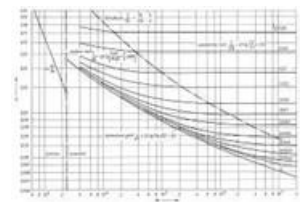
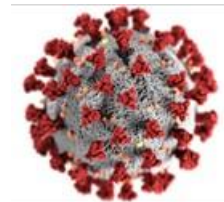
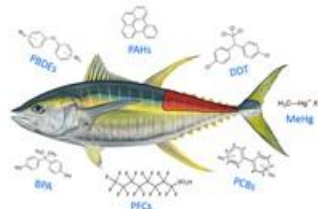
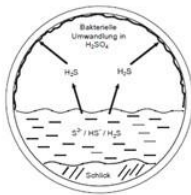
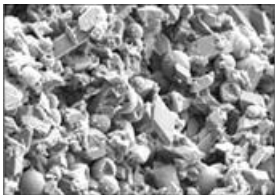


Bachelor Infrastruktur

Vorlesung und Übung: Naturwissenschaftliche Grundlagen

Prof. Dr.-Ing. habil. Welker, Frankfurt University of Applied Sciences



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Einführung

Semester 6	Nachhaltige Kreislaufwirtschaft und Ressourcenmanagement 5 CP	Instandhaltungsmanagement 5 CP	Wahlpflichtmodul 1 auswählen aus den Modulen 8-2 bis 8-6, 9-2 bis 9-5 und 10-1 5 CP	Wahlpflichtmodul 2 auswählen aus den Modulen 8-2 bis 8-6, 9-2 bis 9-5 und 10-1 5 CP	Wahlpflichtmodul 6 auswählen aus den Modulen 8-1 oder 9-1 5 CP	Kooperatives Projekt 1 – Infrastruktur planen 5 CP
Semester 5*	Berufspraktisches Semester 25 CP					International Project 5 CP
Semester 4	Stadtgestaltung und öffentlicher Raum 5 CP	Verkehrswesen 2 5 CP	Wasserwirtschaft 2 5 CP	Interdisziplinäres Studium Generale 5 CP	Geoinformations-Systeme 1 5 CP	Rechtliche Fragen der Infrastruktur 5 CP
Semester 3	Grundlagen Städtebau 5 CP	Verkehrswesen 1 5 CP	Wasserwirtschaft 1 5 CP	Energie 5 CP	Digitales Planen von Infrastruktur 2 5 CP	Umweltmanagement und Landmanagement 5 CP
Semester 2	Ingenieurmathematik 2 5 CP	Grundlagen der Wasserwirtschaft 5 CP	Baubetriebswirtschaft 5 CP	Vermessung 5 CP	Digitales Planen von Infrastruktur 1 5 CP	Tiefbau 5 CP
Semester 1	Ingenieurmathematik 1 5 CP	Grundlagen des Verkehrswesens 5 CP	Naturwissenschaften 5 CP	Nachhaltigkeit 5 CP	Grundlagen der Mechanik und Tragkonstruktionen 5 CP	Baustoffkunde 5 CP

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Einführung

- **Naturwissenschaftliche Grundlagen: Anknüpfung an**
Themengebiete des Studienganges BA I & U
- **1. Semester**
 - 1-6: **Baustoffkunde** (Zementprozesse, Metallkorrosion, Holzschutzmittel)
 - 1-3: **Nachhaltigkeit**
 - ...
- **weitere Semester**
 - 2-3: Grundlagen der **Wasserwirtschaft** (Physik des Wassers)
 - 3-3: **Wasserwirtschaft** 1 und 4-3: **Wasserwirtschaft** 2
 - 4-4: **Kreislaufwirtschaft** und Ressourcenmanagement
 - 9-3: **Aufbereitungstechnologien für Wasser und Abwasser**
 - 9-4: **Abwasserlabor** und Simulation in der Abwasserreinigung
 - ...

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Einführung

- **1. physikalische Eigenschaften** (wichtige Kenngrößen);
Hydrostatik/ Hydrodynamik – Schwerpunkt Wasser (ca. 2-3
Veranstaltungen)
- **2. Grundlagen Chemie** (Atome, Elemente, Phasen,
Verbindungen, Bindungsformen, chemische Reaktionen,
elektrolytische Dissoziation, Redoxreaktionen – Schwerpunkt
Wasser (ca. 5-6 Veranstaltungen)
- **3. Grundlagen Biologie** (Mikroorganismen, Stoffwechsel,
biologische Bestimmungsmethoden, Ökotoxikologie) (ca. 2-3
Veranstaltungen)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Einführung

- **Vorlesungstermine** sowie mögliche Änderungen (Zeiten, Räume) und Folien in campus
- **Standard:** Mittwoch, 10:15-13:30 Uhr in Raum 205 in Gebäude 9
- **Prüfung:** Klausur (120 Minuten) am Ende Semester
 - max. 60 Punkte, Note 4,0 mit ca. 30 Punkten
 - Altklausuren auf campus

Naturwissenschaftliche Grundlagen

1. Physikalische Grundlagen

1.1 physikalische Eigenschaften – Schwerpunkt Wasser

- **Dichte** (spezifische Masse)
- **Zähigkeit/Viskosität**
- **Oberflächenspannung**
- **Kompressibilität**
- Thermische Eigenschaften (**Wärmekapazität**)

- **Aggregatzustand**
- Löslichkeit von **Gasen in Wasser (Dampfdruck)**

Physikalische Grundlagen

Dichte (spezifische Masse)

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{Masseneinheit}}{\text{Längeneinheit}^3} \right] \text{meist} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

- **ρ** („klein Rho“)
- Quotient aus **Masse** und **Volumen**

Physikalische Grundlagen

Dichte (spezifische Masse)

- **Masse [kg, g...]**
 - $1 \text{ kg} = 1.000 \text{ g}$
- **Volumen [m^3 , l, cm^3 , dm^3]**
 - $1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ dm}^3 = 1.000 \text{ l}$
 - $1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ l} = 1.000 \text{ cm}^3$
 - $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ ml}$
- **Dichte [g/cm^3 , kg/m^3]**
 - $1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Physikalische Grundlagen

Dichte (spezifische Masse) Metalle

- **Dichte Gold**
 - Goldwürfel mit Seitenlänge 3 cm
 - → **Volumen $V = (3 \text{ cm})^3 = 27 \text{ cm}^3$; Masse m : 520 g**
 - Gesucht: **Dichte $\rho = m / V$ mit $\rightarrow 520 \text{ g} / 27 \text{ cm}^3 = 19,3 \text{ g} / \text{cm}^3$**
 - **Dichte Messing (Legierung Kupfer und Zink)**
 - **Volumen $V = (3 \text{ cm})^3 = 27 \text{ cm}^3$; Dichte ρ : 8,5 g/ cm³**
 - → **Masse $m = 27 \text{ cm}^3 * 8,5 \text{ g} / \text{cm}^3 = 229,5 \text{ g}$**
- **Fälschungsnachweis: Masse geringer bei gleichem Volumen!**



Zum Vergleich:

Quecksilber bei 20°C: $\rho = 13.546 \text{ kg/m}^3 = 13,5 \text{ g/cm}^3$

Luft bei 1.000 hPa und 0°C: $\rho = 0,00193 \text{ g/cm}^3$

Physikalische Grundlagen

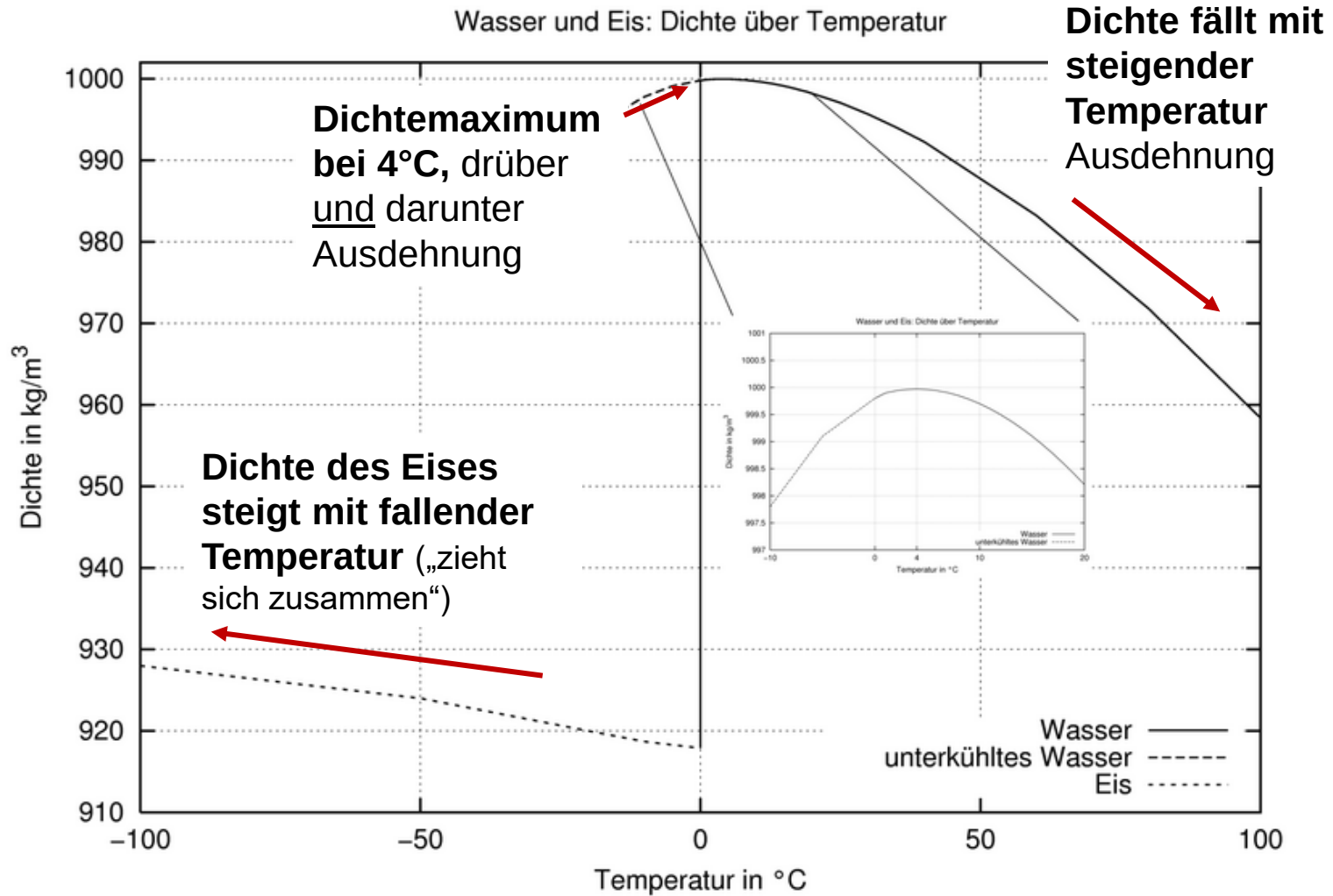
Dichte (spezifische Masse) Wasser

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{Masseneinheit}}{\text{Längeneinheit}^3} \right] \text{meist} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

- **Dichte Wasser:** Hinreichend genau für die meisten Berechnungsfälle: **1.000 kg/m³ oder 1 g/cm³**
- abhängig von **Temperatur** und **Druck**
- abhängig von **Salz-** und **Feststoffgehalt**
- **Dichtemaximum Wasser** (minimales Volumen) **bei 4°C** → **Anomalie** des („Süß-“)Wassers

