

# Die sieben SI-Einheiten

## Dichte und Dichtemessung

Für die folgenden Messungen wirst du auch eine **Schublehre** benötigen.

**A1** Bestimme die Dichte von 10 Gegenständen. Verwende für deine Messungen Würfel, Quader, Kugeln und Zylinder aus diversen Materialien. Wiege die Objekte zunächst auf einer möglichst genauen Waage ab und bestimme dann durch Abmessen ihr Volumen. Verwende dazu, wenn es die Abmessungen möglich machen, eine Schublehre. Die Volumenformeln lauten:

$V_{\text{Würfel}} = a \cdot a \cdot a = a^3$   
 $V_{\text{Quaderl}} = a \cdot b \cdot c$   
 $V_{\text{Zylinder}} = G \cdot h = r^2 \cdot \pi \cdot h$   
 $V_{\text{Kugel}} = 4 \cdot r^3 \cdot \pi / 3$

Trage die Ergebnisse in Tabelle 1 ein, und überprüfe mit Hilfe von Tabelle 2, ob die Ergebnisse richtig sein können.

Material	gemessene Masse [kg]	berechnetes Volumen [m³]	berechnete Dichte [kg·m⁻³]	theoretische Dichte [kg·m⁻³]

Tabelle 1: Trage hier deine experimentellen Ergebnisse bzw. die theoretischen Werte aus Tabelle 2 ein.

Stoff	Dichte [kg/m³]	Dichte [g/cm³]
Neuschnee	60...200	0,060...0,200
Balsaholz (lufttrocken)	100...200	0,100...0,200
Holz (lufttrocken)	400...800	0,400...0,800
Kork	480...520	0,480...0,520
Fichtenholz	ca. 500	ca. 0,500
Eichenholz	ca. 800	ca. 0,800
Papier Büroqualität 80 g/m²	ca. 800	ca. 0,800
Wachs	900...980	0,900...0,980
Eis (bei 0 °C)	917	0,917
Gummi (Kautschuk)	920...960	0,920...0,960
Wasser (bei 0 °C)	1000	1
Beton	1.800...2.450	1,800...2,450
Quarzglas	2.200	2,200
Kohlenstoff (Graphit)	2.250	2,250
Sandstein	2.400	2,400
Fensterglas	2.500...2.600	2,500...2,600
Aluminium	2.710	2,710
Kohlenstoff (Diamant)	3.510	3,510
Titan	4.500	4,500
Gusseisen	7.250	7,250
Eisen chem. rein	7.860	7,860
Stahl legiert	7.900	7,900
Cobalt	8.900	8,900
Nickel	8.910	8,910
Kupfer	8.920...8.960	8,920...8,960
Silber	10.490	10,490
Blei	11.340	11,340
Quecksilber[1] (bei 0 °C)	13.595	13,595
Uran	19.050	19,050
Wolfram	19.270	19,270
Gold	19.302	19,302
Platin	21.450	21,450
Osmium	22.610	22,610
Neutronenstern	≈ 10 <sup>17</sup>	≈ 10 <sup>14</sup>
Schwarzes Loch	≥ 10 <sup>30</sup>	≥ 10 <sup>27</sup>

Tabelle 2: Die Dichte verschiedener Feststoffe und von Quecksilber, das bei 0 °C flüssig ist.

**A2** Tippe zuerst, wie viel kg eine Korkkugel mit einem Radius von einem Meter hat! Schätze dann den tatsächlichen Wert ohne Taschenrechner ab.

**A3** Hat ein Stern über 8 Sonnenmassen, so endet sein Leben sehr spektakulär mit einer Supernova (siehe Abb. 1). Dabei entsteht entweder ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Schätze mit Tabelle 2 ab, welche Masse ein Würfel von  $1 \text{ mm}^3$  Neutronenstern bzw. Schwarzes Loch hätte. Wie kann man diese enormen Dichten erklären? Was kann man sich unter diesen Massen vorstellen?

