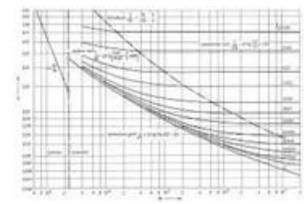
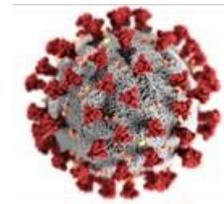
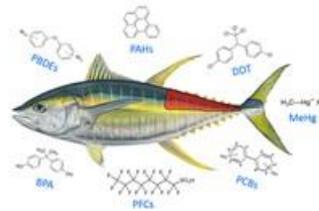
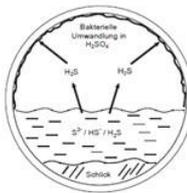
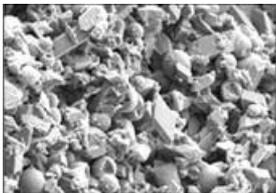


# Bachelor Infrastruktur

## Vorlesung und Übung: Naturwissenschaftliche Grundlagen

Prof. Dr. Welker, Frankfurt University of Applied Sciences



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Einführung

### Unit: wissenschaftliches Arbeiten

- **Hausarbeit:** Themenverteilung erfolgt
- **Sprechstunden** bei Frau Dierschke (Gliederung und Schwerpunkte besprechen....) Termine in campus, vorab mail zur Terminfindung abschicken (Urlaub Frau Dierschke bis 3. Dezember 2024)
- **Abgabe der Hausarbeit: 8. Januar 2025** per mail an [antje.welker@fb1.fra-uas.de](mailto:antje.welker@fb1.fra-uas.de)
- Hinweise zur **Hausarbeit**
  - Hausarbeit ist Teil der Prüfung und wird benotet (50 %, davon 1/3 Vortrag und 2/3 schriftliche Ausarbeitung)
  - mindestens 3 Literaturstellen verwenden
  - 2.000 – 2.500 Wörter bzw. 5 - 6 Seiten reiner Text (Wörter Literaturverzeichnis, Inhaltsangabe, Abbildungsunterschriften sowie Abbildungen und Tabellen zählen nicht)
- **Präsentation:** pro Gruppe 20-25 min (ca. 10 min pro Person) im **Januar 2025**

# 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 Veranstaltungen)
- **2. Grundlagen Chemie** (Atome, Elemente, Phasen, Verbindungen, Bindungsformen, chemische Reaktionen, elektrolytische Dissoziation, Redoxreaktionen – Schwerpunkt Wasser (ca. 4-5 Veranstaltungen)
- **3. Grundlagen Biologie** (Mikroorganismen, Stoffwechsel, biologische Bestimmungsmethoden, Ökotoxikologie) (ca. 1-2 Veranstaltungen)

# 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)

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

- $\rho$  („klein Rho“)
- Quotient aus **Masse** und **Volumen**

# Physikalische Grundlagen

## Dichte (spezifische Masse)

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

# Physikalische Grundlagen

## Dichte (spezifische Masse) Metalle

### ▪ Dichte **Gold**

- Goldwürfel mit Seitenlänge 3 cm  $\rightarrow V = (3 \text{ cm})^3 = 27 \text{ cm}^3$ ;  
Masse: **520 g**
- Gesucht: **Dichte** =  $m / V$  mit  $\rightarrow 520 \text{ g} / 27 \text{ cm}^3 = \mathbf{19,3 \text{ g} / \text{cm}^3}$

### ▪ Dichte **Messing** (Legierung Kupfer und Zink)

- Dichte =  $m / V$  mit  $V = (3 \text{ cm})^3 = 27 \text{ cm}^3$ ; **Dichte  $8,5 \text{ g} / \text{cm}^3$**
- $\rightarrow$  Masse =  $27 \text{ cm}^3 * 8,5 \text{ g} / \text{cm}^3 = \mathbf{229,5 \text{ g}}$

**$\rightarrow$  Fälschungsnachweis: Masse geringer bei gleichem Volumen!**



**Zum Vergleich:**

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

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

# Physikalische Grundlagen

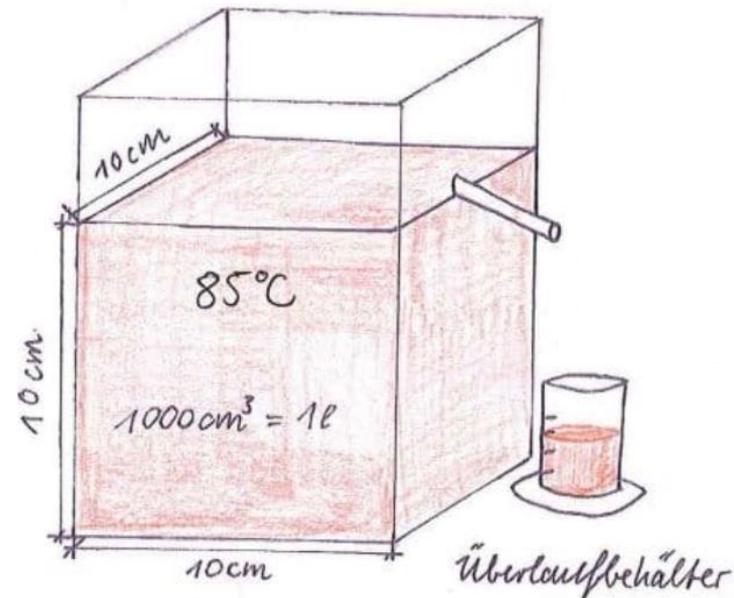
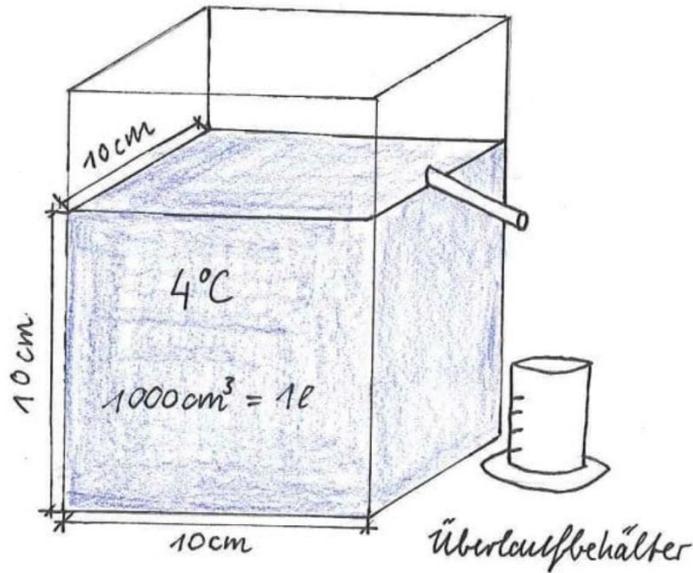
## Dichte (spezifische Masse) Wasser

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

- **Dichte Wasser:** Hinreichend genau für die meisten Berechnungsfälle: **1.000 kg/m<sup>3</sup> oder 1 g/cm<sup>3</sup>**
- abhängig von **Temperatur** und **Druck**
- abhängig von **Salz-** und **Feststoffgehalt**
- **Dichtemaximum Wasser** (minimales Volumen) **bei 4°C** → **Anomalie** des („Süß-“)Wassers