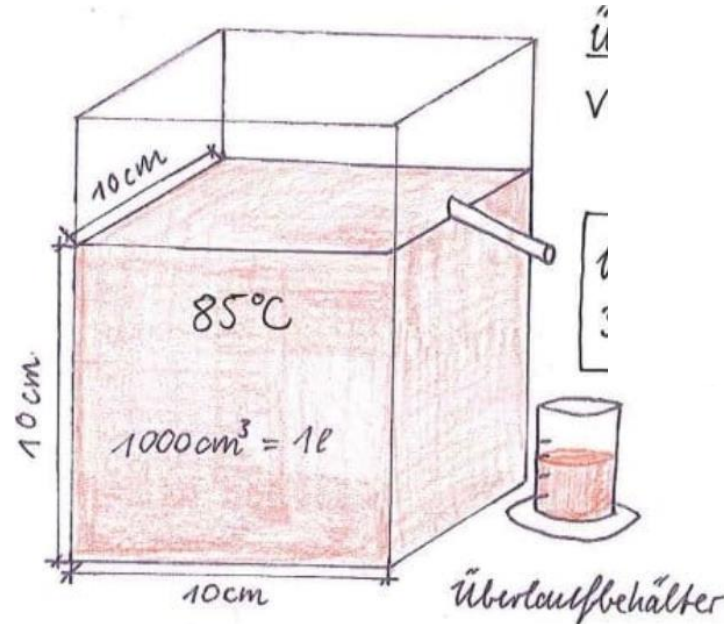
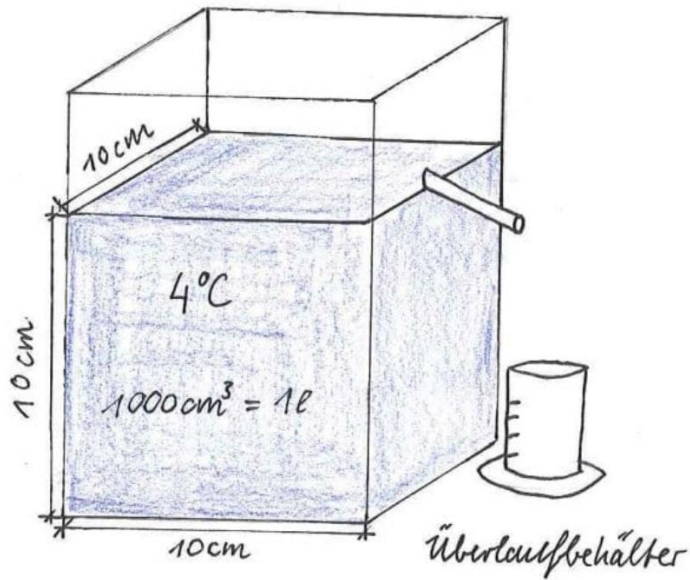
Physikalische Grundlagen

Dichteanomalie Wasser



Physikalische Grundlagen

Dichte Wasser/ Anwendung Heizung



Dichte ρ (4°C) = m / V =
 $1.000 \text{ g} / 1.000 \text{ cm}^3$ =
1,0 g/cm³

Dichte ρ (85°C) = m / V = $968,61 \text{ g} / 1.000 \text{ cm}^3$ =
0,968 g/cm³

Überlaufmasse : $1.000 \text{ g} - 968,61 \text{ g} =$ **31,39 g**

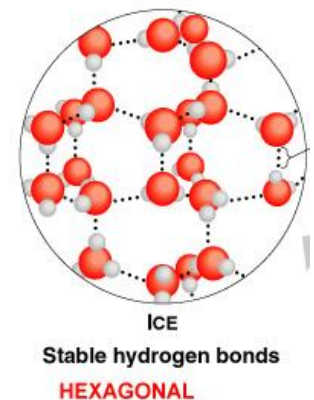
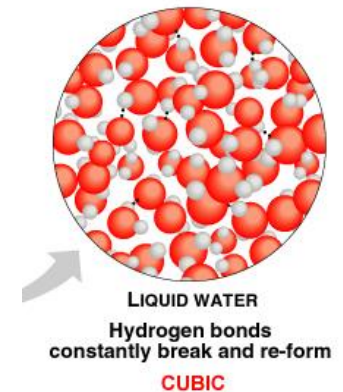
Überlaufvolumen: $V = m / \text{Dichte} =$
 $31,39 \text{ cm}^3 / 0,968 \text{ g/cm}^3 =$ **32,41 cm³**

→ Auslegung Heizung (**Ausdehnungsgefäß**)!

Physikalische Grundlagen

Dichteanomalie Wasser

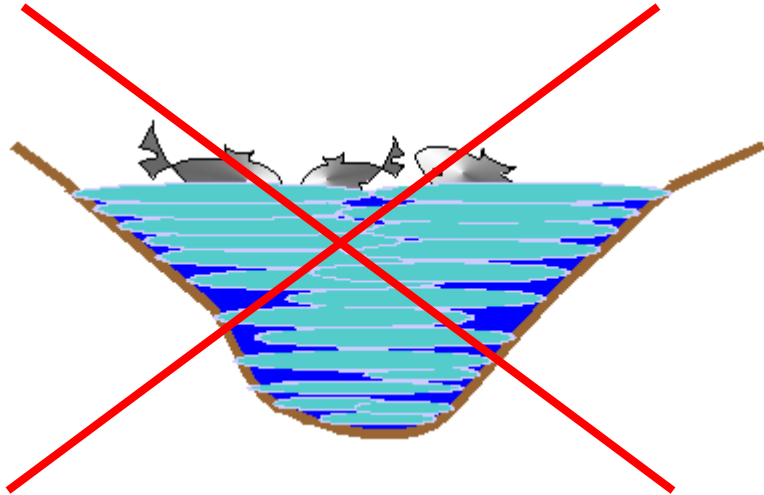
- **Temperatur über 4° Celsius:** Verhalten Wasser wie andere Flüssigkeiten.
 - **Temperaturverringering:** Die Moleküle rücken näher zusammen → Abnahme Volumen
 - **Temperaturerhöhung:** Wassermoleküle bewegen sich schneller und brauchen mehr Platz. Anzahl der Moleküle mit **Wasserstoffbrückenbindungen** nehmen ab (ca. 100 Moleküle bei 4°C auf ca. 5 bei 90 °C). Ausdehnung Flüssigkeit mit zunehmender Temperatur
- **Temperatur unter 4° Celsius:** Wassermoleküle bilden geordnete **Kristalle** (Sechsecke) → das Volumen nimmt wieder zu → **Dichte von Eis** geringer als Wasser → **Eis schwimmt**



©1999 Addison Wesley Longman, Inc.

Physikalische Grundlagen

Dichteanomalie Wasser



- **Dichteanomalie des Wassers** ist lebensnotwendig für das Leben auf der Erde.
- **4°C kaltes Wasser** hat die größte Dichte und befindet sich somit **immer unten** und **Isolierung Eisschicht** an Oberfläche
- **See:** friert von oben und nicht von unten zu, so dass Lebewesen (Fische) am Grund überwintern können.

Physikalische Grundlagen

Dichte (spezifische Masse) Wasser

- **Volumenanstieg** beim Gefrieren: **ca. 9 % (!)** Zu beachten u. A. beim **Leitungsbau, bei Behältern im Freien, Straßenbau, techn. Gebäudeausrüstung...**
- Ursache für **Gefügesprengungen** von Bauteilen (**Frostangriff**).
 - Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes lassen das Wassers im durchfeuchteten **Beton** gefrieren
 - **Kristallisationsdruck:** Abplatzungen an der Betonoberfläche
 - Die **Frostschäden** („Ausfrieren“) sind allein in Deutschland mit **mehreren hundert Millionen Euro** pro Jahr zu beziffern.



Physikalische Grundlagen

Dichte (spezifische Masse) Wasser

	ρ [kg/m ³]
Reines Wasser bei 4 °C (minimales Volumen)	1000 (999,84)
Reines Wasser bei 30 °C (Volumenvergrößerung um 0,54%)	995
Reines Wasser als Eis (Volumenvergrößerung um rd. 10%)	910
Nordseewasser mit 35‰ Salzgehalt	1026
Ostseewasser mit 9,4‰ Salzgehalt	1007
Flußwasser mit starkem Schwebstoffgehalt	1020

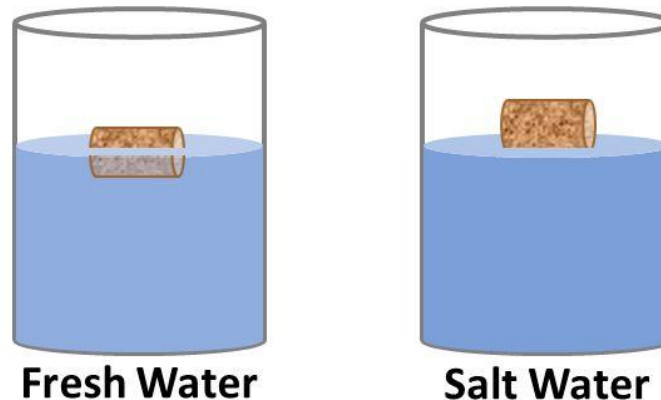
- Abhängigkeit vom **Salzgehalt**: hoher Salzgehalt → **höhere Dichte**
- Abhängigkeit vom **Schwebstoffgehalt**: hoher Schwebstoffgehalt → **höhere Dichte**

Hinreichend genau für die meisten Berechnungsfälle: **$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$**

Physikalische Grundlagen

Dichte (spezifische Masse) Wasser

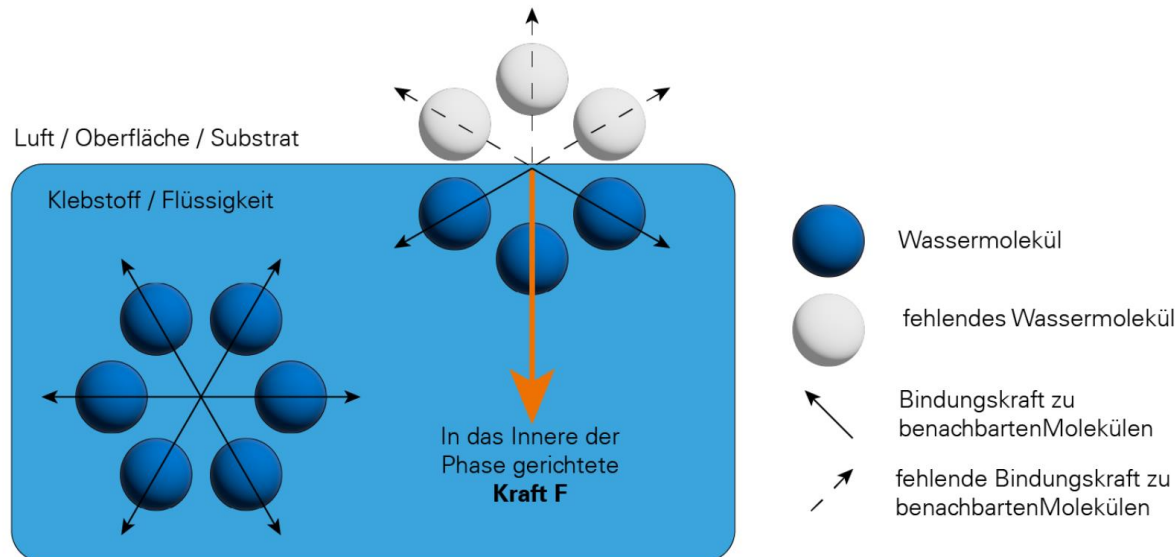
- **Auftrieb F_A** (Schiffe, Schwimmer) in **Salzwasser (Dichte bis 1.026 kg/m^3)** höher als in **Süßwasser (ca. 1.000 kg/m^3)**
- **Auftrieb** abhängig von **Dichte der verdrängten Flüssigkeit:**
- bei Salzwasser höher → mehr **Auftrieb**;
- bei **Süßwasser** (z.B. Fahrt von Nordsee in Elbe) sinkt Schiff stärker ein!