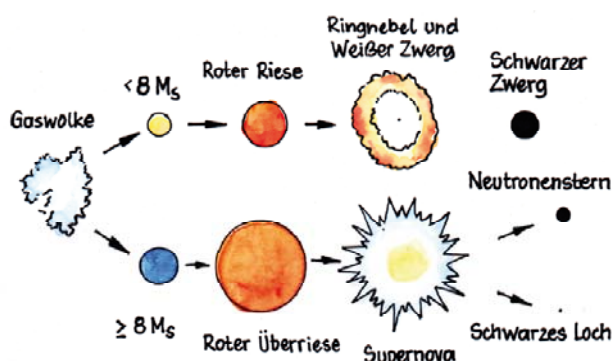


Abb. 1: Die drei möglichen Endstadien der Sterne.  
(Grafik: Janosch Slama; siehe BB8, Abb. 49.13)

**A4** Schätze anhand von Tabelle 3 die Dichte eines Menschen, von Öl und von Eis ab. Gib das Ergebnis mit größer oder kleiner als an. Warum schwimmen Eis und Öl auf Wasser? Warum ist im Meer das Schwimmen leichter als in Süßwasser?

**A5** Warum verwendet man für Ballons heiße Luft (Abb. 2) oder Helium? Was wurde früher verwendet? Was war das Problem dabei?

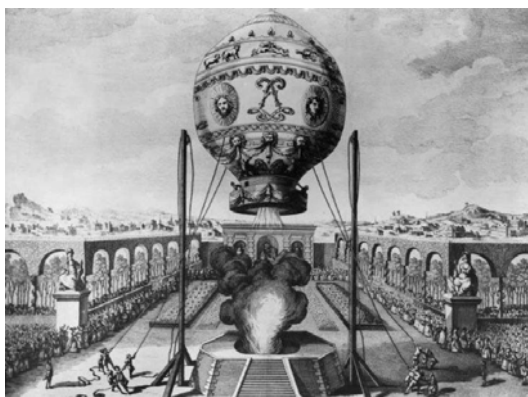


Abb. 2: Einer der ersten Heißluftballons, gebaut von den Gebrüdern Montgolfier 1783.

Material	Dichte [kg/m³]	Dichte [g/cm³]
Ottokraftstoff (genormt, Mittelwert)	750	0,75
Trinkalkohol (Ethanol)	789	0,789
Petroleum	800	0,8
Diesellokraftstoff	830	0,83
Spiritus	830	0,83
Olivenöl	910	0,91
Wasser (bei 3,98 °C)	999,975	999,975
Meerwasser	1025	1,025
Totes Meer	1170	1,170
Milch	1030	1,030
Glycerin	1260	1,260
Brom	3119	3,119
Quecksilber	13595	13,595

Tabelle 3: Richtwerte für die Dichte verschiedener Flüssigkeiten. In der Tabelle befindet sich auch der exakte Wert für die größte Wasserdichte. Normalerweise wird auf 4 °C und  $1000 \text{ kg/m}^3$  aufgerundet.

Gas	Dichte [kg/m³]	Formel
Wasserstoff	0,08988	H <sub>2</sub>
Helium	0,178	He
Wasserdampf bei 100 °C	0,598	H <sub>2</sub> O
Luft bei 35 °C	1,146	O <sub>2</sub>
Luft bei 20 °C	1,204	O <sub>2</sub>
Kohlenmonoxid	1,250	CO
Stickstoff	1,251	N <sub>2</sub>
Luft bei 0 °C	1,292	Gasgemisch
Sauerstoff	1,429	
Kohlendioxid	1,977	CO <sub>2</sub>
Propan	2,019	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Krypton	3,479	Kr
Xenon	5,897	Xe

Tabelle 4: Die Dichte verschiedener trockener Gase bei Normaldruck (1013 hPa) und, wenn nicht anders angegeben, bei 0 °C.

**A6** Um wie viel Prozent unterscheiden sich die im Allgemeinen verwendete Wasserdichte ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) von der tatsächlichen ( $999,975 \text{ kg/m}^3$ ; siehe auch Tabelle 3)? Um wie viel unterscheiden sich die normalerweise angegebenen  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  von den tatsächlichen  $3,98 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

**A7** Warum ist es in Silos und in Weinkellern während der Gärung in Bodennähe so gefährlich?

Hilfe zu A1: Exemplarisch ist hier eine Rechnung durchgeführt. Es wurde dabei ein Zylinder aus Eisen vermessen. Seine Höhe betrug  $3,97 \text{ cm}$  (siehe Abb. 3), sein Durchmesser  $1,5 \text{ cm}$  und seine Masse  $54,9 \text{ g}$ .