# Physikalische Grundlagen

## Dichte Wasser/ Anwendung Heizung



**Dichte (4°C)** = m/ V =  
1.000 g/ 1.000 cm<sup>3</sup> =  
**1,0 g/cm<sup>3</sup>**

**Dichte (85°C)** = m/ V = 968,61 g/ 1.000 cm<sup>3</sup> =  
**0,968 g/cm<sup>3</sup>**

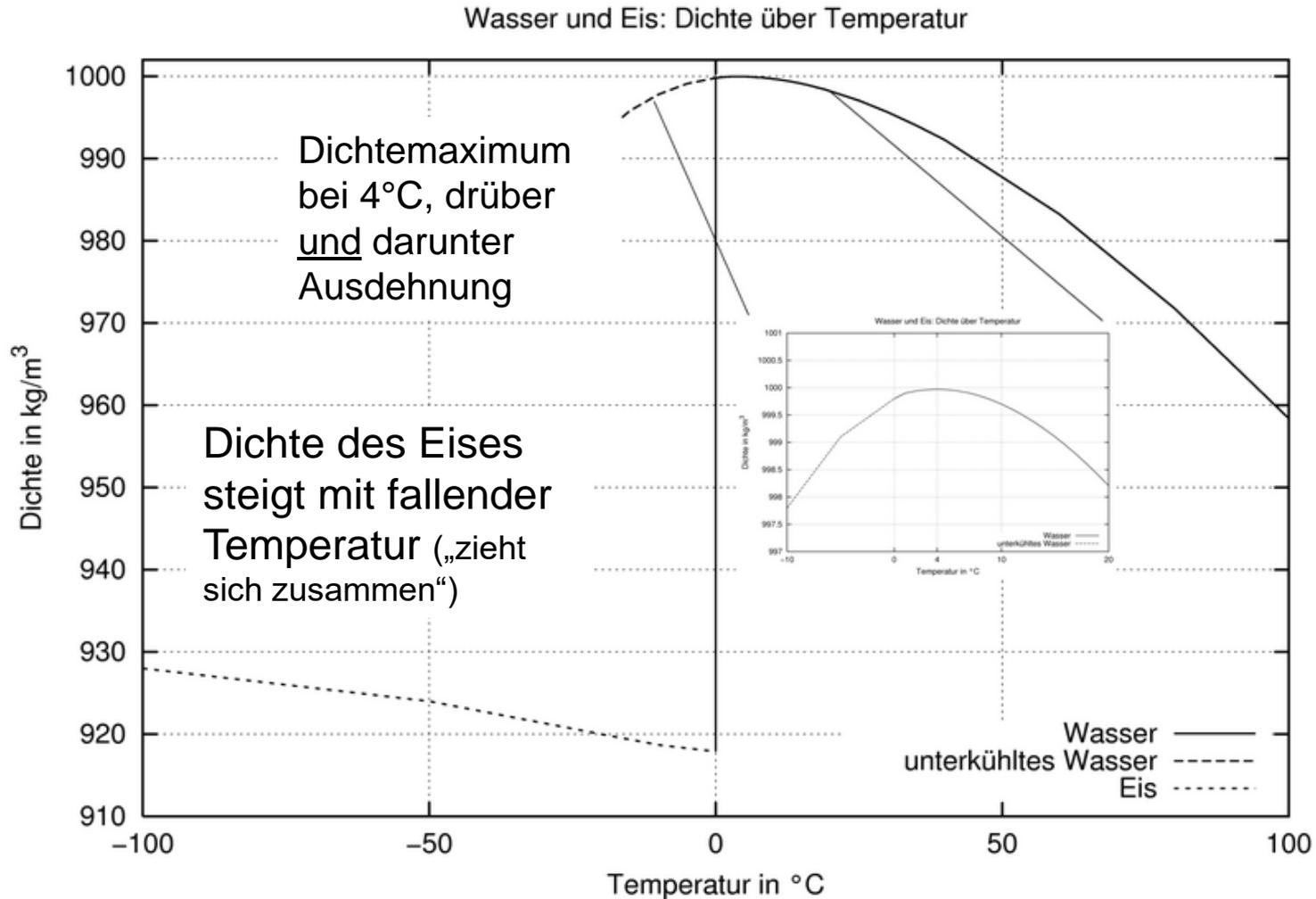
**Überlaufmasse** : 1.000 g – 968,61 g = **31,39 g**

**Überlaufvolumen**: V = m/ Dichte =  
31,39 cm<sup>3</sup>/ 0,968 g/cm<sup>3</sup> = **32,41 cm<sup>3</sup>**

→ wichtig Auslegung Heizung (Ausdehnungsgefäß)!

# Physikalische Grundlagen

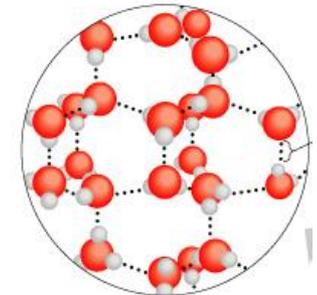
## Dichteanomalie Wasser



# Physikalische Grundlagen

## Dichteanomalie Wasser

- **Temperatur unter 4° Celsius:** Wassermoleküle bilden geordnete **Kristalle** (Sechsecke) → das Volumen nimmt wieder zu → **Dichte von Eis** geringer als Wasser → Eis schwimmt
- **Temperatur über 4° Celsius:** Verhalten Wasser wie andere Flüssigkeiten.



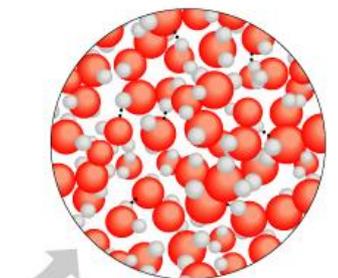
ICE  
Stable hydrogen bonds  
HEXAGONAL

©1999 Addison Wesley Longman, Inc.

**Temperaturverringierung:** Die Moleküle rücken näher zusammen → Abnahme Volumen

### Temperaturerhöhung:

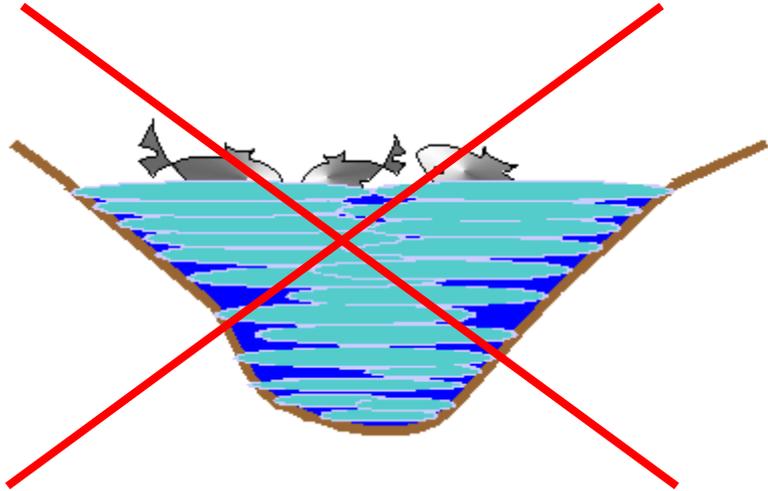
- Wassermoleküle bewegen sich schneller und brauchen mehr Platz. Anzahl der Moleküle mit **Wasserstoffbrückenbindungen** nehmen ab (ca. 100 Moleküle bei 4°C auf ca. 5 bei 90 °C).
- Ausdehnung Flüssigkeit mit zunehmender Temperatur



LIQUID WATER  
Hydrogen bonds  
constantly break and re-form  
CUBIC

# 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
- Ein **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
  - Dabei baut sich ein **Kristallisationsdruck** auf, der zu Abplatzungen an der Betonoberfläche führen kann.
  - Die **Frostschäden** („Ausfrieren“) sind allein in Deutschland mit **mehreren hundert Millionen Euro** pro Jahr zu beziffern.



# Physikalische Grundlagen

## Dichte (spezifische Masse) Wasser

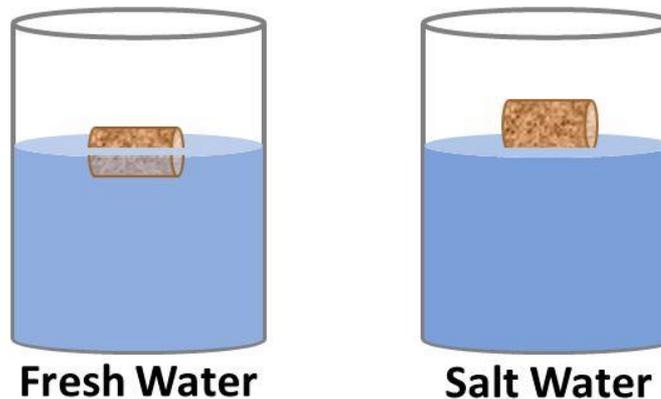
	$\rho$ [ kg/m <sup>3</sup> ]
Reines Wasser bei 4 °C (minimales Volumen)	1000 (999,84)
Reines Wasser bei 30 °C (Volumenvergrößerung um 0,54%)	995
Reines Wasser als Eis (Volumenvergrößerung um rd. 10%)	910
Nordseewasser mit 35‰ Salzgehalt	1026
Ostseewasser mit 9,4‰ Salzgehalt	1007
Flußwasser mit starkem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

- Abhängigkeit vom **Salzgehalt**: hoher Salzgehalt → höhere Dichte
- Abhängigkeit vom **Schwebstoffgehalt**: hoher Schwebstoffgehalt → höhere Dichte
- Hinreichend genau für die meisten Berechnungsfälle: **1.000 kg/m<sup>3</sup>**

# Physikalische Grundlagen

## Dichte (spezifische Masse) Wasser

- **Auftrieb**  $F_A$  (Schiffe, Schwimmer) in **Salzwasser** (Dichte bis 1.026 kg/m<sup>3</sup>) höher als in **Süßwasser** (ca. 1.000 kg/ m<sup>3</sup>)
- **Auftrieb** abhängig von **Dichte der verdrängten Flüssigkeit**,
- bei Salzwasser höher → mehr Auftrieb;
- bei Süßwasser sinkt Schiff stärker ein!