Physikalische Grundlagen

Oberflächenspannung Flüssigkeiten

- **Innerhalb Flüssigkeit:** alle **Kräfte** heben sich auf (Anziehung und Abstoßung im Gleichgewicht)
- **Übergang Oberfläche:** resultierende **Kraft** nach innen (**Binnendruck**)
- **Ausbildung Kugelgestalt** durch Bestreben aller Flüssigkeiten kleinste Oberfläche zu bilden



Physikalische Grundlagen

Oberflächenspannung Wasser

Oberflächenspannung σ (auch: spezifische Oberflächenenergie):
Quotient aus Arbeit W zur Veränderung der Oberfläche ΔA

$$\sigma = \Delta W / \Delta A \text{ [N m/m}^2\text{]} \text{ mit } W = F * s \text{ [N*m]} \text{ (Arbeit: Kraft mal Strecke)}$$

$$\sigma = F * s / A \text{ [N m/m}^2\text{]} \rightarrow F / s \text{ [N/m]}$$

Die **Oberflächenspannung von Wasser ist hoch** und **nimmt mit steigender Temperatur ab!** (Intermolekulare Wechselwirkung sind schwächer)

Tabelle 6.2 Oberflächenspannung einiger ausgewählter flüssiger Substanzen gegen Luft (20°C)

Substanz	Formel	Oberflächenspannung (10 ⁻³ N/m)
Quecksilber	Hg	486,5
Wasser (20°C)	H ₂ O	72,9
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	22,4
Benzol	C ₆ H ₆	28,9



Physikalische Grundlagen

Oberflächenspannung Wasser

Kapillarität: Aufsteigen Flüssigkeit, wenn Gewinn an Energie vorliegt

Höhe der Flüssigkeit h abhängig von **Oberflächenspannung σ** , **Dichte** und **Radius der Kapillare r** (je enger, desto höher steigt das Wasser)

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot r \cdot g}$$

$g = \text{Erdbeschleunigung } 9,81 \text{ m/s}^2$



Physikalische Grundlagen

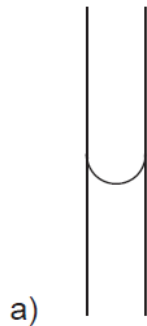
Oberflächenspannung Wasser

Adhäsionskraft:

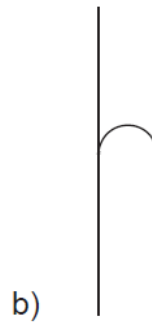
Anziehungskraft **zwischen den Molekülen zweier** unterschiedlicher Stoffe

Kohäsionskraft:

Anziehungskraft **zwischen Molekülen eines Stoffes**



Adhäsionskräfte > Kohäsionskräfte
z.B. Wasser



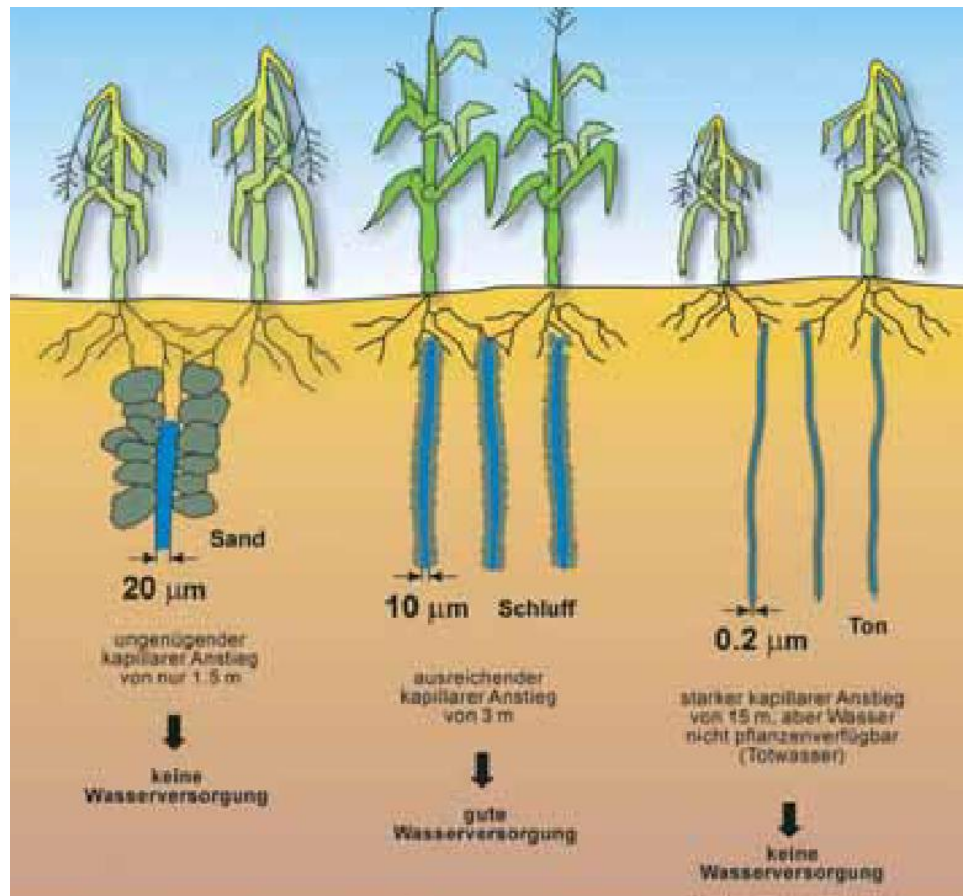
Adhäsionskräfte < Kohäsionskräfte
z.B. Quecksilber

Abbildung 6.7 Wechselspiel zwischen Adhäsions- und Kohäsionskräften in engen Röhren
a) konkave Oberfläche, b) konvexe Oberfläche

Physikalische Grundlagen

Oberflächenspannung Wasser

Große Bedeutung für Prozesse in Fauna/ Flora (Transport von Wasser durch **Kapillarkräfte** in die Blattoberflächen der Bäume oder in Böden)



Physikalische Grundlagen

Oberflächenspannung Wasser

Kapillare Steighöhen auch in Poren von Baustoffen (hier i.d.R. unerwünscht)

Grobporige Baustoffe sind aufgrund großer Poren von vornherein nicht kapillaraktiv.



Physikalische Grundlagen

Oberflächenspannung Wasser

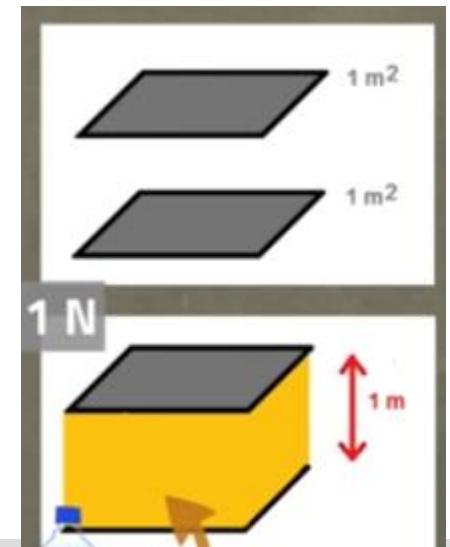
- **Verringerung** der **Oberflächenspannung** durch **Tenside**
 - Schaumbildung beim Waschprozess.
 - Im Bauwesen finden Tenside als Betonzusatzmittel, in Bitumenemulsionen und in Kunststoffdispersionen Verwendung
- **Erhöhung** der **Oberflächenspannung** durch **Hydrophobieren** (z.B. wasserabweisende Lacke, Teflon)



Physikalische Grundlagen

Viskosität Wasser

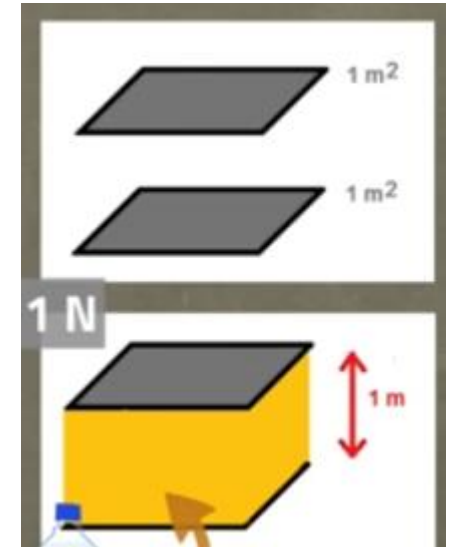
- **dynamische Viskosität μ oder η („Eta“)** auch: innere Reibung
- **Einheiten:** [mPa·s] oder [Pa·s] oder [N·s/m²] oder [kg/m·s]
- mit Druck p [Pa] = Kraft F [N] / Fläche [m²]
- und Kraft F [N] = m [kg] · a [m/s²]
- Fähigkeit einer Flüssigkeit zu fließen.
Reibungswiderstand von Molekülen bei gegenseitiger Verschiebung parallel liegender Schichten
- 1 N·s/m²: man braucht 1 N, um Platten von 1 m² und Abstand 1 m zu verschieben mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s



Physikalische Grundlagen

Viskosität Wasser

- **kinematische Viskosität ν („Ny“)** [m^2/s]
- **dynamische Viskosität η („Eta“)** [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]
- **Umrechnung mit Dichte ρ („rho“)** [kg/m^3]



dynamische Viskosität η [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$] =

kinematische Viskosität ν [m^2/s] · **Dichte ρ** [kg/m^3]

Physikalische Grundlagen

Viskosität Wasser

- Viskosität bestimmt **Wechselwirkungskräfte zwischen den Molekülen** der Flüssigkeit (bei Wasser wieder die Wasserstoffbrückenbindungen)
- hohe dynamische Viskosität Wasser $\eta = 1,002 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (20°C)**

Benzol:	$\eta = 0,647$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$ (20°C)
Blut:	$\eta = 3\text{-}25$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$ (37°C)
Schweröl:	$\eta = 30$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$ (50°C)
Honig:	$\eta = 10.000$	$\text{mPa}\cdot\text{s}$ (20°C)



Physikalische Grundlagen

Viskosität Wasser

- **Viskosität** des **Wassers** nimmt mit ansteigender **Temperatur ab (bei Gasen umgekehrt)**:

- η (40°C) = 0,656 mPa·s
- η (60°C) = 0,469 mPa·s
- η (100°C) = 0,282 mPa·s

Grund: Intermolekulare Wechselwirkung (**Wasserstoffbrückenbindungen** werden schwächer...)

- Große Bedeutung der **kinematischen Viskosität ν** bei der **Auslegung von Rohrleitungen** (Darcy-Weisbach-Gleichung: Lambda λ abhängig von Viskosität)

→ G7 Grundlagen der Wasserwirtschaft

		Viskosität	
Temperatur δ	Dichte ρ	dynamische η	kinematische ν
°C	kg/m ³	kg/ms	m ² /s
0	999,8	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-6}$
10	999,6	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$
20	998,2	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
30	995,6	$8,02 \cdot 10^{-4}$	$8,06 \cdot 10^{-7}$
40	992,2	$6,52 \cdot 10^{-4}$	$6,57 \cdot 10^{-7}$
50	988,0	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-7}$
60	983,2	$4,70 \cdot 10^{-4}$	$4,78 \cdot 10^{-7}$
70	977,8	$4,17 \cdot 10^{-4}$	$4,27 \cdot 10^{-7}$
80	971,8	$3,56 \cdot 10^{-4}$	$3,66 \cdot 10^{-7}$
90	965,3	$3,21 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-7}$
100	958,3	$2,82 \cdot 10^{-4}$	$2,94 \cdot 10^{-7}$

Physikalische Grundlagen

Kompressibilität Wasser

- welche allseitige **Druckänderung** ist nötig, um eine bestimmte **Volumenänderung** hervorzurufen
- Die SI-Einheit des **Kompressionsmoduls** K ist Pascal bzw. Newton pro Quadratmeter
- auch Funktion der **Temperatur**
- **Kompressibilität von Flüssigkeiten > Feststoffe**
- bei **Gasen sehr signifikant** und wichtig, bei **Wasser eher klein (quasi inkompressibel)**

$$K := - \frac{V dp}{dV} = - \frac{dp}{dV/V}$$

Physikalische Grundlagen

Kompressibilität Wasser

- **Wasser:** sehr gering, auch wegen Wasserstoffbrückenbindungen
→ gilt deshalb als nahezu **inkompressibel**
- gute Eigenschaft bei **Auslegung Trinkwasser-Netzen**
- **Ozeane:** bei 4 km Tiefe (sehr hoher Druck) nur Verringerung Volumen um ca. 1,8 %

Physikalische Grundlagen

Wärmekapazität Wasser

$$C = \frac{\delta Q}{\delta T} \quad \text{bei } 20\text{ °C ist } C = 4.19 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

C: Wärmekapazität, in kJ/(kg·K)