Abb. 3: Die Höhe dieses Test-Zylinders beträgt  $3,97 \text{ cm}$ .  
(Foto: Martin Apolin)

Wesentlich ist, dass man alle Einheiten vor dem Rechnen in SI-Einheiten umwandelt, und dass man die übersichtliche Schreibweise in Zehnerpotenzen wählt sowie nicht immer alle Nullen ausschreibt.

Masse  $54,9 \text{ g} = 54,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

Höhe  $3,97 \text{ cm} = 3,97 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Durchmesser  $1,5 \text{ cm} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Radius  $= 0,75 \text{ cm} = 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Das Volumen beträgt daher  $6,98 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  und die Dichte  $7,865 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  oder  $7865 \text{ kg/m}^3$ . Ein Vergleich mit Tabelle 2 zeigt, dass das Ergebnis sehr genau ist.

Hilfe zu A2: Eine Kugel mit einem Radius von einem Meter hat ein Volumen von

$$V_{\text{Kugel}} = \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Ein Kubikmeter Kork hat ungefähr  $500 \text{ kg}$ . Daher hat die Kugel stattliche  $2000 \text{ kg}$  oder  $2 \text{ Tonnen}$ .

Hilfe zu A3:  $1 \text{ mm}^3$  ist der Milliardenste Teil eines Kubikmeters, also  $1 \text{ mm}^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$ . Ein  $1 \text{ mm}^3$  Neutronenstern hat daher eine Masse von  $10^{17} \cdot 10^{-9} \text{ kg} = 10^8 \text{ kg}$  oder  $10^5 \text{ Tonnen}$ . Damit hat er eine ähnliche Masse, wie die größten Passagierschiffe der Welt (siehe Abb. 4). Ein  $1 \text{ mm}^3$  Schwarzes Loch hat eine Masse von  $10^{30} \cdot 10^{-9} \text{ kg} = 10^{21} \text{ kg}$ . Der Mond hat eine Masse von etwa  $73 \cdot 10^{21} \text{ kg}$ .  $73$  kleine Würfelchen Schwarzes Loch ergeben also bereits die Masse unseres Mondes.



Abb. 4: Das Kreuzfahrtschiff „Freedom of the Seas“ hat eine Länge von fast  $340 \text{ m}$  und eine Masse von  $71.000 \text{ Tonnen}$  ( $7,1 \cdot 10^7 \text{ kg}$ ). Somit hat es sogar weniger Masse als  $1 \text{ mm}^3$  Neutronenstern.  
(Foto: Andres Manuel Rodriguez)

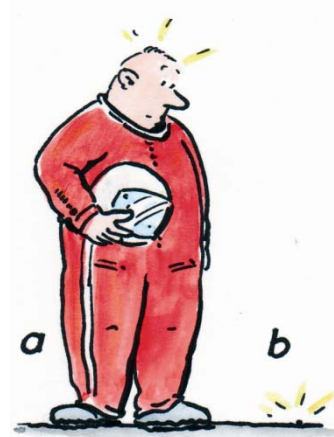


Abb. 5: Könnte man die Atomkerne eines Menschen auf einen Haufen legen (b), hätte dieser ein Volumen in der Größenordnung von nur  $10^{-15} \text{ m}^3$

(Grafik: Janosch Slama; siehe BB8, Abb. 45.5).

Die enormen Dichten sind damit zu erklären, dass bei normaler Materie der Atomkern viel kleiner ist als die Hülle. Wäre ein Atomkern  $1 \text{ cm}$  groß, würde in die Hülle in jedem Fall der Stephansdom passen. Wir bestehen also fast ausschließlich aus „Zwischenraum“ (Abb. 5; siehe dazu auch BB7, Kap. 27.1 und 27.2, oder BB8, Kap. 45.1.).

Bei einem Neutronenstern fallen die Zwischenräume weg. Ein Schwarzes Loch ist noch dichter gepackt, weil dieses quasi ein kollabierter Neutronenstern ist.

Hilfe zu A4: Die Dichte des Wassers beträgt etwa  $1000 \text{ kg/m}^3$ , die des Menschen im eingeatmeten Zustand  $940$  bis  $990 \text{ kg/m}^3$  und im ausgeatmeten Zustand  $1010$  bis  $1100 \text{ kg/m}^3$ . Das heißt, dass der Mensch nur dann von selbst am Wasser schwimmt, wenn er stark eingeatmet hat. Im Meer ist das Schwimmen leichter, da das Wasser eine größere Dichte besitzt. Bekannt sind vor allem die Bilder vom Toten Meer, dessen Wasser zu gut  $30 \%$  aus Salz besteht (siehe BB5, S. 19, Abb. 2.19.). Auch Öl und Eis schwimmen auf Wasser. Deshalb ist klar, dass deren Dichte kleiner als  $1000 \text{ kg/m}^3$  sein muss.