# Physikalische Grundlagen

## Oberflächenspannung Wasser

**Oberflächenspannung  $\sigma$**  (auch: spezifische Oberflächenenergie):  
Quotient aus Arbeit  $W$  zur Veränderung der Oberfläche und  $\Delta A$

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

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

Die **Oberflächenspannung von Wasser ist hoch** und **nimmt mit steigender Temperatur ab!**

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 <sub>2</sub> O	72,9
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	22,4
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	28,9



# Physikalische Grundlagen

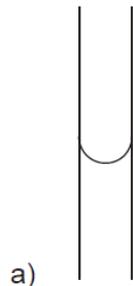
## Oberflächenspannung Wasser

**Kapillarität:** Aufsteigen Flüssigkeit, wenn Gewinn an Energie vorliegt

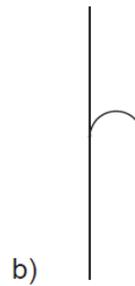
**Höhe der Flüssigkeit  $h$**  abhängig von **Oberflächenspannung  $\sigma$** , **Dichte** und **Radius der Kapillare  $r$**  (je enger, desto höher steigt das Wasser)

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

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



Adhäsionskräfte > Kohäsionskräfte  
z.B. Wasser



Adhäsionskräfte < Kohäsionskräfte  
z.B. Quecksilber

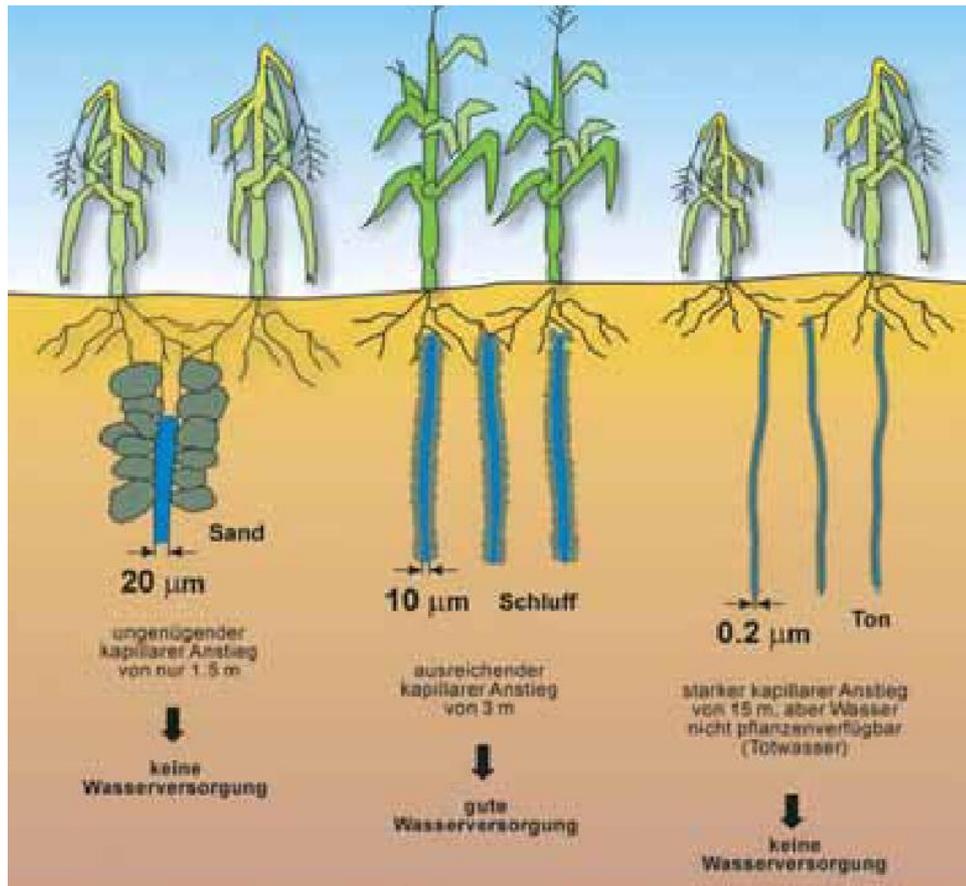


Abbildung 6.7 Wechselspiel zwischen Adhäsions- und Kohäsionskräften in engen Röhren  
a) konkave Oberfläche, b) konvexe Oberfläche

# Physikalische Grundlagen

## Oberflächenspannung Wasser

Große Bedeutung für Prozesse in Fauna/ Flora (Transport von Wasser durch **Kapillarkräfte** in die Blattkronen 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)

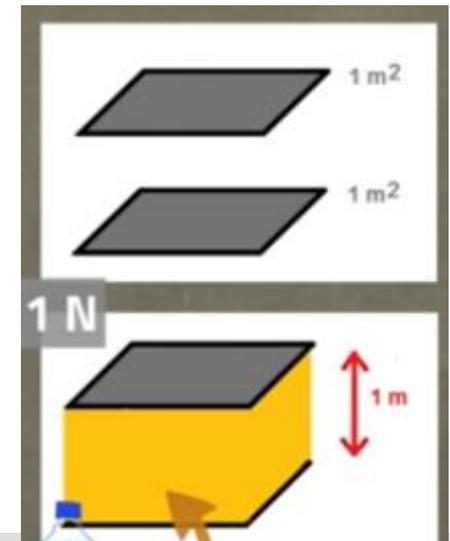




# Physikalische Grundlagen

## Viskosität Wasser

- **dynamische Viskosität  $\mu$  oder  $\eta$  („Eta“)** auch: innere Reibung
- **Einheiten:** [mPa\*s] oder [Pa\*s] oder [N\*s/m<sup>2</sup>] oder [kg/m\*s]
- mit Druck  $p$  [Pa] = Kraft  $F$  [N] / Fläche [m<sup>2</sup>]
- und Kraft  $F$  [N] =  $m$  [kg] \*  $a$  [m/s<sup>2</sup>]
  
- Fähigkeit einer Flüssigkeit zu fließen.  
Reibungswiderstand von Molekülen bei gegenseitiger Verschiebung parallel liegender Schichten
  
- 1 N\*s/m<sup>2</sup>: man braucht 1 N, um Platten von 1 m<sup>2</sup> und Abstand 1 m zu verschieben mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s



# Physikalische Grundlagen

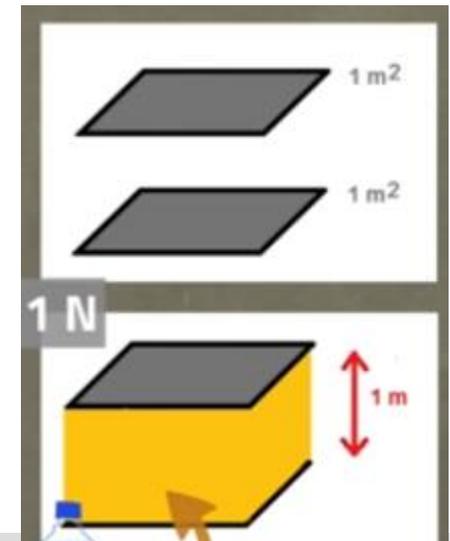
## Viskosität Wasser

**kinematische Viskosität  $\nu$  („Ny“)** in  $[\text{m}^2/\text{s}]$

**Umrechnung über Dichte:**

**dynamische Viskosität  $\eta$**   $[\text{kg}/\text{m}^*\text{s}] =$

**kinematische Viskosität  $\nu$**   $[\text{m}^2/\text{s}] * \mathbf{Dichte}$   $[\text{kg}/\text{m}^3]$



# 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:	$\eta = 0,647$	mPa·s (20°C)
Blut:	$\eta = 3-25$	mPa·s (37°C)
Schweröl:	$\eta = 30$	mPa·s (50°C)
Honig:	$\eta = 10.000$	mPa·s (20°C)



# Physikalische Grundlagen

## Viskosität Wasser

- Viskosität des **Wassers** nimmt mit ansteigender **Temperatur ab (bei Gasen umgekehrt)**:
  - $\eta$  (40°C) = 0,656 mPa·s
  - $\eta$  (60°C) = 0,469 mPa·s
  - $\eta$  (100°C) = 0,282 mPa·s
  - **Grund: Wasserstoffbrückenbindungen** werden schwächer...
- Große Bedeutung der **kinematischen Viskosität  $\nu$**  bei der **Auslegung von Rohrleitungen** (Darcy-Weisbach-Gleichung: Lambda  $\lambda$  abhängig von Viskosität)  
→ G7 Grundlagen der Wasserwirtschaft

		Viskosität	
Temperatur $\delta$	Dichte $\rho$	dynamische $\eta$	kinematische $\nu$
°C	kg/m <sup>3</sup>	kg/ms	m <sup>2</sup> /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
- bei **Gasen sehr signifikant** und wichtig, bei **Wasser eher klein**

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

# Physikalische Grundlagen

## Kompressibilität Wasser

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



# Physikalische Grundlagen

## Wärmekapazität Wasser

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

C: Wärmekapazität, in kJ/(kg·K)

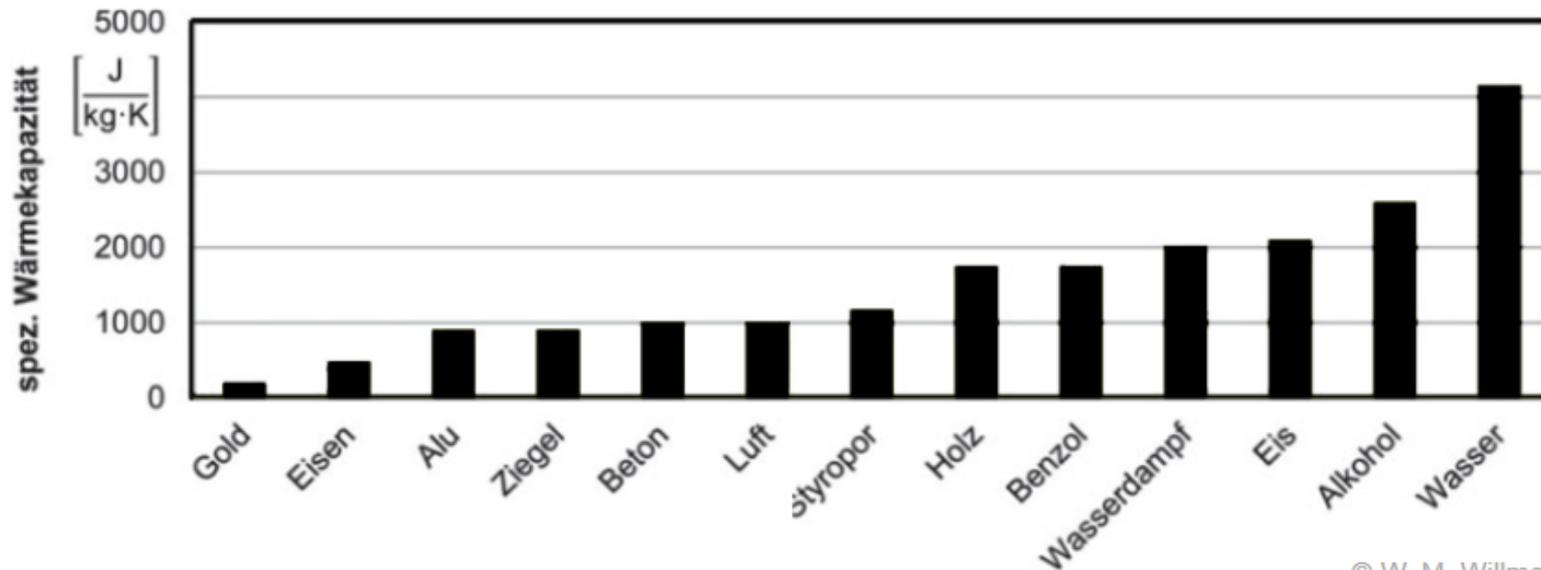
Q: Energieeintrag zur Erhöhung Temperatur in kJ/kg

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, bei 20°C

# 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 Pufferwirkung um Wärmeveränderungen auszugleichen



# Physikalische Grundlagen

## Physikalische Kenngrößen Wasser

### Oberflächenspannung

### Viskosität

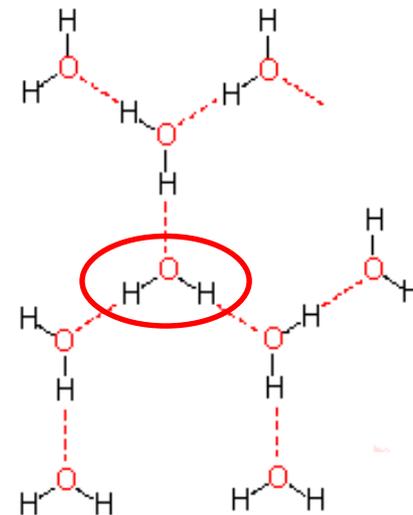
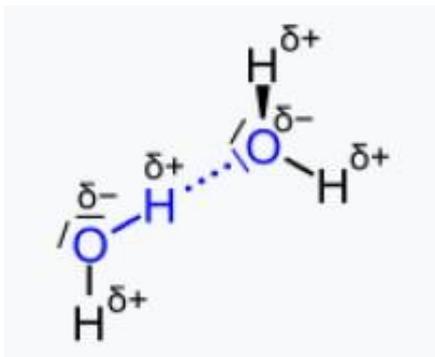
### Kompressibilität

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

# Physikalische Grundlagen

## Physikalische Kenngrößen Wasser

- Permanenter Dipol: **Wasserstoffbrückenbindungen** (mehrere sog. intermolekulare Bindungen pro Molekül)
- **max. Dichte bei 4 °C**
- hohe **Wärmekapazität**
- hohe **Oberflächenspannung** und **Viskosität**
- sehr geringe **Kompressibilität**





# Physikalische Grundlagen

## Aggregatzustand

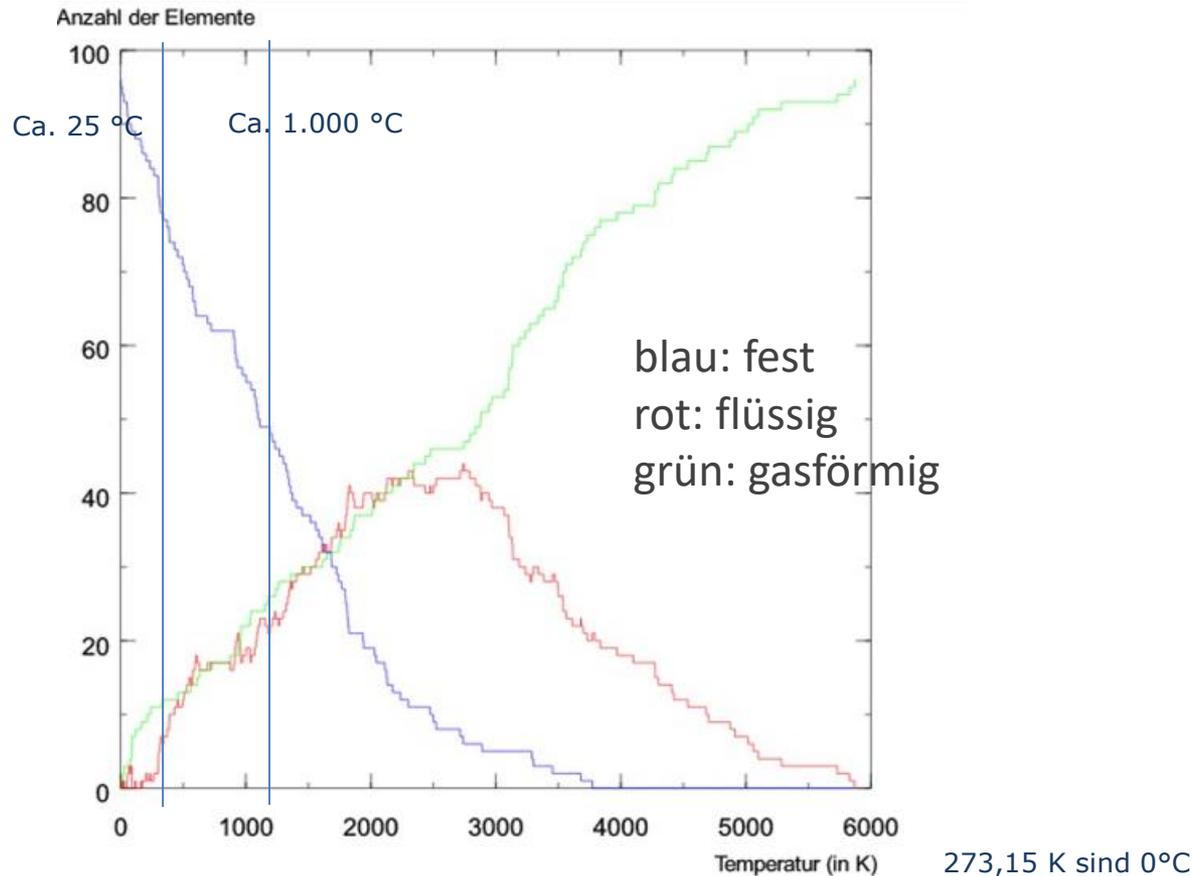
- **fest:** In diesem Zustand behält ein Stoff meist sowohl Form als auch Volumen bei.
- **flüssig:** Volumen weitgehend konstant, aber die Form ist unbeständig und passt sich dem umgebenden Raum an.
- **gasförmig:** ein Gas füllt den zur Verfügung stehenden Raum vollständig aus, ein Gas ist kompressibel,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

zusammenfassender Begriff für feste und flüssige Stoffe:  
**kondensierte Materie.**