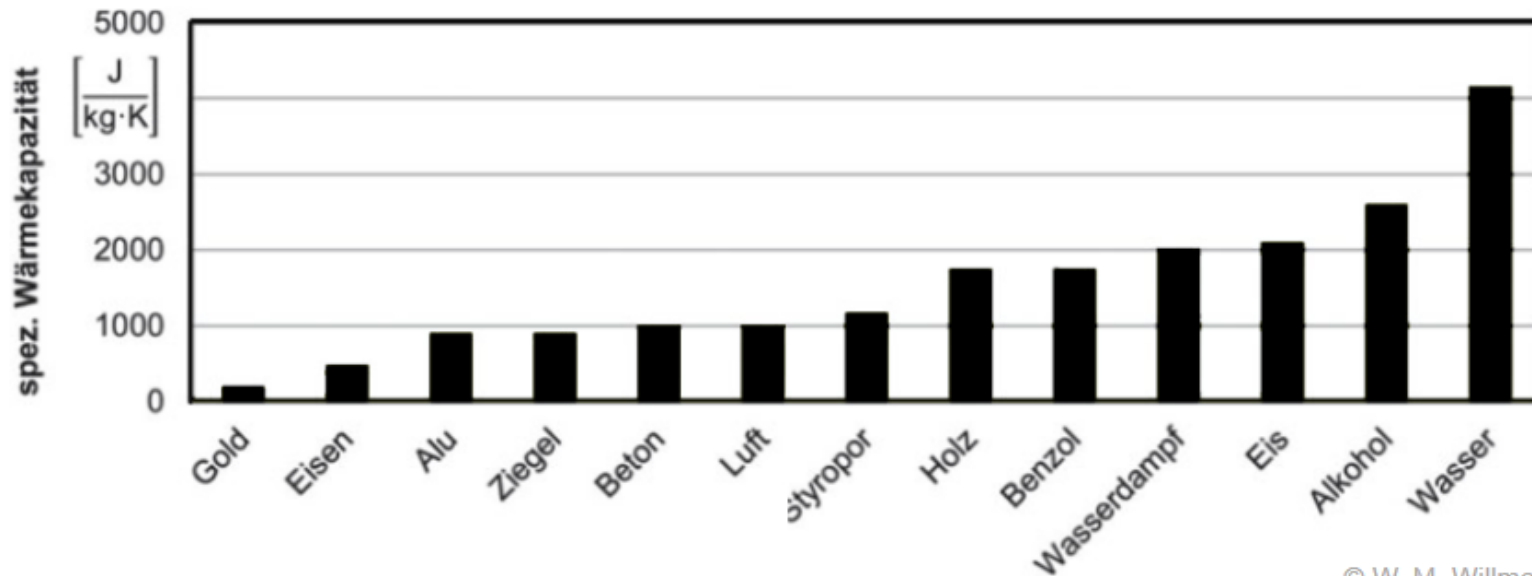
Q: Energieeintrag zur Erhöhung Temperatur in kJ/kg

T: Temperatur in K

- **Wärmekapazität:** Wärmemenge Q, die benötigt wird um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen
- je **größer die spezifische Wärmekapazität** eines Stoffes ist, desto **langsamer** erfolgt der Erwärmungsvorgang
- **Metalle** haben **geringere Wärmekapazität** wie rostfreier Stahl 0,51 oder Messing 0,37 kJ/kg K

Physikalische Grundlagen

Wärmekapazität Wasser



- **Wasser** hat **hohe Wärmekapazität** (4,19 kJ/kg K) im Vergleich aller Flüssigkeiten
- Wasser benötigt **hohen Energieeintrag** zur Erhöhung Temperatur
Ursache: **Wasserstoffbrückenbindungen**

→ **Ozeane und große Seen** haben hohe (aber nicht unendliche) **Pufferwirkung** um Wärmeveränderungen auszugleichen

Physikalische Grundlagen

Physikalische Kenngrößen Wasser

Oberflächenspannung

Viskosität

Kompressibilität

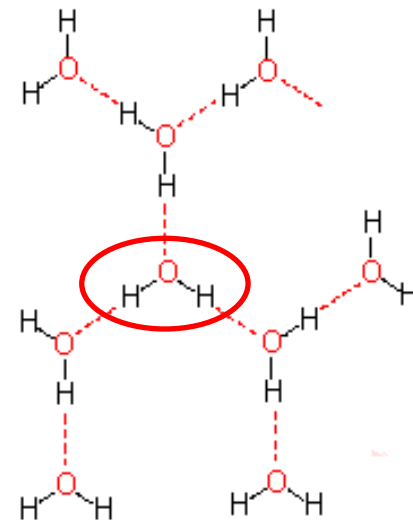
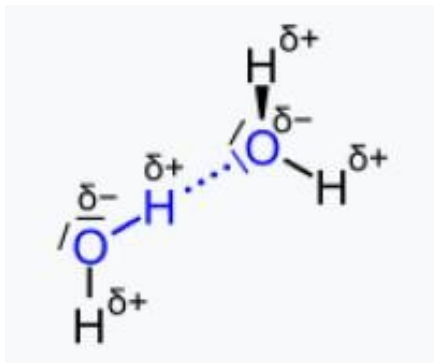
tempera- ture T [°C]	surface tension σ [10^{-5} N/cm]	dynamic viscosity η [10^{-3} Pa/s]	compressibility κ [10^{-9} hPa $^{-1}$]
0	75.6	1.78	51.0
5	74.9	1.52	49.6
10	74.2	1.31	45.9
15	73.5	1.40	44.2
20	72.8	1.00	44.5
25	72.0	0.89	46.1
30	71.2	0.80	48.9
50	67.9	0.55	44.0
100	58.9	0.28	47.7

Physikalische Grundlagen

Physikalische Kenngrößen Wasser

Permanenter **Dipol** → Ausbildung **Wasserstoffbrückenbindungen**
(mehrere sog. intermolekulare Bindungen pro Molekül)

- **max. Dichte bei 4 °C**
- hohe **Wärmekapazität**
- hohe **Oberflächenspannung** und **Viskosität**
- sehr geringe **Kompressibilität**



Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand

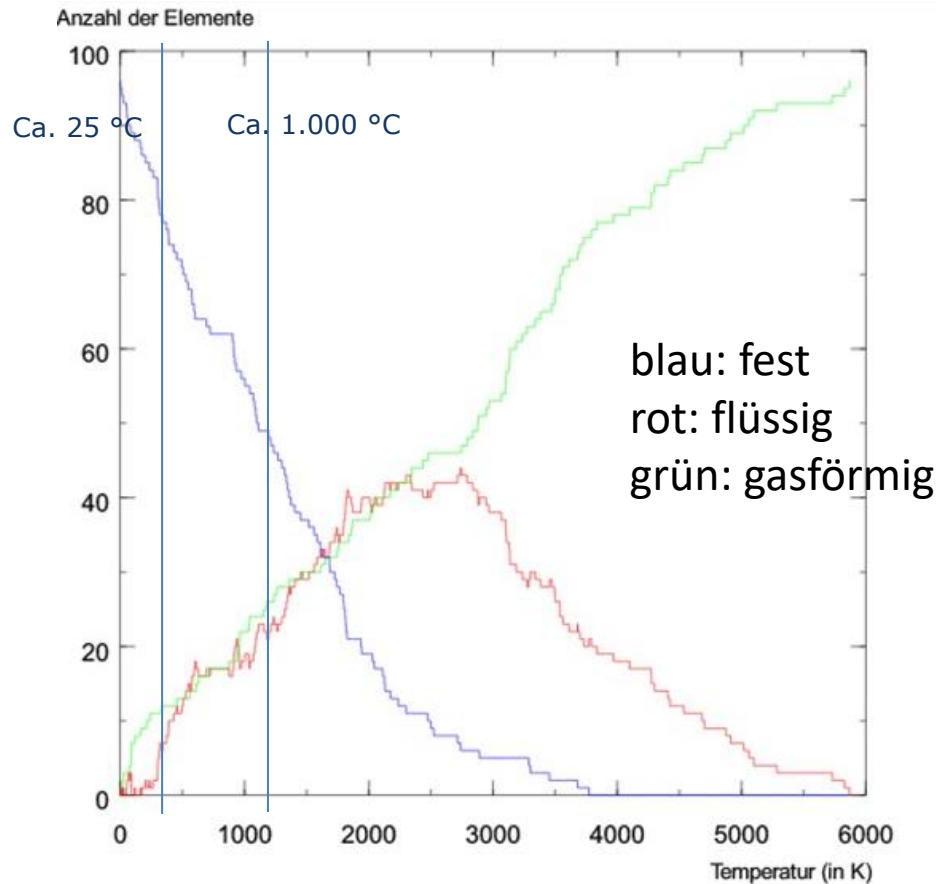
- **fest:** In diesem Zustand behält ein Stoff meist sowohl Form als auch Volumen bei.
- **flüssig:** Volumen weitgehend konstant, aber die Form ist unbeständig und passt sich dem umgebenden Raum an.
- **gasförmig:** ein Gas füllt den zur Verfügung stehenden Raum vollständig aus, ein Gas ist kompressibel, das Volumen passt sich an.

zusammenfassender Begriff für feste und flüssige Stoffe:
kondensierte Materie.