Hilfe zu A5: Luft hat bei  $35^\circ\text{C}$  eine etwa  $9 \%$  kleinere Dichte als bei  $20^\circ\text{C}$  und eine etwa  $13 \%$  kleinere Dichte als bei  $0^\circ\text{C}$ . Daher erfährt kältere Luft einen Auftrieb. Helium hat sogar nur rund  $1/7$  der Dichte von Luft.

Früher wurde Wasserstoffgas zur Füllung verwendet (siehe Abb. 6).  $\text{H}_2$  hat zwar eine noch geringere Dichte als Helium, ist aber brennbar und wird seit dem Unfall der Hindenburg 1937 (Abb. 7) nicht mehr verwendet.

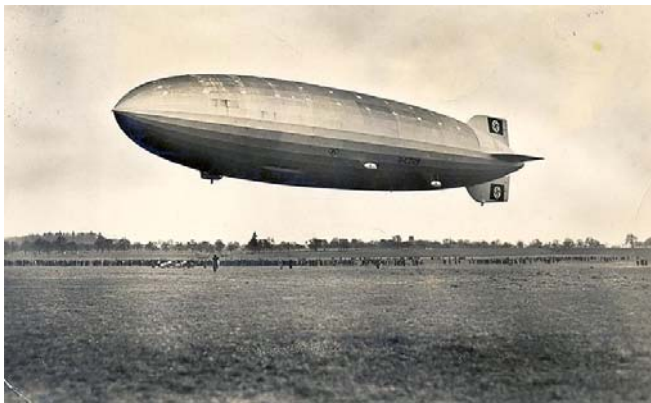


Abb. 6: Das Luftschiff LZ 129 Hindenburg im Jahr 1936.

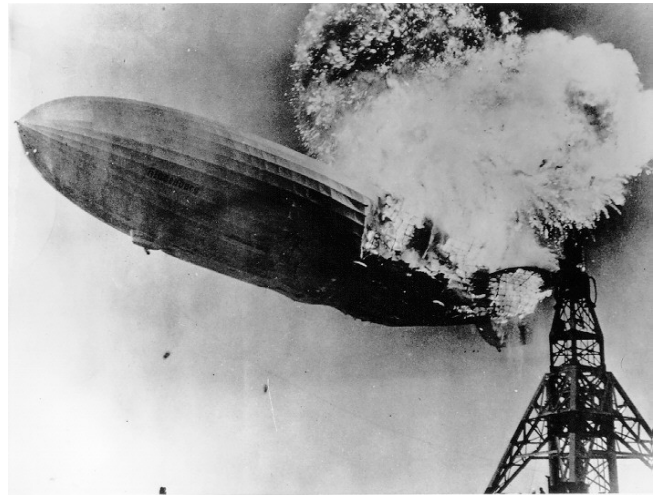


Abb. 7: Die Hindenburg beim Unfall 1937 in Lakehurst in den USA.

Hilfe zu A6: Nehmen wir die im Allgemeinen verwendete Temperatur von  $4^\circ\text{C}$  mit  $100 \%$  an.  $1 \%$  sind dann  $0,04^\circ\text{C}$ ,  $0,5 \%$   $0,02^\circ\text{C}$ . Genau das ist die Differenz zum exakten Temperaturwert von  $3,98^\circ\text{C}$ .

Nehmen wir die im Allgemeinen verwendete Wasserdichte von  $1000 \text{ kg/m}^3$  mit  $100 \%$  an.  $999,975 \text{ kg/m}^3$  sind dann  $99,9975 \%$ . Der Unterschied beträgt daher winzige  $0,025 \%$  oder rund  $0,3 \%$ . Die Ungenauigkeiten betragen daher  $0,5 \%$  und sogar nur  $0,3 \%$ . Beides ist im Alltag zu vernachlässigen.

Hilfe zu A7: Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), das unter anderem beim Gären entsteht, hat eine größere Dichte als Luft (siehe Tabelle 4) und sinkt daher in dieser ab. Deshalb ist es in Silos und auch in Weinkellern während der Gärung in Bodennähe immer gefährlich.