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

# Physikalische Grundlagen

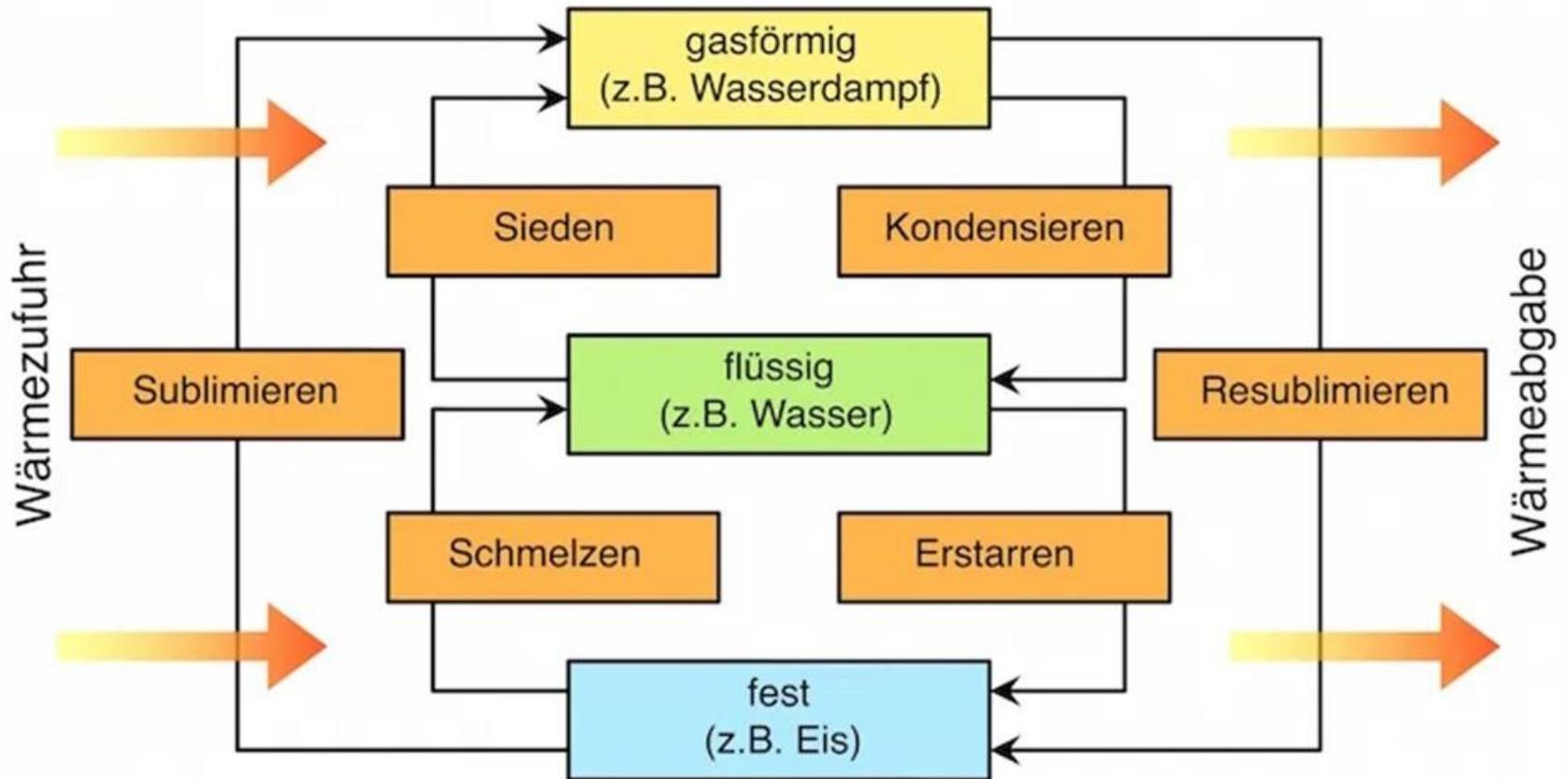
## Aggregatzustand



Temperaturabhängige Häufigkeit der Aggregatzustände der Elemente

# Physikalische Grundlagen

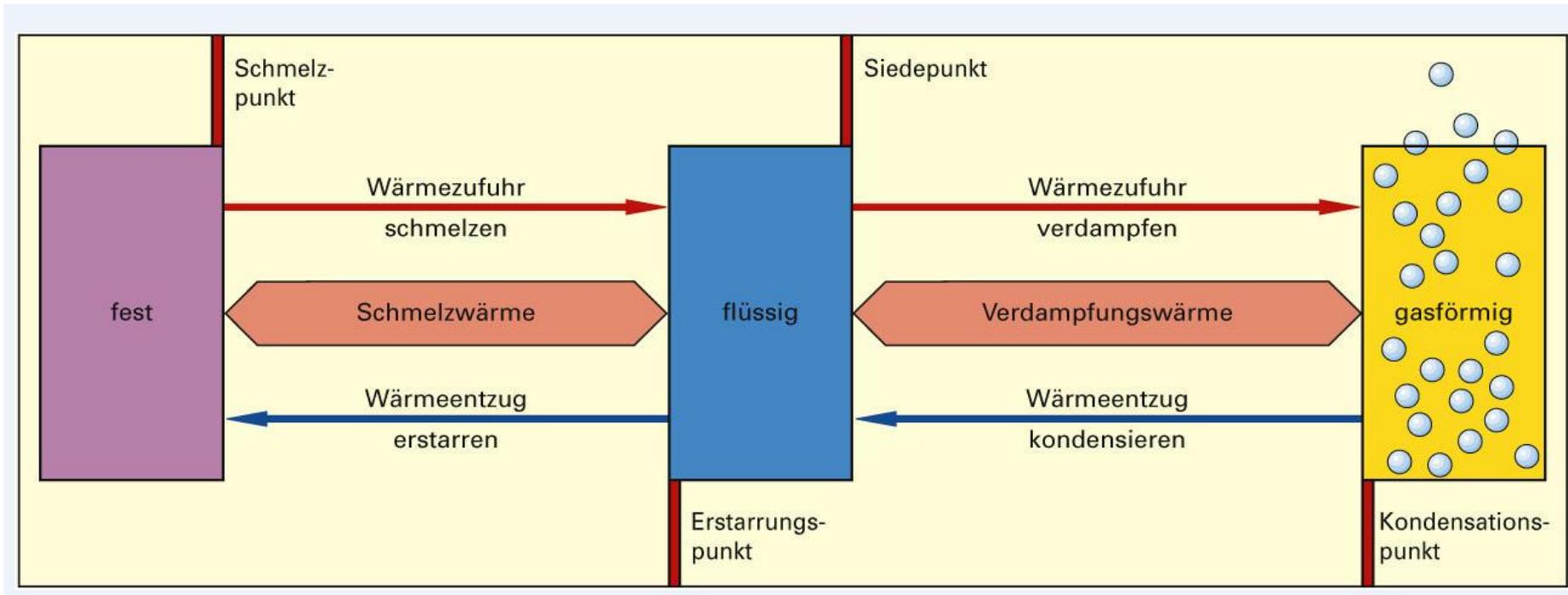
## Aggregatzustand



<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

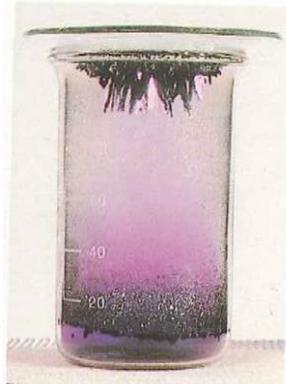
# Physikalische Grundlagen

## 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  $\text{CO}_2$  von fest nach gasförmig  
Sichtbar: Kondensation Wassermoleküle)



# Physikalische Grundlagen

## Aggregatzustand/ Wasser

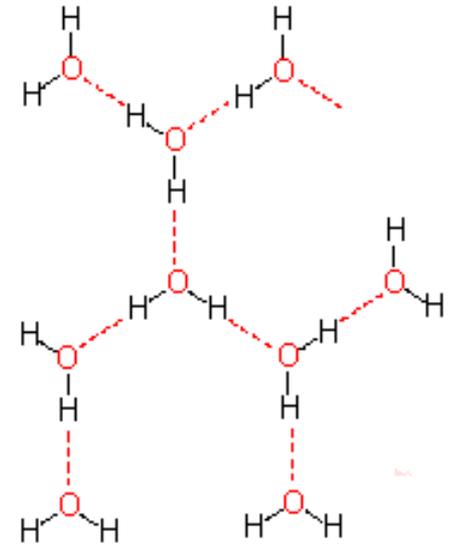
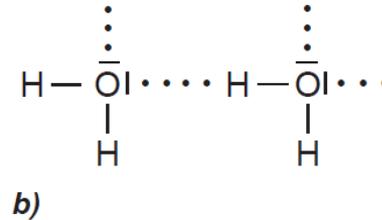
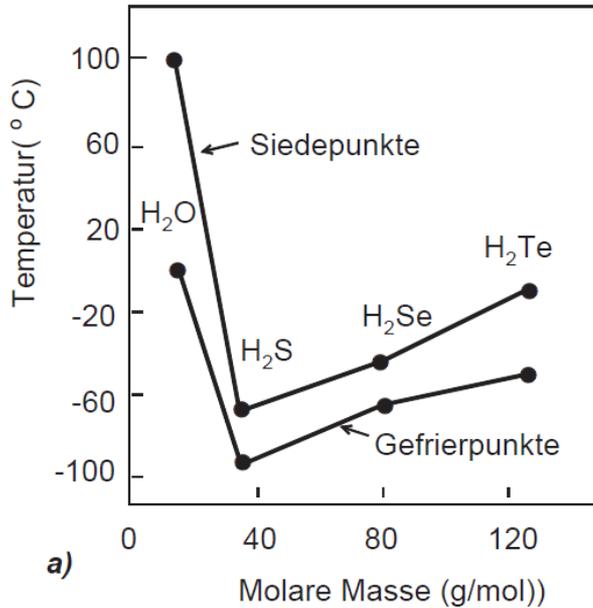


Abbildung 6.1

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

Wasser bei „normalen“ Temperaturen flüssig, wegen **Wasserstoffbrückenbindungen!**

Ohne diese wäre der Siedepunkt bei  $-75\text{ °C}$

→ kein Wasser auf unserem Planeten

# Physikalische Grundlagen

## Aggregatzustand

- **feste 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.



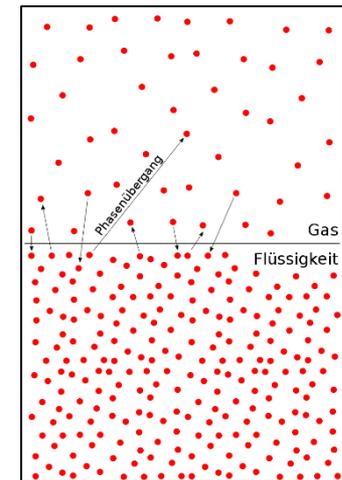


# Physikalische Grundlagen

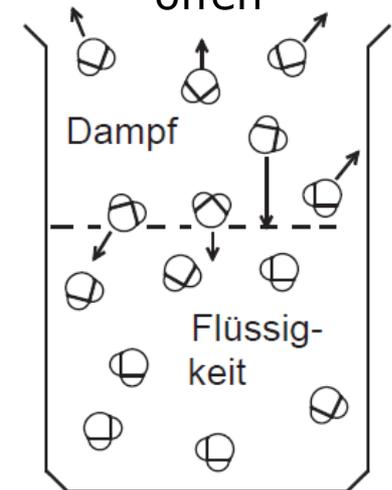
## Dampfdruck

- **Annahme:** Gleichgewicht zwischen **Flüssigkeit** und **Dampf** im 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

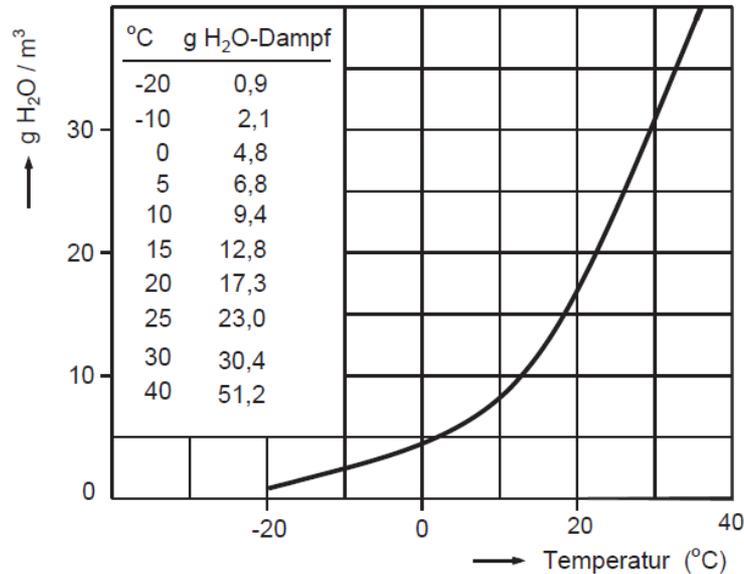


offen

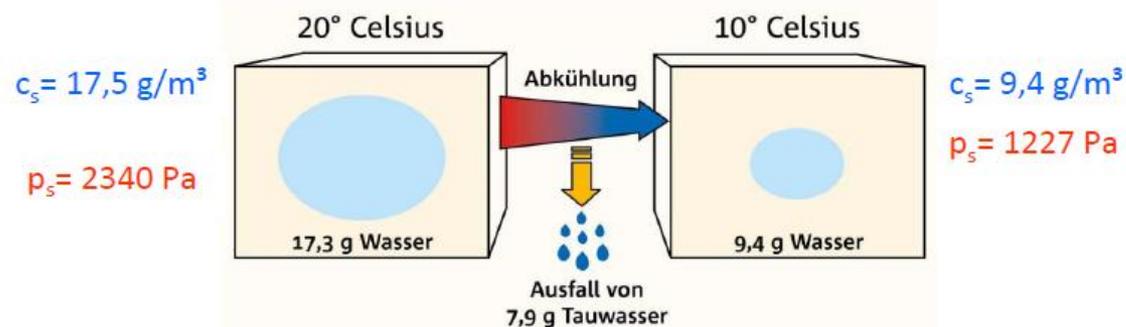


# Physikalische Grundlagen

## Dampfdruck Wasser



- Je höher die **Temperatur** desto mehr **Wasserdampf** (g H<sub>2</sub>O-Dampf) in **Atmosphäre**
- Bei **Abkühlung** entsteht **Tauwasser** (Ursache von vielen Feuchteschäden an Gebäuden)



# Physikalische Grundlagen

## Dampfdruck Wasser

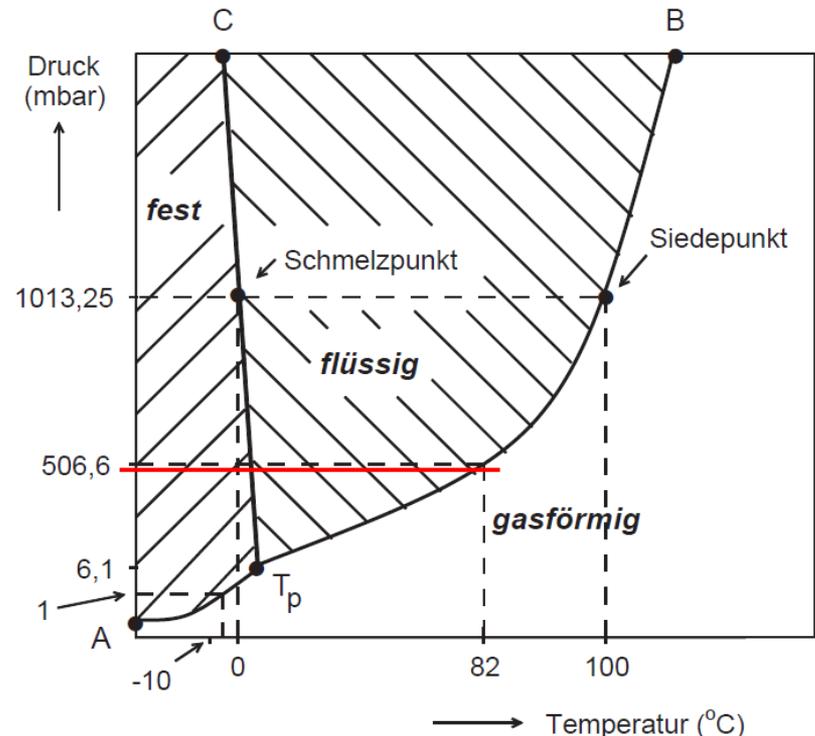
**Siedepunkt:** Temperatur, bei der der Dampfdruck einer Flüssigkeit den Wert des **äußeren Atmosphärendrucks** erreicht hat.

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

**Verdampfungstemperatur.**

**Luftdruck** (506 mbar) nimmt mit zunehmender **Höhe ab. 5.000 m** über NN → Luftdruck ca. 50% des Drucks auf Meereshöhe (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)**

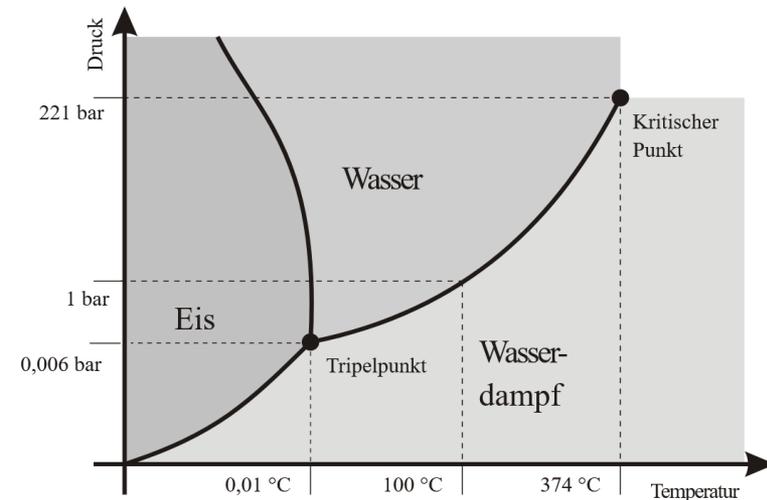
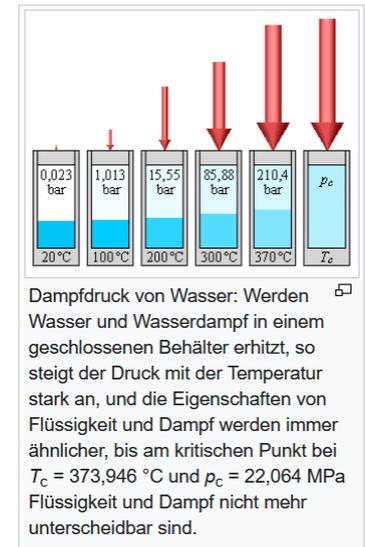
Oberhalb des kritischen Punktes:

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

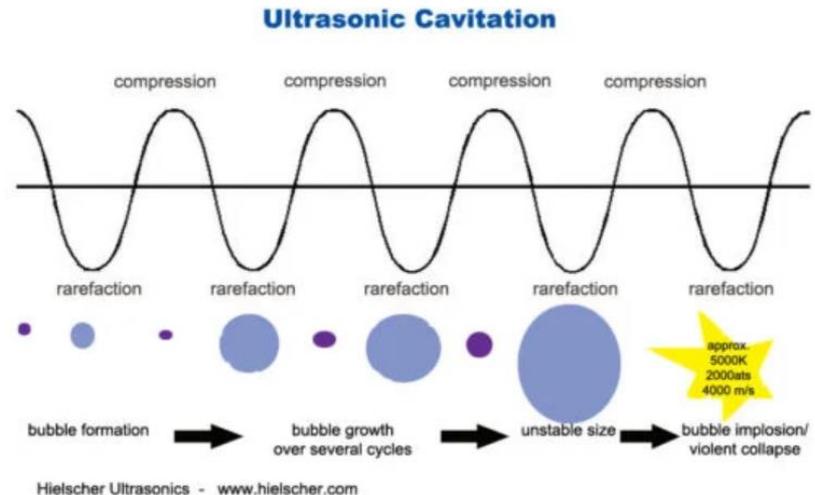


# Physikalische Grundlagen

## Kavitation

### Beispiele:

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

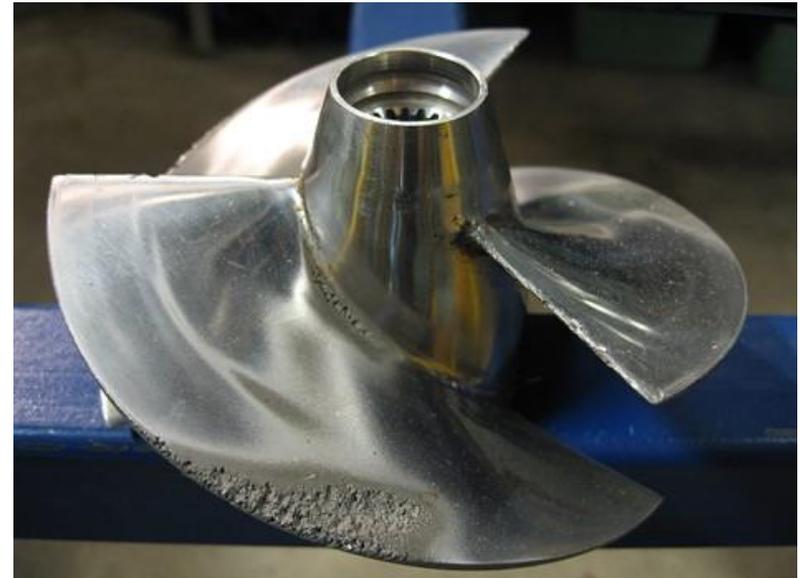


- **schnell wechselnde Druckverhältnisse**
- **geringerer Druck** → Verdampfungstemperatur niedriger (bei 23,37 mbar Verdampfung bei 20 °C) → Entstehung Wasserblasen (auch Problem bei Pumpen in großer Tiefe → Strömungsabriss)
- **höherer Druck** → Verdampfungsvorgang stoppt, Kondensation Wasserdampf 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 MPa = 10 bar = 1 N/mm<sup>2</sup>)
- Befinden sich die Dampfblasen in der Nähe einer festen Wand, z. B. den Laufradschaufeln → Flüssigkeitsstrahl (Mikrojet) **schlagartige Druckbelastung**
- **Materialabtragungen** beim Auftreten von Kavitation.

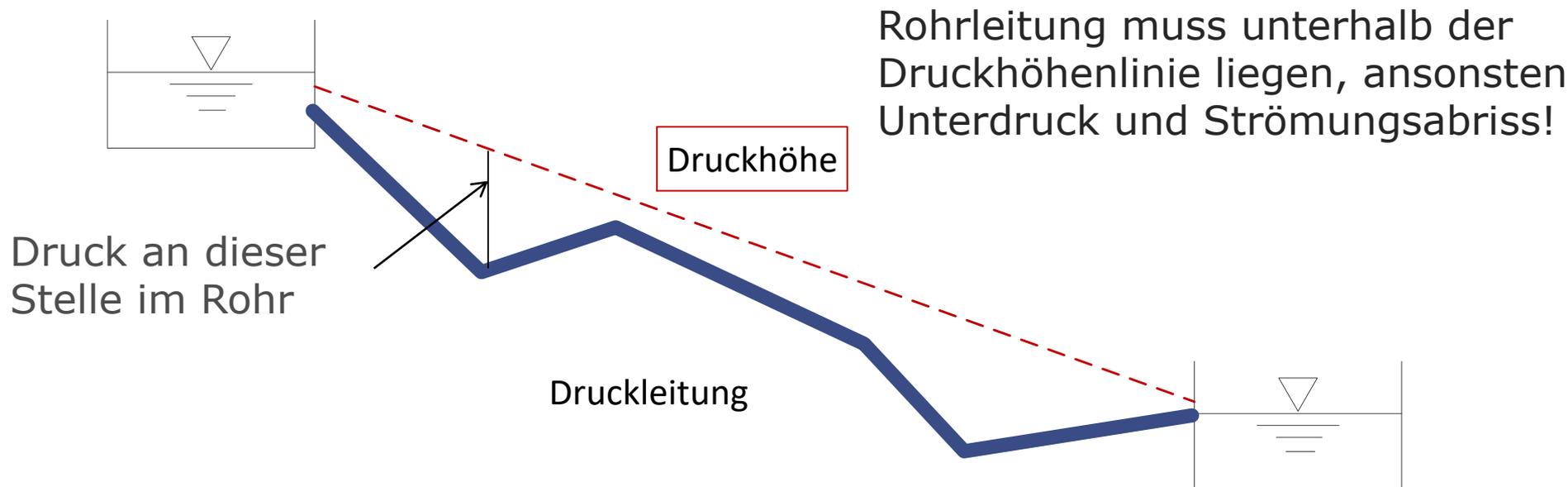


# Physikalische Grundlagen

## Dampfdruck Wasser

### Beispiele Wasserwirtschaft:

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





# 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, Kohlendioxid....**

# 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 geringer
2. Bei höherer **Temperatur** ist die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  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:

Henry-Konstante  $K_H$  [mol/ l \* bar] =  
 $c(A_{fl})$  [mol/ l] /  $p(A_{gas})$  [bar]

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

mit  $c(A_{fl})$  Konzentration Gas A wässriger Phase und  
 $p(A_{gas})$  [bar] Partialdruck des Gases A

# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

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



Definition des Partialdrucks

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

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

$$p_1 = x_1 p$$

$$p_2 = x_2 p$$

# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

**zwischen Gasen und Flüssigkeiten Austausch von Gasmolekülen**  
(Diffusion)

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**

Gas	Henry-Konstante $K_H$ [ $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ ] für $T = 25 \text{ °C}$
$\text{N}_2$	0,642
$\text{O}_2$	1,27
$\text{CH}_4$	1,34
$\text{CO}_2$	33,8
$\text{H}_2\text{S}$	102,2
$\text{NH}_3$	59.880,2

# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

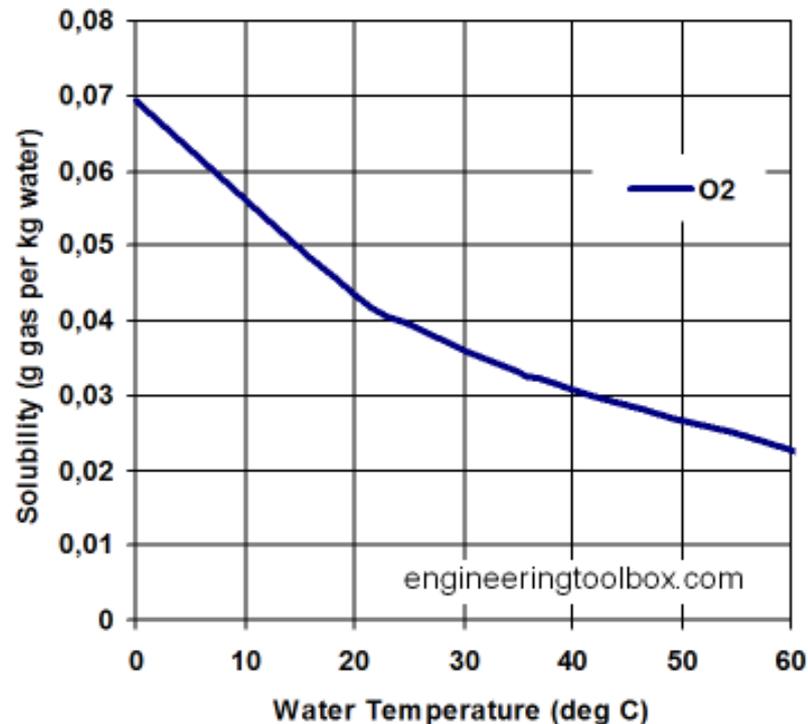
$K_H$  stark abhängig von Temperatur

	Stickstoff	Sauerstoff	Kohlendioxid
Temperature [°C]	$K_H$ of $N_2$ [mol/(m <sup>3</sup> ·bar)]	$K_H$ of $O_2$ [mol/(m <sup>3</sup> ·bar)]	$K_H$ of $CO_2$ [mol/(m <sup>3</sup> ·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

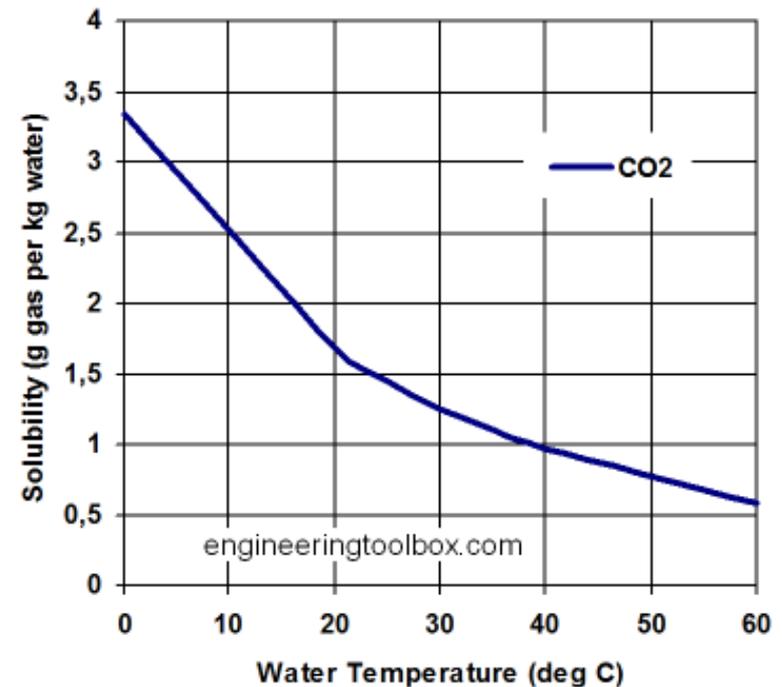
# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

### Sauerstoff



### Kohlendioxid

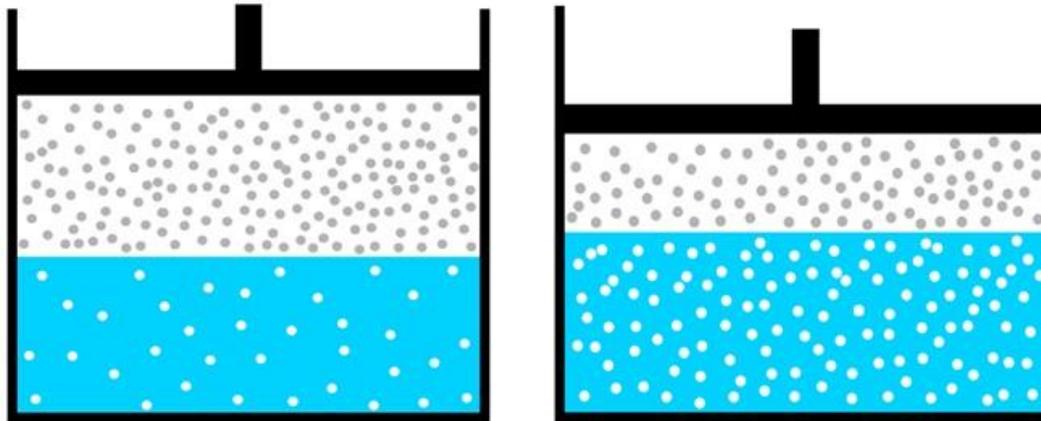


# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Erhöhung des **Außendrucks** (hier durch Einpressen eines Kolbens rechts dargestellt) führt zu einem höheren Partialdruck der Gasphase und folglich zu einer höheren Konzentration des **Gases in der Flüssigkeit**.

→ Eintrag von **Sauerstoff**



**HENRYsche Gesetz:**

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

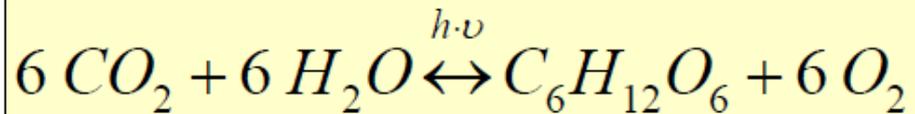


# Physikalische Grundlagen

## 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

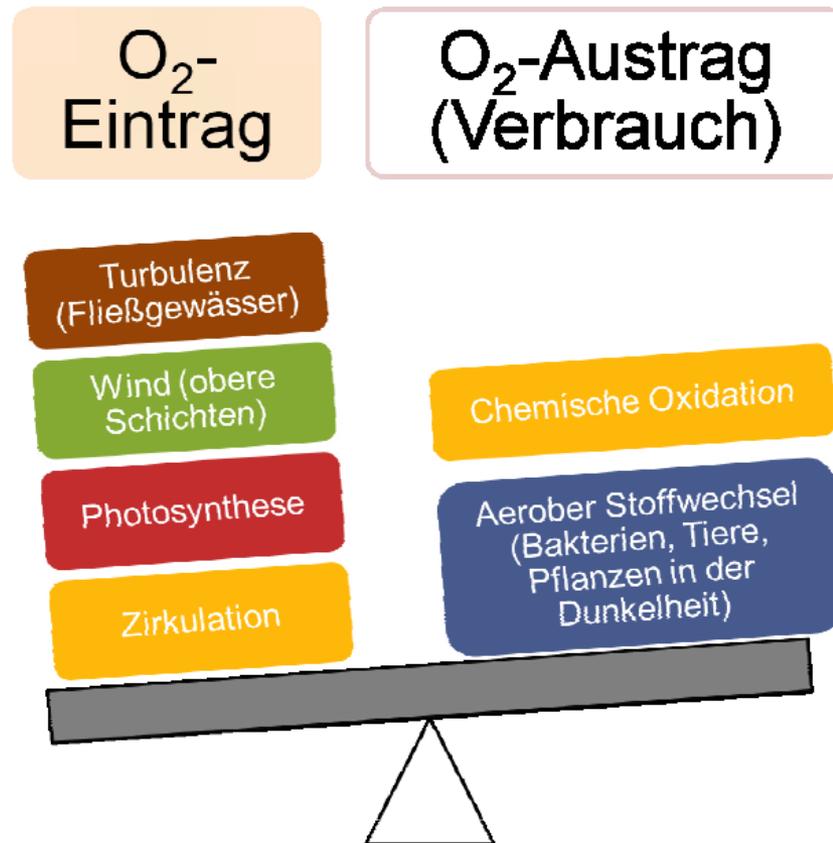
- Aerobe Atmung
- Nitrifikation (Abwassereinigung)

**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 O<sub>2</sub> 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**



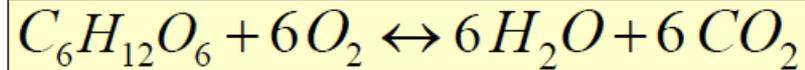
# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Kohlendioxid

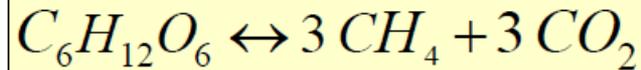
- Eintrag **Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)** in Wasser aus Atmosphäre (ca. 0,035 Vol-%)
- Löslichkeit in Wasser: 0,81 mg/l bei 10 °C und 0,52 mg/l bei 25 °C
- unter hohem Druck bessere Löslichkeit (Sprudelwasser)

**Bildung** durch biochemische Abbauprozesse

aerobe Atmung:



Gärung:



**Verbrauch:**

- Photosynthese, Carbonatbildung

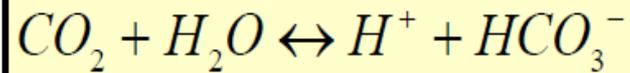
**Bedeutung:**

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

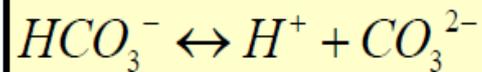
# Physikalische Grundlagen

## Löslichkeit Gase in Flüssigkeiten/ Kohlendioxid

In Wasser steht  $\text{CO}_2$  („Kohlensäure“) mit Dissoziationsprodukten im GG



$$pK_{S1} = 6,3$$

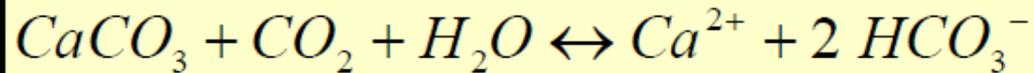


$$pK_{S2} = 10,3$$

$\text{CO}_2$  dominiert nur bei sauren pH Werten

### Bedeutung:

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



Zugehörige KS: Konzentration um  $\text{HCO}_3^-$  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  $\text{CO}_2$ .

Geg.:

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

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

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

Lsg.:

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

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

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

$$c(\text{H}^+) = c(\text{HCO}_3^-)$$

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

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

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



# 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

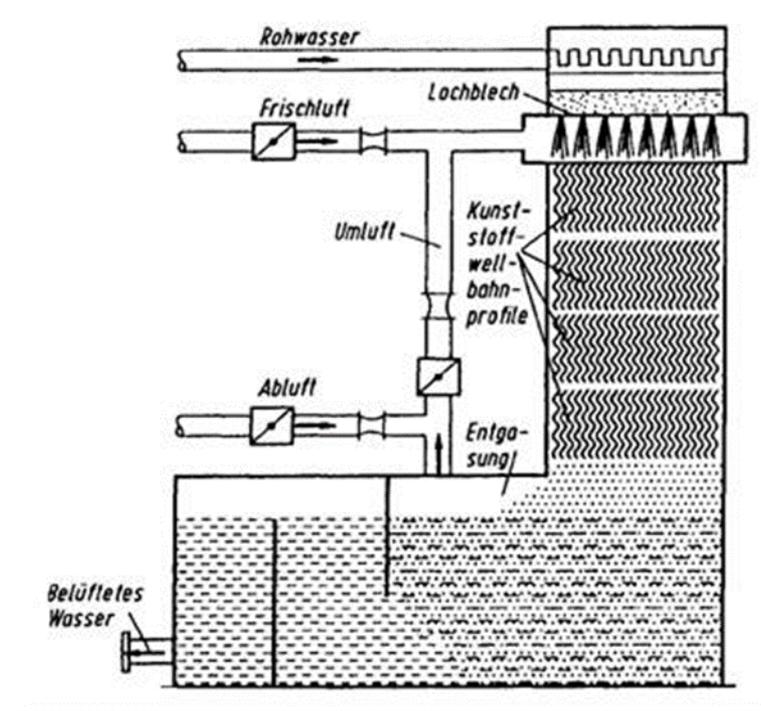
## Gasaustausch, Anwendung

- **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<sub>2</sub>, 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. Bei Bedarf muss die Abluft mit Aktivkohle gereinigt werden.
- 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 m<sup>3</sup>/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  
Usinger Straße 32  
61169 Friedberg-Ockstadt

# 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:

