen Unterdruck.

Druckunterschiede relativ zum atmosphärischen Luftdruck nennt man Überdruck oder Unterdruck.

Unterdruck herrscht in einem Behälter, in dem der Druck kleiner ist als der atmosphärische Luftdruck. Der Unterdruck könnte höchstens gleich dem atmosphärischen Luftdruck sein. Dann wäre in dem Behälter ein absolutes Vakuum, das sich allerdings nicht verwirklichen lässt.

Der Absolutdruck ist der tatsächlich gemessene Druck im Behälter.

Beispiel: In einer Fernsehbildröhre herrscht ein Absolutdruck von ca. $10^{-8}\,bar$. Berechne den Unterdruck.
(Der Unterdruck, also die Druckdifferenz zwischen außen und innen, beträgt:
$\Delta p = 1bar - 10^{-8}\,bar \approx 1bar = 10^5\,Pa$
Auf die Bildschirmfläche ($33\,cm\ x\ 25\,cm$) wirkt die Kraft: $F = \Delta p \cdot A = 10^5\,Pa \cdot 0{,}33m \cdot 0{,}25m = 8357\,N$
)

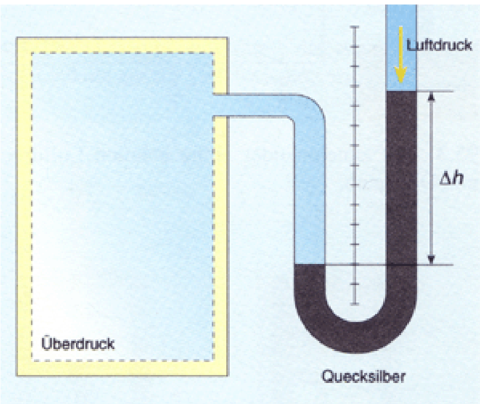
Unterdruck in einem Gefäß kann gefährlich werden. Durch den Druckunterschied können große Kräfte wirken. Es kann zu einer **Implosion** kommen.

In einer Glimmlampe ist ein Absolutdruck von ca. $200\ Pa$. In einer Leuchtstofflampe herrscht ein Quecksilberdampfdruck von ca. $100Pa$ bis $200Pa$.

Druckmessung in Behältern:

Messgeräte für den Druck eines Gases oder einer Flüssigkeit heißen Manometer.
Flüssigkeitsmanometer (U-Rohrmanometer) nützen ähnlich wie das Quecksilberbarometer den Schweredruck einer Flüssigkeit aus.

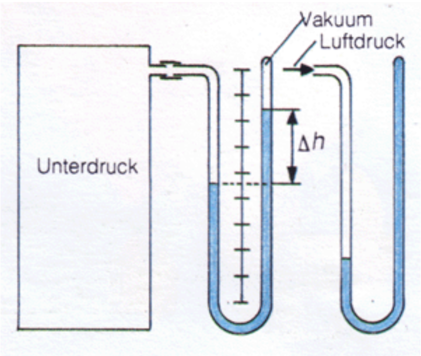
offenes U-Rohr Manometer:



Die maximale Höhe bei Unterdruck im Behälter (Vakuum im Behälter) ist $760mm$. Die Höhe bei Überdruck ist theoretisch nicht begrenzt.

Beispiel: Wie groß sind Überdruck und Absolutdruck in einem Gasbehälter, wenn ein offenes U-Rohr-Quecksilbermanometer bei einem atmosphärischen Luftdruck ($p_0 = 980\ mbar$) eine Höhendifferenz von $15mm$ anzeigt?
(Überdruck: $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = 13600\ kg/m^3 \cdot 9{,}81 m/s^2 \cdot 0{,}015\ m = 2000Pa = 20mbar$
Absolutdruck: $p = p_0 + \Delta p = 980mbar + 20mbar = 1000mbar = 1\,bar$
)

geschlossenes U-Rohr Manometer:



Das offene Manometer wird nur für einen geringen Über- oder Unterdruck verwendet.
Für einen großen Unterdruck, also kleinen Absolutdruck, benützt man das abgekürzte Manometer.
Der rechte geschlossene Schenkel ist vollständig mit Quecksilber gefüllt, wenn links der Luftdruck wirkt.
Ist im Behälter Vakuum, so sind beide Schenkel gleich hoch mit Quecksilber gefüllt.

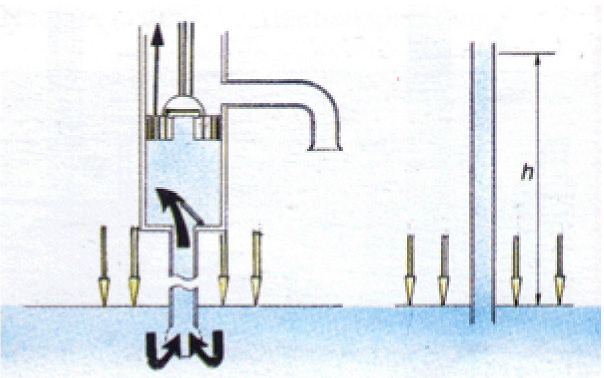
Für einen größeren Druck (Überdruck) werden sogenannte technische Manometer verwendet, die wie das Dosenbarometer oder Röhrenmanometer für Flüssigkeiten arbeiten.

10.3 Wirkungen und technische Anwendungen des Luftdruckes

Ansaugen durch Unterdruck:

In einer Injektionsspritze wird durch Volumsvergrößerung ein Unterdruck erzeugt, der Luft oder auch eine Flüssigkeit ansaugt (durch den äußeren Überdruck nachströmen lässt).
Verschiedene Geräte, wie Pipette, Saugpumpe und Vakuumpumpe, nützen diese Saugwirkung aus.

Saugpumpe für Wasser:



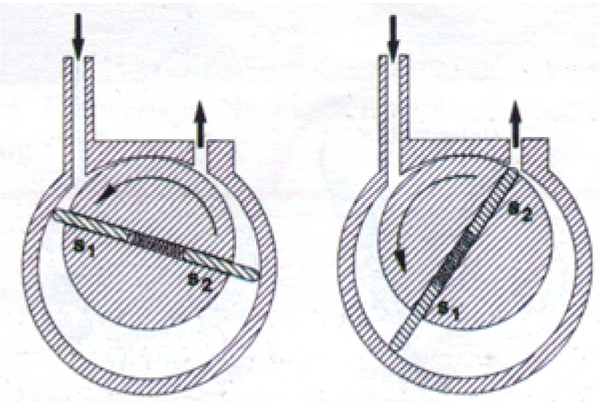
Beim Hochziehen des Kolbens entsteht im Zylinder und im Saugrohr ein Unterdruck, der Wasser ansaugt.
Die maximale Saughöhe ergibt sich aus dem Schweredruck der Wassersäule. Dieser Schweredruck kann höchstens gleich dem atmosphärischen Luftdruck p_0 sein.

Luftdruck: $\Delta p = 1bar = 10^5\,Pa$

$$p_0 = \rho g h \Leftrightarrow h = \frac{p_0}{\rho g}$$
$$h = \frac{10^5\,Pa}{1000kg/m^3 \cdot 9{,}81m/s^2} \approx 10m$$

Vakuumpumpen:

dienen zur Erzeugung eines Unterdruckes. Die Erzeugung eines Vakuums, also das Absaugen der Luft, nennt man Evakuieren.



Bei der Drehschieberpumpe rotiert in einem Hohlzylinder eine exzentrisch gelagerte Welle mit zwei Schiebern S_1 und S_2.
Bei der Drehung vergrößert sich der Raum unter dem Saugstutzen, es wird Luft angesaugt. Die angesaugte Luft wird an der anderen Öffnung ausgestoßen. Mit einer Drehschieberpumpe lässt sich ein Vakuum bis ca. $1Pa$ erreichen.

10.4 Auftrieb in Luft

Ähnlich wie in einer Flüssigkeit wirkt auf einen Körper auch in Luft eine Auftriebskraft F_A. Sie ist gleich der Gewichtskraft der verdrängten Luft:

$$F_A = \rho_L V_K g$$

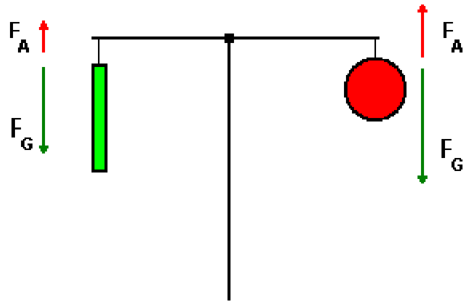
Ist die Gewichtskraft eines Körpers kleiner als die Gewichtskraft der verdrängten Luft, so steigt der Körper auf. Ballone sind mit einem Gas gefüllt, das eine kleinere Dichte als Luft hat, oder sie werden mit Heißluft betrieben. (Luft dehnt sich beim Erwärmen aus, dadurch verringert sich die Dichte.)

Beispiel: Ein Heißluftballon hat einen Durchmesser von $10m$. Die Dichte der erwärmten Luft beträgt 75 % der Dichte der umgebenden Luft. Welche Masse dürfen Last und Ballonhülle höchstens haben?
($Auftriebskraft = Gewicht\ der\ Ballonfüllung + Last$

$$\frac{4\pi r^3}{3}\rho_L g = \frac{4\pi r^3}{3}\cdot 0{,}75\cdot \rho_L g + mg$$
$$m = 0{,}25\cdot\rho_L\cdot\frac{4\pi r^3}{3} = 0{,}25\cdot 1{,}29kg/m^3\cdot\frac{4\pi(5m)^3}{3} = 170kg$$

)

Beispiel: Auftriebswaage.



An einer Waage hängen ein kleinvolumiger Zylinder aus Metall und eine großvolumige Kugel aus Styropor. Auf beide wirken Gewichtskräfte und die Auftriebskräfte in der Luft.
Da das Volumen der Kugel größer ist als das Volumen des Zylinders, ist sowohl der Auftrieb der Kugel, als auch ihr Gewicht (sonst kein Gleichgewicht!) größer als die entsprechenden Kräfte auf den Zylinder.
Die Summen $F_A + F_G$ halten sich die Waage.

Wird der Behälter, in der sich die Auftriebswaage befindet evakuiert, so verlieren beide Körper ihren Auftrieb. Da dann nur mehr die Gewichte übrig bleiben, sinkt die Kugel (höheres Gewicht) nach unten.