zusammenfassender Begriff für Flüssigkeiten und Gas: **Fluide**

Physikalische Grundlagen

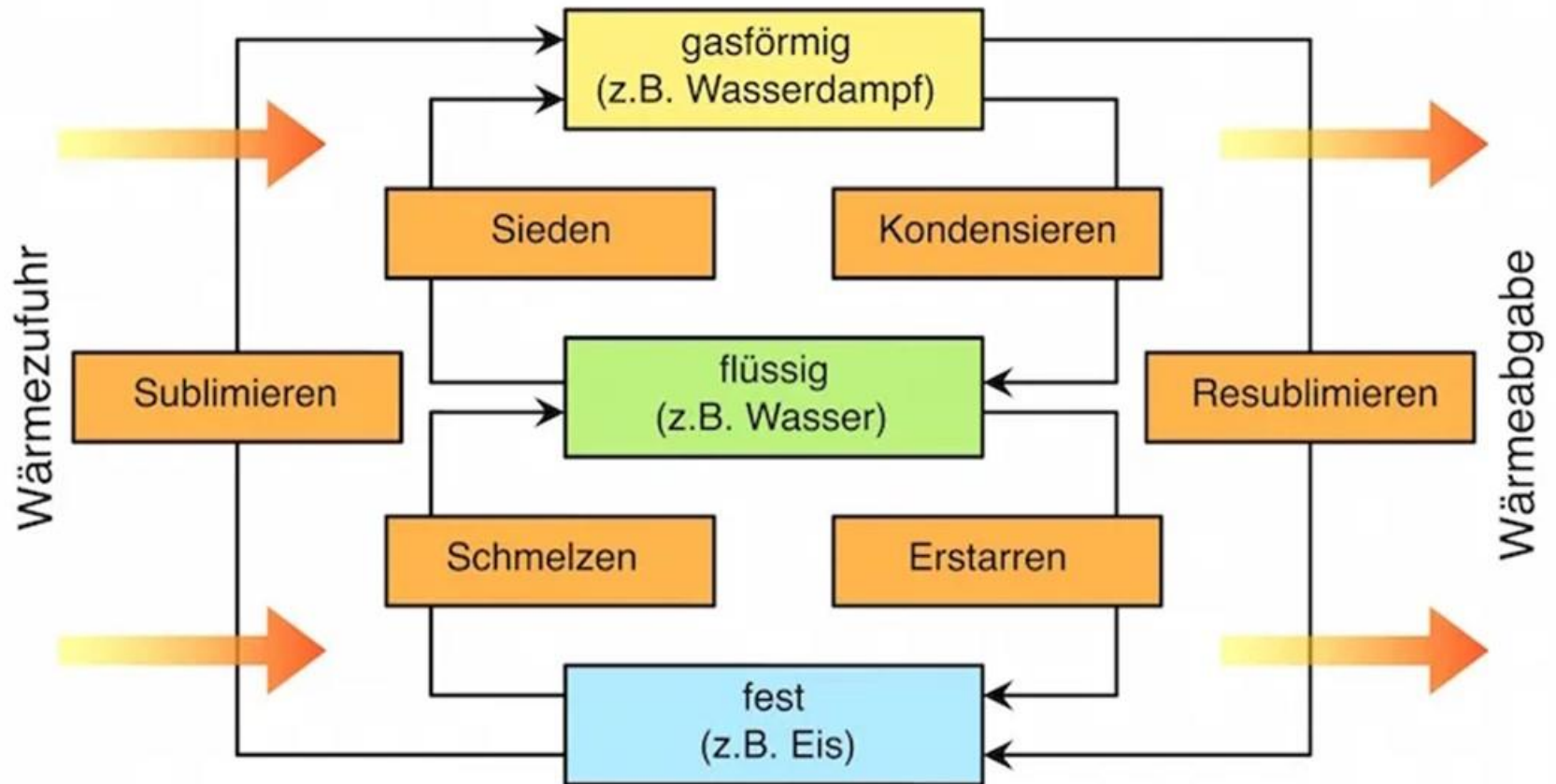
Aggregatzustand



Temperaturabhängige Häufigkeit der Aggregatzustände der Elemente

Physikalische Grundlagen

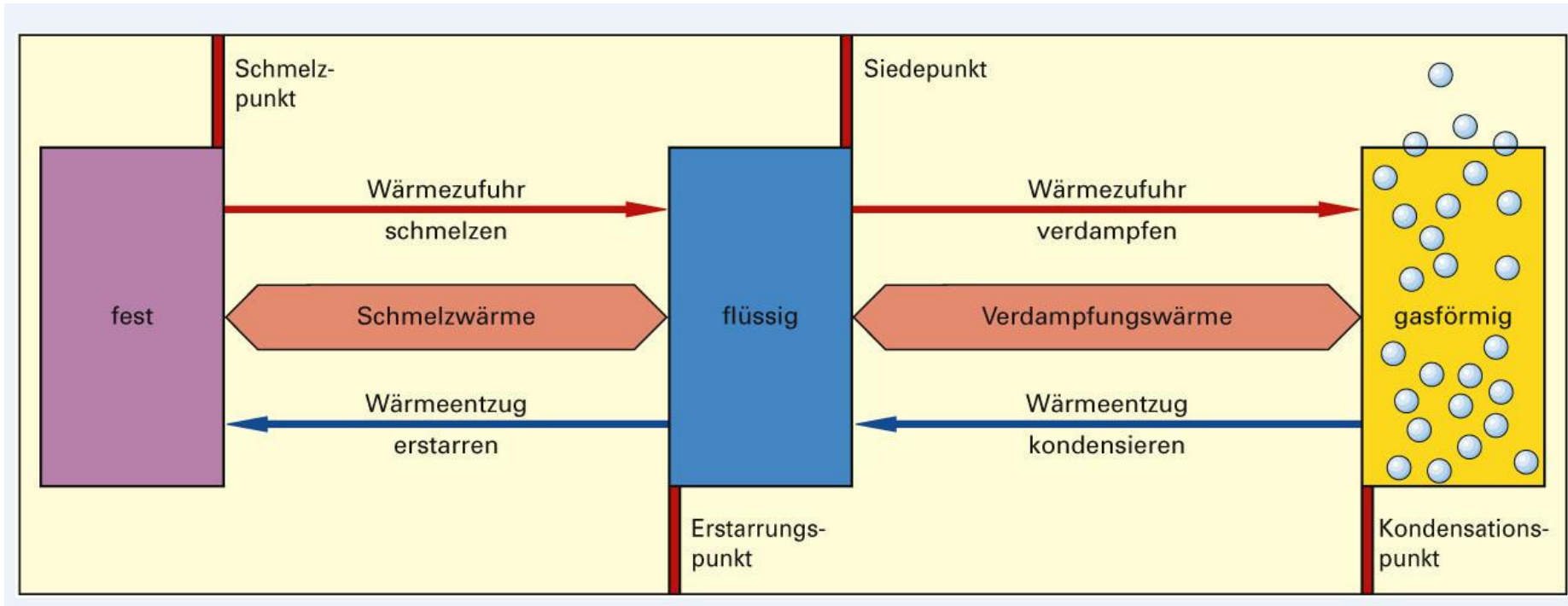
Aggregatzustand



<https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/schmelzwaerme-verdampfungswaerme/>

Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand



Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand

Tabelle 1: Schmelz- bzw. Erstarrungstemperaturen von Stoffen

Stoff	°C
Chrom	1900
Stahl	1450 ... 1530
Nickel	1450
Gusseisen	1150 ... 1250
Kupfer	1070 ... 1093
Aluminium	658
Zink	419
Blei	327
Wasser	0
Quecksilber	– 39
Stickstoff	– 210
Sauerstoff	– 227

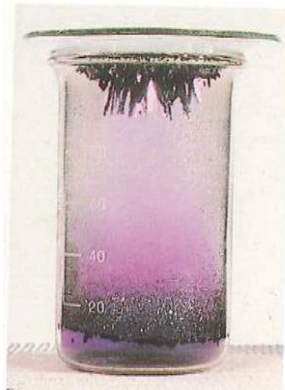
Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand

Sublimieren:

direkter Übergang eines **festen Stoffes in den Gaszustand** unter Umgehung der flüssigen Phase nennt man Sublimation (Umkehrung: Resublimieren)

Jod



Trockeneis (Kohlendioxid ca. -78 °C)
(Raumtemperatur: direkter Übergang CO_2 von fest nach gasförmig
Sichtbar: Kondensation Wassermoleküle)



Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand/ Wasser

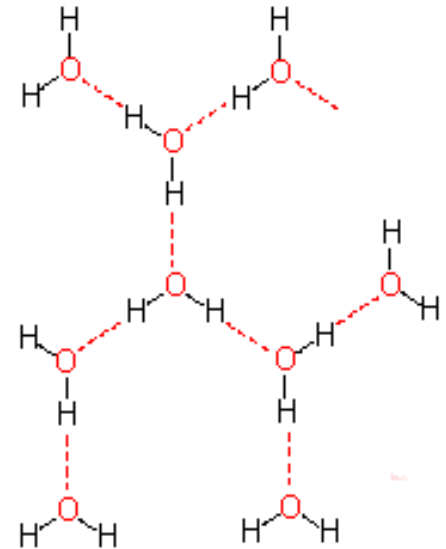
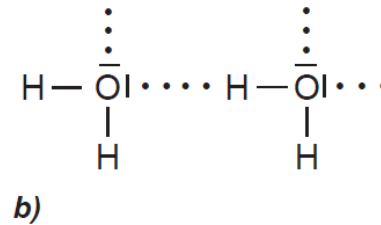
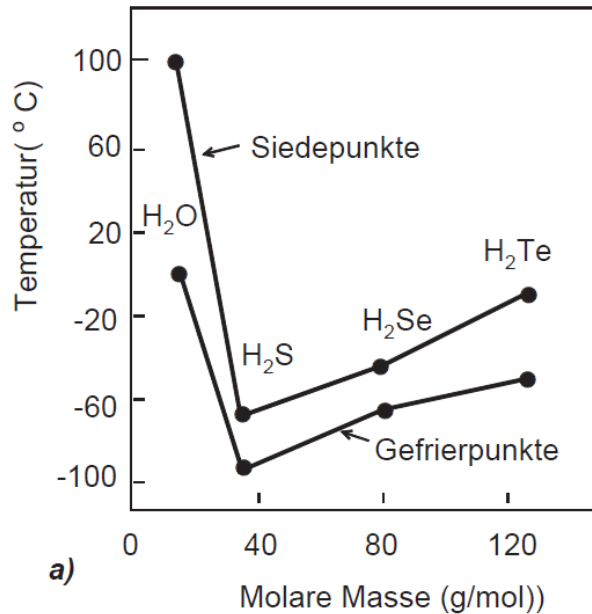


Abbildung 6.1

a) Siede- und Gefrierpunkte der Wasserstoffverbindungen der Elemente der VI. Hauptgruppe des PSE; b) Wasserstoffbrückenbindung bei Wassermolekülen

- Wasser „normalen“ Temperaturen: flüssig
 - **Wasserstoffbrückenbindungen!**
 - ohne diese wäre der Siedepunkt bei -75 °C
- kein Wasser auf unserem Planeten

Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand

- **festе und flüssige Stoffe** kann man immer sehen, auch wenn sie farblos sind, da sie begrenzende Oberflächen haben.
- **gasförmige** Stoffe hingegen sind in der Regel nicht sichtbar, es sei denn sie sind farbig.
- Beim **Wasser** nennt man die verschiedenen Aggregatzustände
 - **Eis** (festes Wasser),
 - **Wasser** (flüssiges Wasser) und
 - **Wasserdampf** (gasförmiges Wasser)

Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand

- Stoffe ändern ihren **Aggregatzustand** durch Energieaufnahme oder durch Energieabgabe (Temperaturänderung).
- Der Übergang von einem in den anderen Aggregatzustand erfolgt stoffabhängig bei bestimmten **Temperaturen**.
- Der **Stoff** selber bleibt bei den Aggregatzustandsänderungen erhalten, sein **Zustand** ist aber verändert (vgl. bei der Verbrennung von z.B. Holz bleibt das Holz nicht erhalten, sondern es entsteht Asche).

Physikalische Grundlagen

Aggregatzustand

- Vorstellung im **Teilchenmodell für Wasser**: Moleküle werden auf kleine Kugeln reduziert.
- Die mittlere **kinetische Energie aller Teilchen** (Bewegung der Teilchen) entspricht dem Maß für die Temperatur.
- **Festkörper**: Teilchen schwingen nur um ihre Ruhelage (relativ starr)
- **Flüssigkeit**: Teilchen müssen sich durch Lücken zwischen ihren Nachbarn hindurchzwängen (Diffusion ...)
- **Gas**: Teilchen bewegen sich geradlinig wie Billardkugeln, bis sie mit einem anderen oder mit der Gefäßwand zusammenstoßen.

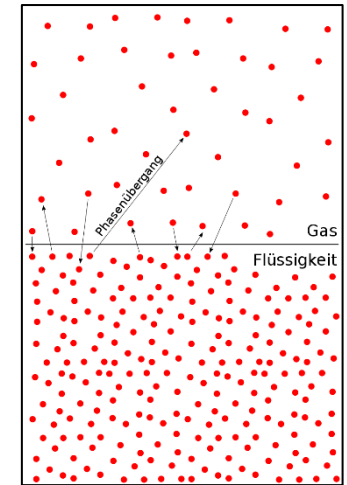


Physikalische Grundlagen

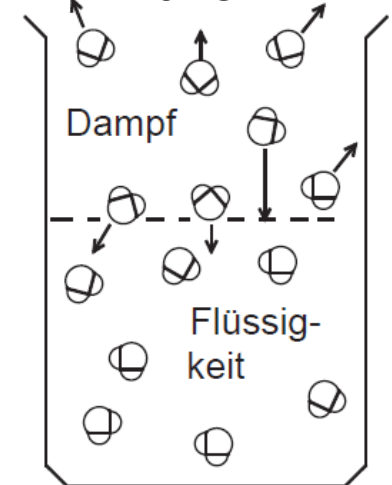
Dampfdruck

- **Annahme Dampfdruck:** Gleichgewicht zwischen **Flüssigkeit** und **Dampf**
- Unterschied zum **Gasdruck** (nur Gas)
- **Dampfdruck:** Druck des Dampfes, der sich bei einer gegebenen Temperatur in einem geschlossenen Gefäß einstellt, wenn sich flüssige Phase und Gasphase im **dynamischen Gleichgewicht** befinden.
- Der **Dampfdruck** ist **Maß für die Flüchtigkeit eines Stoffes** und ist **stoff- und temperaturabhängig**.
- **Offenes Gefäß → kein Gleichgewicht, Moleküle entweichen → Verdunstung**

geschlossen

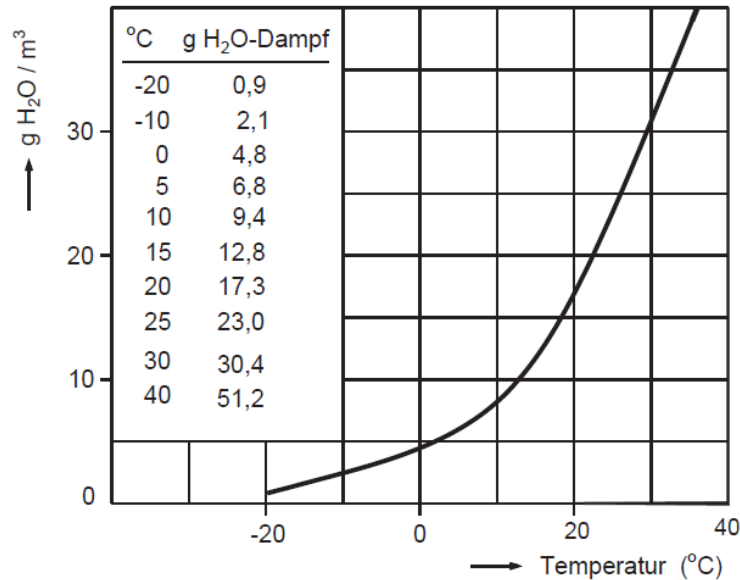


offen

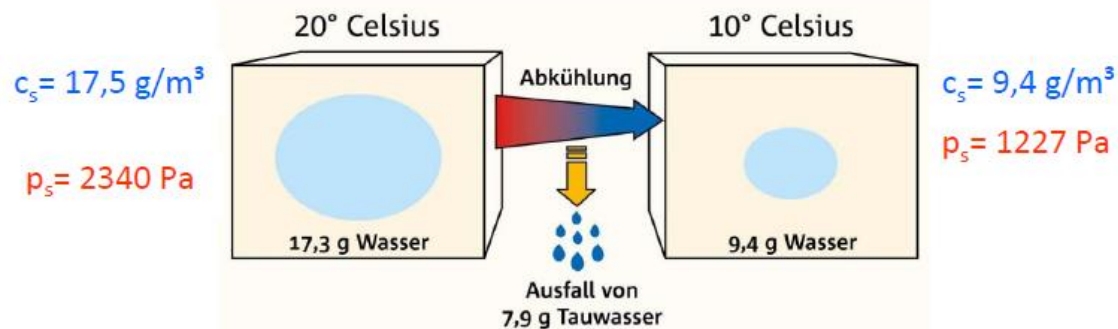


Physikalische Grundlagen

Dampfdruck Wasser



- Je höher die **Temperatur** desto mehr **Wasserdampf** (g H₂O-Dampf) in **Atmosphäre**
- Bei **Abkühlung** entsteht **Tauwasser** (Ursache von vielen Feuchteschäden an Gebäuden)



Physikalische Grundlagen

Dampfdruck Wasser

Siedepunkt: Temperatur, bei der der Dampfdruck einer Flüssigkeit den Wert des **äußeren Atmosphärendrucks** erreicht hat.

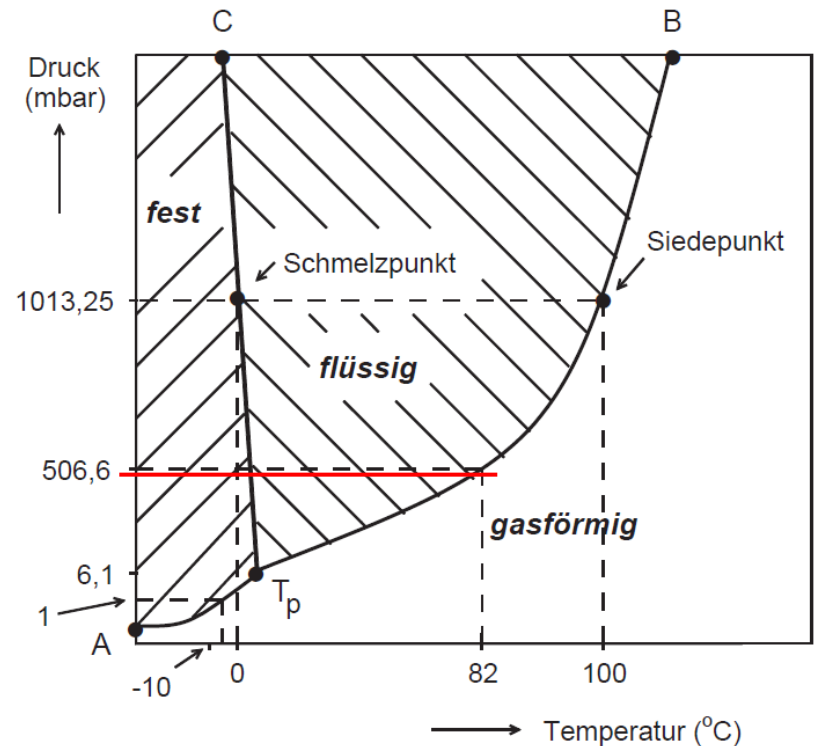
Je geringer der **Luftdruck**, desto niedriger die

Verdampfungstemperatur.

Luftdruck nimmt mit zunehmender **Höhe ab**.

5.000 m über NN: Luftdruck ca. 50% (ca. 505 mbar) des Drucks auf Meereshöhe (ca. 1.013 mbar)

→ **Wasser** siedet bereits bei **ca. 80°C**.



Physikalische Grundlagen

Dampfdruck Wasser

Einschub Überkritisches Wasser

Auftreten: **Temperatur $> 374,12\text{ °C}$** und

Druck über 22,1 MPa (221 bar = 221.000 mbar)

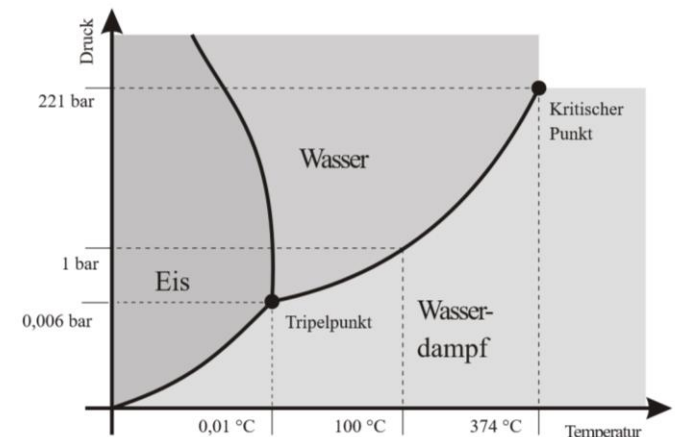
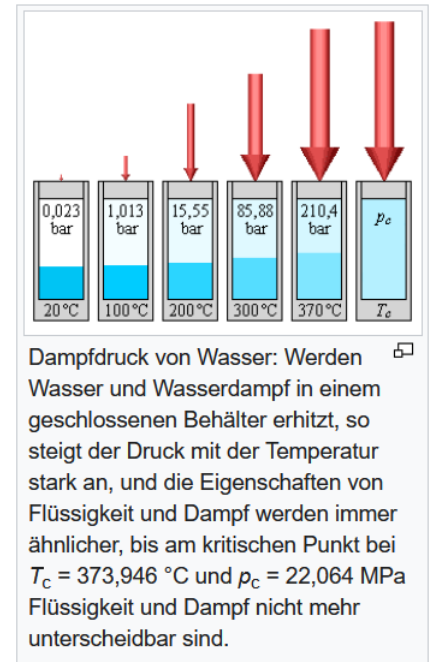
Oberhalb des kritischen Punktes:

weder flüssig noch gasförmig, kein Phasenübergang zu erkennen.

Wasser ist dicht wie eine Flüssigkeit, hat aber dieselbe Viskosität wie ein Gas.

Natur: Thermalquellen in tiefen Ozeanen

Technik: Zersetzung von Elektroschrott, und weiteren organischen Problemstoffen

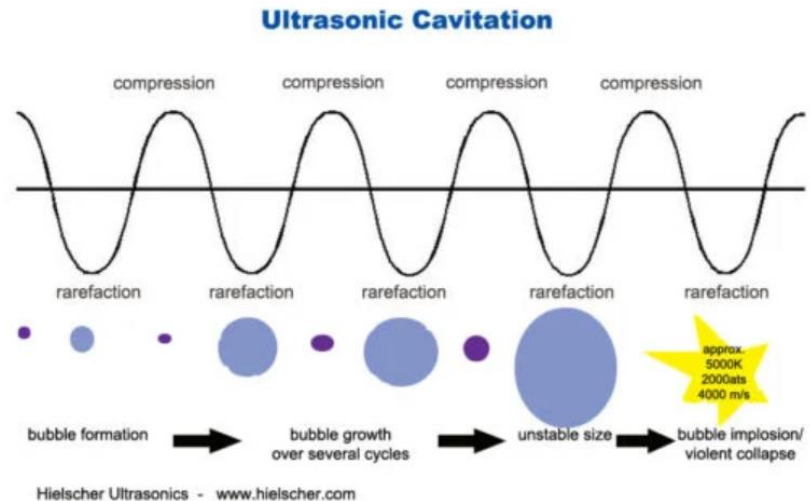


Physikalische Grundlagen

Kavitation

Beispiele:

- **Reinigung U-Schallbad**
- **Kavitation** v. a. bei Pumpen oder Laufrädern

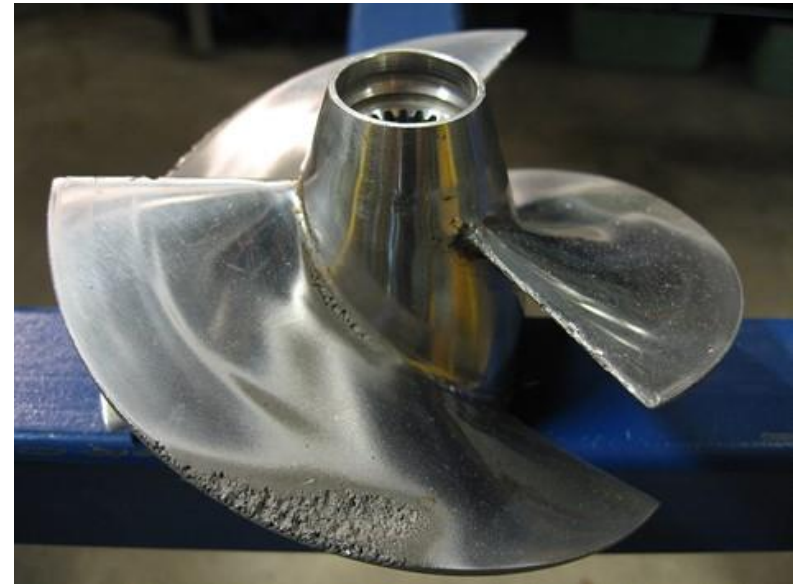


- **schnell wechselnde Druckverhältnisse**
- **geringerer Druck** → Verdampfungstemperatur niedriger (bei 23,37 mbar Verdampfung bei 20 °C) → Entstehung Wasserblasen (auch Problem bei Pumpen in großer Tiefe → Strömungsabriss)
- **höherer Druck** → Verdampfungsvorgang stoppt, Kondensation Wasserdampf an Außenwand der Dampfblase → schlagartiges Zusammenfallen der bereits gebildeten Dampfblasen

Physikalische Grundlagen

Kavitation Wasser

- im Wasser entstehen sehr starke – wenn auch kurzzeitige – **Druckstöße**, die Größenordnungen von mehreren 100 MPa annehmen können ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar} = 1 \text{ N/mm}^2$)
- Befinden sich die Dampfblasen in der Nähe einer festen Wand, z. B. den Laufradschaufeln → Flüssigkeitsstrahl (Mikrojet) **schlagartige Druckbelastung**
- **Materialabtragungen** beim Auftreten von Kavitation.

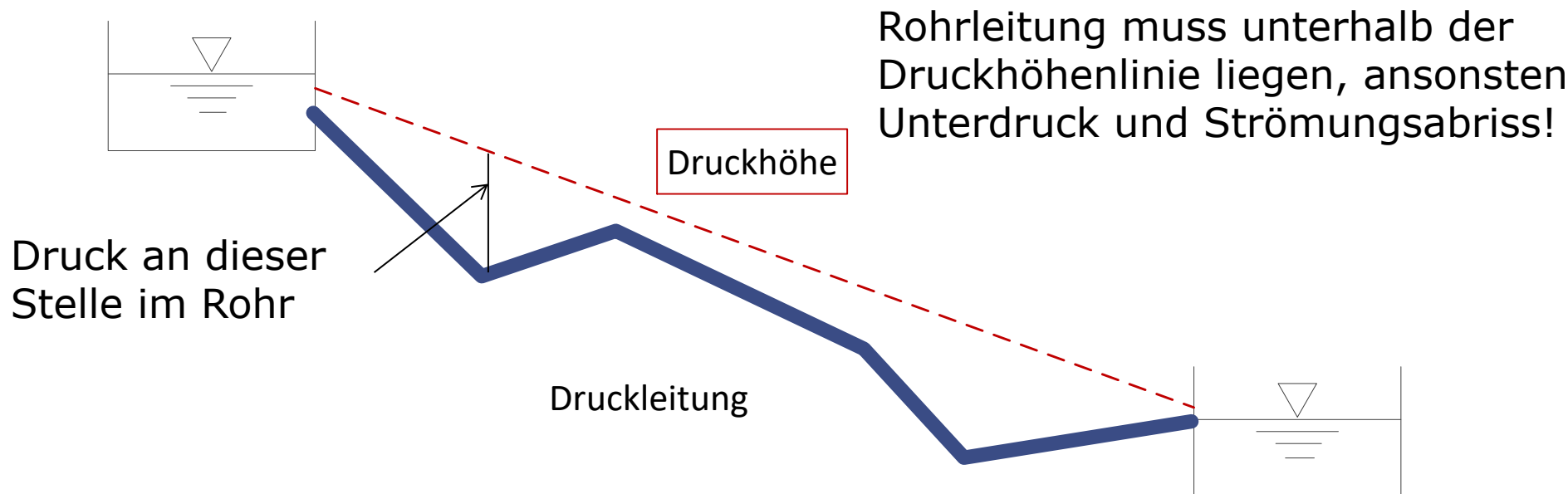


Physikalische Grundlagen

Dampfdruck Wasser

Beispiele Wasserwirtschaft:

- **Strömungsabriss:** bestimmt maximale Ansaughöhen (Saugpumpen)



Physikalische Grundlagen

Gase

Einschub Gase (nur Gasphase und ein Gas): Boyle Mariott'sche Gesetz (ca. 1670)

(gilt nur bei **idealen Gasen, konstanten Stoffmengen n und konstanter Temperatur T**):

Ideales Gasgesetz:

$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ mit Temperatur T, Gaskonstante R und Stoffmenge n

$$p = (n \cdot R \cdot T) \cdot 1/V \rightarrow p \cdot V = \text{const.}$$

Boyle Mariott'sche Gesetz

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Physikalische Grundlagen

Gase

Boyle Mariott'sche Gesetz (gilt nur bei idealen Gasen, konstanten Stoffmengen n und konstanter Temperatur):

Boyle Mariott'sche Gesetz

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

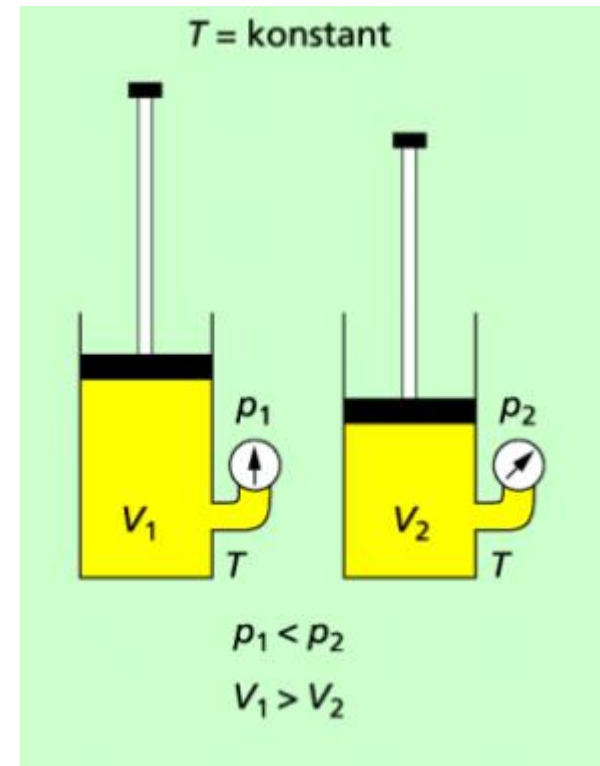
Beispiel Kompression Gas:

Ausgangszustand $p_1 = 1$ bar und

Volumen $V_1 = 300$ ml.

Welcher Druck p_2 bei Volumen V_2 von 100 ml?

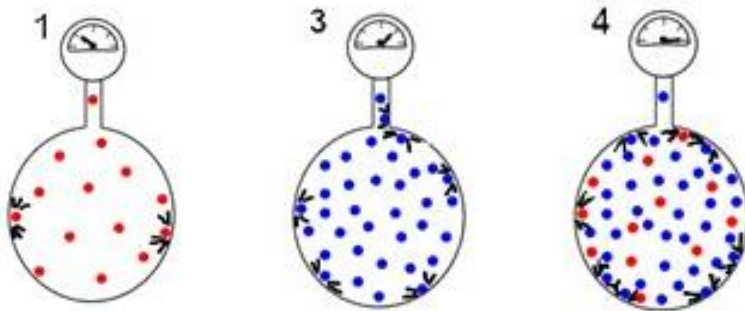
$$p_2 = (p_1 \cdot V_1) / V_2 = \\ (1 \text{ bar} \cdot 300 \text{ ml}) / 100 \text{ ml} = \mathbf{3 \text{ bar}}$$



Physikalische Grundlagen

Gase

Dalton'sche Gesetz (1801): **Gesamtdruck** p einer **Mischung aus idealen Gasen** ist gleich der Summe der **Partialdrücke** der einzelnen **Gaskomponenten** p_i .



$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots = \sum_i p_i$$

Der **Partialdruck eines Gases** (p_i) in einem **Gasgemisch** ist gleich seinem **Stoffmengenanteil** (x) multipliziert mit dem **Gesamtdruck des Gemisches** (p).

$$p_1 = x_1 \cdot p$$

$$p_2 = x_2 \cdot p$$

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Die **Löslichkeit von Gasen** in **Wasser** ist abhängig von der **Temperatur**, vom **Druck** und von **gelösten Feststoffen**.

- Je höher die **Temperatur**, desto **weniger Gase** lösen sich im Wasser.
- Je höher der **Druck**, desto **mehr Gase** lösen sich im Wasser (Druckunterschiede in der Natur: geringere Bedeutung, meist Atmosphärendruck)
- Ebenso wirken sich im Wasser **gelöste Stoffe** mindernd auf die Gaslöslichkeit aus. Deshalb ist beispielsweise in Meerwasser (gelöste Salze) weniger Sauerstoff löslich als in Süßwasser.
- Wichtige Gase in Wasser: **Sauerstoff O₂**, **Kohlendioxid CO₂**

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Übung: Löslichkeit im Alltag

Erklären sie den chemischen/physikalischen Sachverhalt hinter den folgenden Alltagsbeobachtungen

1. Fische können ersticken, wenn sich das Gewässer im Sommer sehr stark **erwärmt**.
2. Beim Öffnen einer **warmen** Soda-Flasche schäumt es stark.

Lösungen:

1. Bei höherer **Temperatur** ist die Löslichkeit von Sauerstoff O_2 geringer
2. Bei höherer **Temperatur** ist die Löslichkeit von CO_2 geringer

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Henry-Dalton-Gesetz:

Die Löslichkeit eines **Gases in einer Flüssigkeit** verhält sich bei gegebener **Temperatur** proportional zum **Partialdruck des Gases** über der Lösung.

Die Proportionalität wird ausgedrückt durch die **Henry-Konstante K_H**

HENRYsche Gesetz:

$$c(A_{fl}) = K_H \cdot p(A_{gas})$$

Henry-Konstante K_H

$$K_H [\text{mol/ l} \cdot \text{bar}] = c(A_{fl}) [\text{mol/ l}] / p(A_{gas}) [\text{bar}]$$

- $c(A_{fl})$ [mol/ l] Konzentration Gas A in wässriger Phase
- $p(A_{gas})$ [bar] Partialdruck des Gases A

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Diffusion: Austausch von Gasmolekülen zwischen Gasen und Flüssigkeiten

Dabei die Austauschprozesse der Moleküle und der Flüssigkeit proportional dem **Partialdruck des Gases** und der **Konzentration des Gases in der Lösung** (siehe Henry-Gesetz).

Sättigungskonzentration: dynamisches Gleichgewicht zwischen beiden Diffusionsrichtungen.

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Vergleich verschiedene Gase bei konstanter Temperatur von 25 °C

Je höher K_H desto geringer Flüchtigkeit (Auftreten in Gasphase)

Gas	Henry-Konstante K_H [$10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$] für $T = 25 \text{ °C}$
N_2	0,642
O_2	1,27
CH_4	1,34
CO_2	33,8
H_2S	102,2
NH_3	59.880,2

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

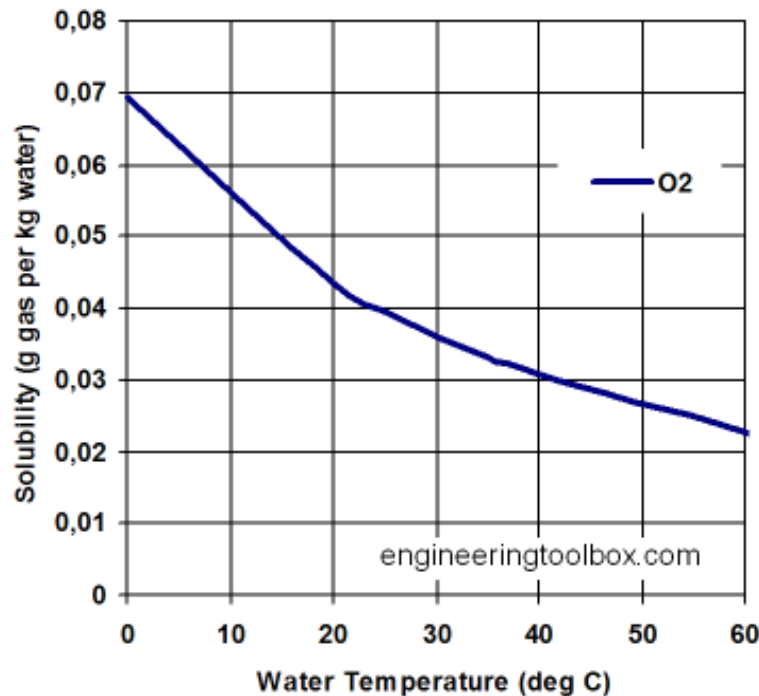
K_H stark abhängig von Temperatur; je höher die Temperatur desto geringer K_H desto höher die Flüchtigkeit (Auftreten in Gasphase)

	Stickstoff	Sauerstoff	Kohlendioxid
Temperatur [°C]	K_H von N_2 [mol/(m ³ ·bar)]	K_H von O_2 [mol/(m ³ ·bar)]	K_H von CO_2 [mol/(m ³ ·bar)]
0	1.047	2.153	75.43
5	0.927	1.999	62.70
10	0.828	1.674	52.57
15	0.750	1.504	44.87
20	0.691	1.366	38.66
25	0.646	1.247	33.42
30	0.603	1.148	29.28

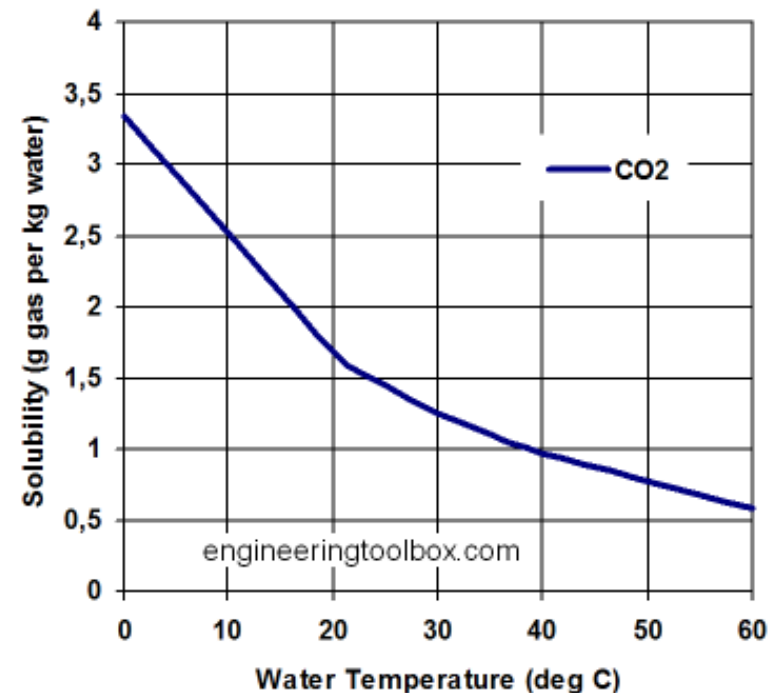
Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Sauerstoff



Kohlendioxid



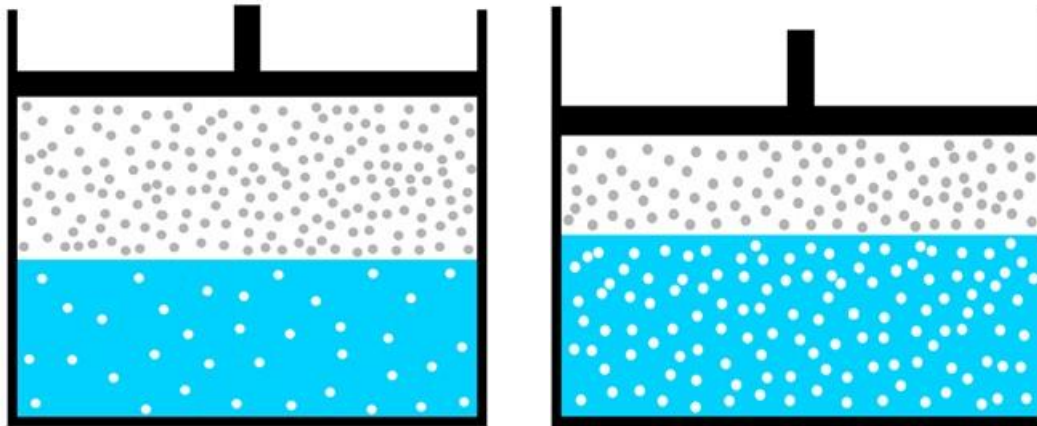
Löslichkeit Gas in g/ kg Wasser in Abhängigkeit von Temperatur

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Erhöhung des **Außendruck**s (hier durch Einpressen eines Kolbens rechts dargestellt) führt zu einem **geringerem Partialdruck $p(A_{\text{gas}})$ der Gasphase** und folglich zu einer höheren Konzentration des **Gases in der Flüssigkeit $c(A_{\text{fl}})$** .

→ Eintrag von **Sauerstoff**



HENRYsche Gesetz:

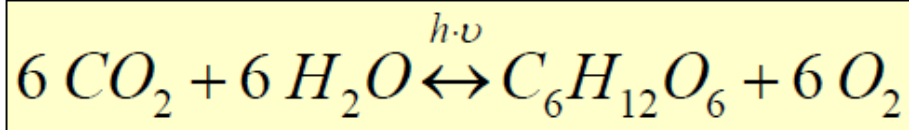
$$c(A_{\text{fl}}) = K_H \cdot p(A_{\text{gas}})$$

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Sauerstoff

- Eintrag **Sauerstoff** in Wasser aus Atmosphäre (20,9 Vol-%)
- Löslichkeit in Wasser: 11,2 mg/l bei 10 °C und 8,4 mg/l bei 25 °C

Bildung durch Photosynthese



Verbrauch durch biochemische Oxidation

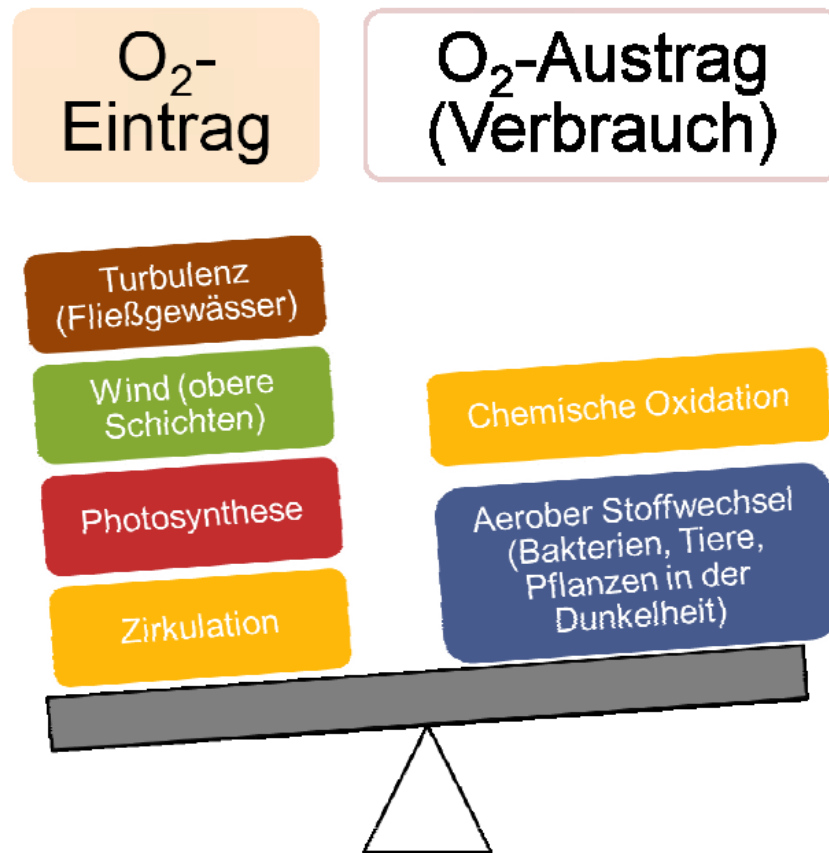
- Aerobe Atmung
- Nitrifikation (Abwassereinigung)

Bedeutung:

- Lebensgrundlage für fast alle Wasserorganismen
- starkes Oxidationsmittel (Korrosion)
- Abbau organische Stoffe in Gewässern (Selbstreinigung)

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Sauerstoff



Physikalische Grundlagen

Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Sauerstoff

Beeinträchtigungen Ökologie durch Rückgang Sauerstoff

- hohe **Temperaturen** (Kühlwassereinleitungen, 10°C auf 25°C)
- hohe **Salzfrachten** → Sättigungskonzentration kleiner (2022: Fluss Oder)
- **MKW** und **Tenside** → **Eintragshemmer** (Phasenübergang)
- **Abwasser Einleitungen** → zu starke O₂ Zehrung

Besonders relevant bei stehenden Gewässern (Seen)

- in **Stagnationsphasen** Verhinderung Stofftransport
- hohe Konzentration an Oberfläche
- Gewässergrund: vermehrt anaerobe Zustände. Rücklösung Phosphor und Eisen und andere Metalle

→ **Seen „kippen um“, kein Sauerstoff**

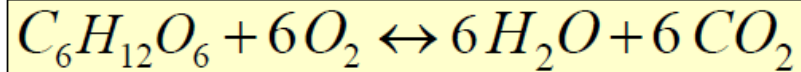
Physikalische Grundlagen

Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Kohlendioxid

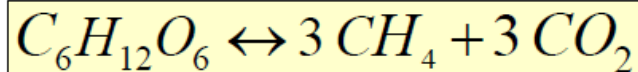
- Eintrag **Kohlendioxid (CO₂)** in Wasser aus Atmosphäre (ca. 0,035 Vol-%)
- Löslichkeit in Wasser: 0,81 mg/l bei 10 °C und 0,52 mg/l bei 25 °C
- unter hohem Druck bessere Löslichkeit (Sprudelwasser)

Bildung durch biochemische Abbauprozesse

aerobe Atmung:



Gärung:



Verbrauch:

- Photosynthese, Carbonatbildung

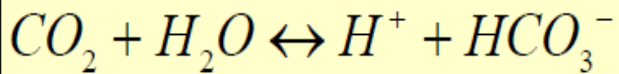
Bedeutung:

- Oberflächengewässer: geringere Konzentrationen
- Unterirdisches Grundwasser: mehrere hundert mg/l

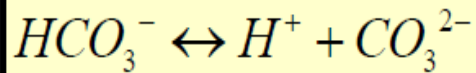
Physikalische Grundlagen

Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Kohlendioxid

In Wasser steht CO_2 („Kohlensäure“) mit Dissoziationsprodukten im GG



$$pK_{s1} = 6,3$$

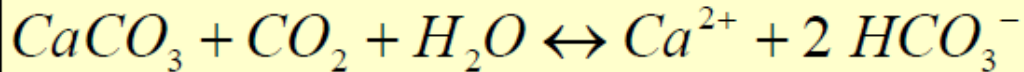


$$pK_{s2} = 10,3$$

CO_2 dominiert nur bei sauren pH Werten

Bedeutung:

Kalk-Kohlensäure-GG : Auflösung/Ausfällung von Calcit
(Calciumcarbonat)



Zugehörige KS: Konzentration um HCO_3 in Lsg zu halten (KKG)
Überschüssige KS: Korrosion von Beton und Metall (TW-Leitungen)

Physikalische Grundlagen

Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Kohlendioxid

Der *pH*-Wert des Regenwassers wird bestimmt durch die Auflösung von CO_2 .

Geg.: **Partialdruck $p \text{ CO}_2$**

$$p(\text{CO}_2) = 0,00035 \text{ bar}$$

$$pK_{s1} = 6,3 \quad (25^\circ\text{C})$$

Henry Konstante

$$H(\text{CO}_2) = 33,42 \text{ mol}/(\text{m}^3 \text{ bar})$$

Lsg.:

Henry Gesetz

$$c(\text{CO}_2) = p(\text{CO}_2) H(\text{CO}_2)$$

Konzentration CO_2 in Regenwasser

$$c(\text{CO}_2) = 0,012 \text{ mol}/\text{m}^3 = \underline{1,17 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}}$$

$$K_{s1} = \frac{c(\text{H}^+) c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{CO}_2)}$$

$$c(\text{H}^+) = c(\text{HCO}_3^-) \quad K_{s1} = \frac{c^2(\text{H}^+)}{c(\text{CO}_2)}$$

$$c(\text{H}^+) = \sqrt{K_{s1} \cdot c(\text{CO}_2)} = \sqrt{5,01 \cdot 10^{-7} \text{ mol/L} \cdot 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}} = 2,42 \cdot 10^{-6}$$

$$\boxed{pH = -\lg c(\text{H}^+) = 5,62}$$

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Gasaustausch, Anwendung

- **Austrag/ Entfernung von unerwünschten Gasen** aus dem Wasser
- **Eintrag von Gasen** wie z.B. Sauerstoff für Oxidationsprozesse (Kläranlagen)

Stofftransportprozesse: Moleküle des auszutauschenden Stoffes gehen von einer Phase in die andere über → Gleichgewicht (Sättigungskonzentration)

intensiver Stoffaustausch bei:

- **Turbulenz** der Strömungen und große Phasengrenzfläche (z.B. Eintrag von O_2 in Flüsse)
- Beeinflussung durch entsprechenden äußeren **Energieeintrag** (z.B. Eintrag von O_2 bei Abwasserreinigung)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

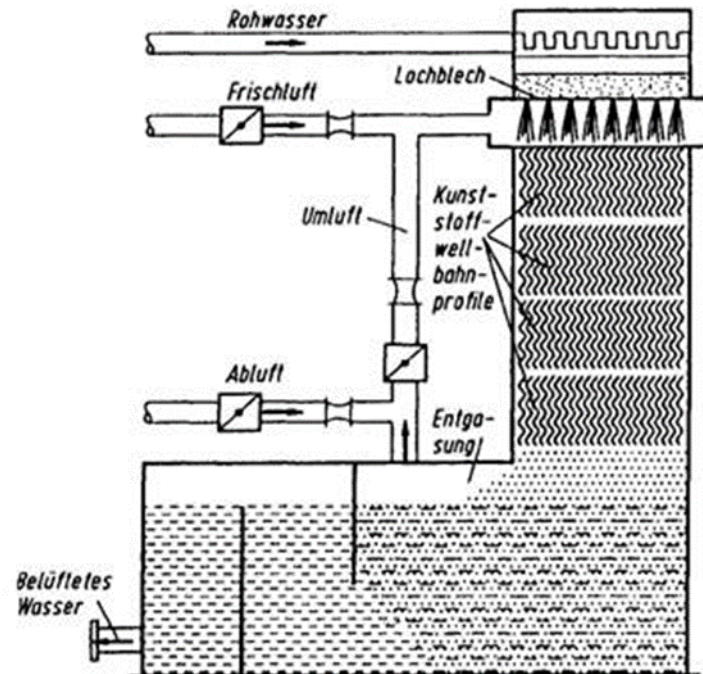
Gasaustausch, Anwendung

- **Eintrag** von Sauerstoff (für Oxidationsprozesse z.B. Enteisenung, Entmanganung)
- **Eintrag von Sauerstoff** für aerobe biologische Prozesse
- **Austrag von Kohlendioxid:** Physikalische Entsäuerung von Trinkwasser (Entfernung von CO_2 , Kohlensäure)
- **Austrag von Störgasen** (Schwefelwasserstoff, geruchs- und geschmacksbildenden Stoffe, Schadstoffe etc.)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Gasaustausch, Anwendung

- **Austrag Gas:** Erzeugung eines Flüssigkeitsfilmes mit **großer Oberfläche** (z.B. in einer Wellbahnkolonne) durch Verrieselung



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Gasaustausch, Anwendung

- **Austrag Gas:** Erzeugung von Flüssigkeitstropfen mit einer großen spezifischen Oberfläche und gleichmäßigem Versprühen oder Verrieseln der Tropfen in einem Gasraum (Verdüsung, Riesler)



<https://evl-erleben.de/energie-wasser/wasserhaerte/>



Wasserwerk Leverkusen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Gasaustausch, Anwendung

- **Austrag Gas: Strippanlagen:** Entfernung von **chlorierten Kohlenwasserstoffen CKW (Chloroform)**, **aromatischen Kohlenwasserstoffen BTX (Benzol)** und **Methyl-tertiär-Butylether (MTBE)** aus dem **Grundwasser**.
- Verrieselung über Füllkörper; von unten wird Luft entgegen geblasen. Die leichtflüchtigen Lösemittel gehen vom Wasser in die Luft über.
- Je größer der zu reinigende Volumenstrom, desto größer der Durchmesser der Strippanlage. Je größer die Schadstoff-Belastung, desto länger ist die Kolonne.

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Gasaustausch, Anwendung



- 30 m³/h-Strippanlage, einstufig zur Grundwasser-Reinigung
- CKW-Schadensfall in einem metallverarbeitenden Betrieb
- Provisorische Aufstellung beim Pumpversuch
- Ableitung des gereinigten Wassers in einen Sickerteich

[GUT Gesellschaft für Umwelttechnologie mbH]

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Gasaustausch, Anwendung

- **Eintrag Gas: Erzeugung von Gasblasen** mit einer großen spezifischen Oberfläche und gleichmäßiger Verteilung der Gasblasen im Flüssigkeitsvolumen (z.B. Flachbettbelüfter)



aerobe Atmung:

