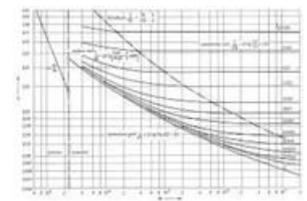
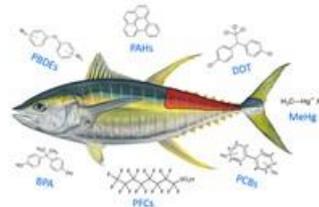
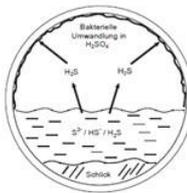
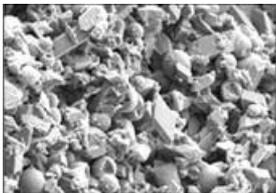


Bachelor Infrastruktur

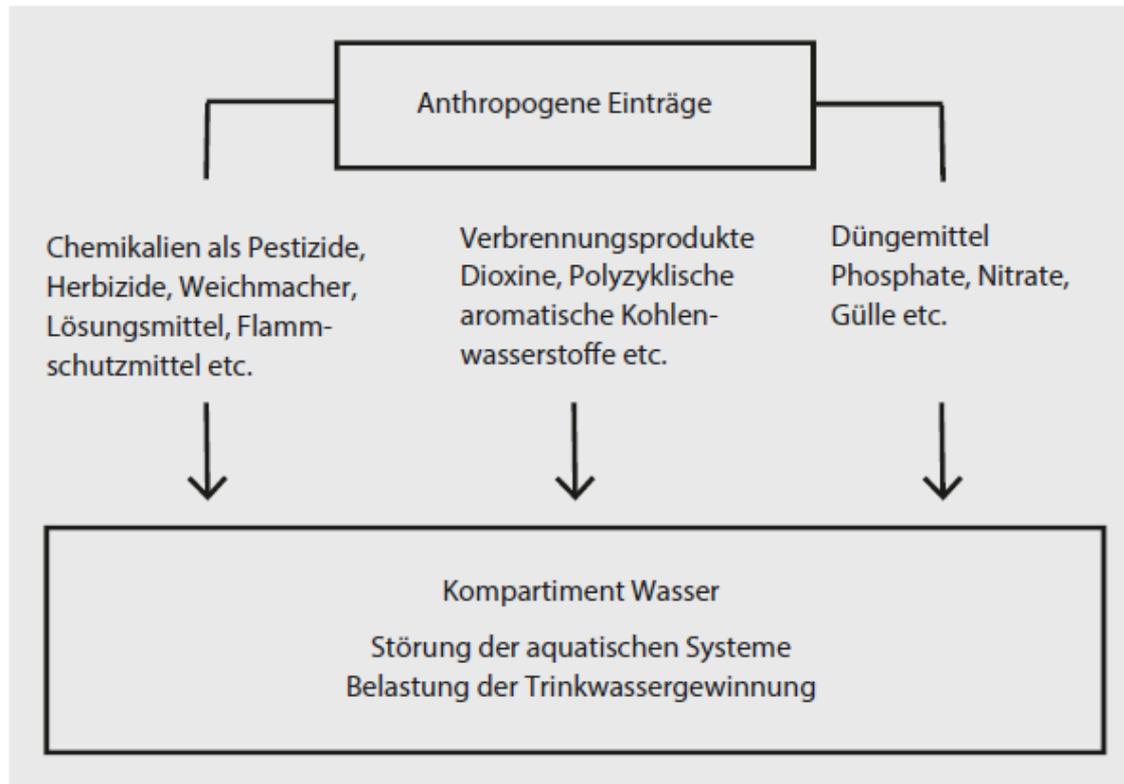
Vorlesung und Übung: Naturwissenschaftliche Grundlagen 2.6 Umweltchemie, Wasserchemie, Trinkwasser

Prof. Dr. Welker, Frankfurt University of Applied Sciences



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie



Wassergefährdende Stoffe

■ Abb. 1.12 Wassergefährdende Stoffe – eine Auswahl

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Trinkwasser

- **Aufkommen** Stoffe
- **Zielkompartimente** und **Zielorganismen**
- **Vorgaben** (Verordnung)
- **Maßnahmen zur Reinigung** (Prozesse, Techniken...)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Trinkwasser

Wasservorkommen Aufkommen Stoffe

Grundwasser (ca. 69 %)

▪ Boden und andere Nutzungen

- Naturstoffe: Kalk (CaCO_3) und andere Ionen (Sulfat, auch Metalle z.B. Arsen)
- Pestizide (Landwirtschaft)
- Nitrat (Landwirtschaft)
- Arzneimittel (Clofibrinsäure, Berlin)
- PFAS (Per/Polyflourierte Alkylverb.)

Oberflächenwasser (ca. 16 %)

- sehr vielfältig, kaum Überblick möglich
- chemischer Zustand: 32 prioritäre Stoffe plus flussgebietspezifische Schadstoffe

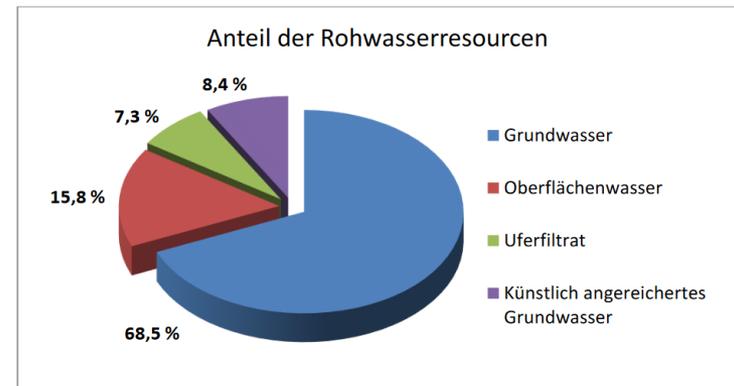


Abb. 2 | Anteil der Rohwasserressourcen für die Trinkwasserversorgung in Wasserversorgungsgebieten, in denen mehr als 1 000 m³ Trinkwasser pro Tag verteilt oder mehr als 5 000 Personen versorgt werden (Berichtsjahr 2019)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Trinkwasser

Zielkompartiment (Trinkwasseraufbereitung und Netz)

Zielorganismus (Mensch): gesamte Bevölkerung, auch Kleinkinder, Senioren und Erkrankte, humantoxikologische Wirkungen (z.B. Pb...), aber auch Vorsorgeprinzip (z.B. Pestizide...)

Vorgaben Trinkwasser

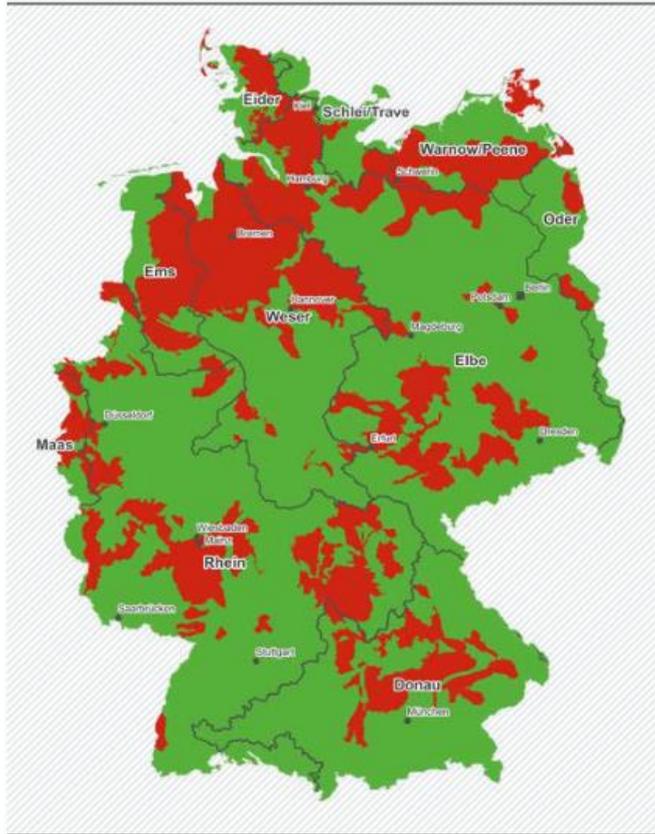
- **Trinkwasser-VO (2023): Lebensmittel**
 - strenge Grenzwerten für ca. 60 Stoffe, engmaschig kontrolliert (Lebensmittel Nr. 1!)
 - Überschreitungen sehr selten in D (< 1%): Keime, Nitrat, Blei, Kupfer, Nickel, PSM, Calcitlösung...
- **Mineral- und Tafelwasser-VO: Lebensmittel**
- **Heilwasser: Arzneimittel**

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Trinkwasser

Karte 9

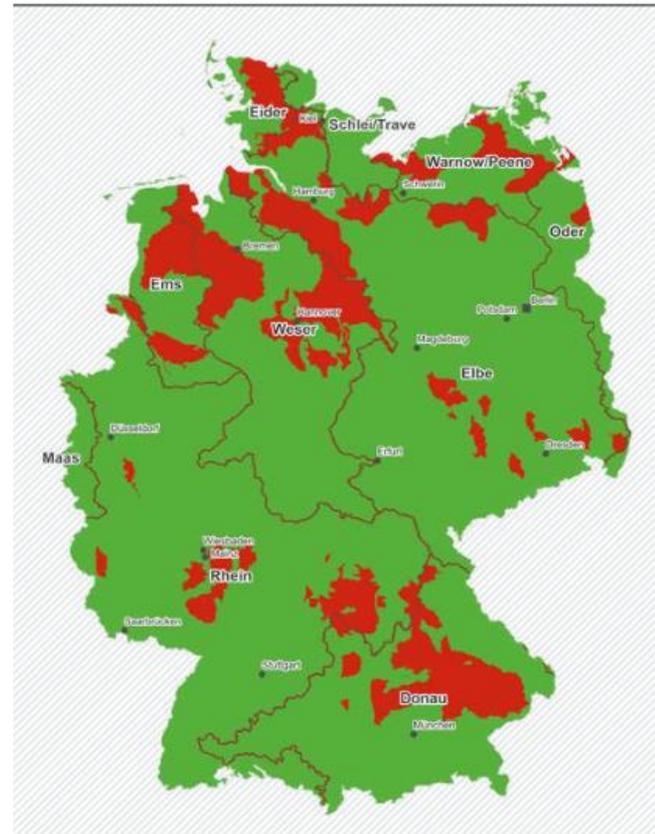
Grundwasserkörper die wegen Nitratbelastungen in einem schlechten chemischen Zustand sind, 2021



■ gut ■ schlecht

Karte 10

Grundwasserkörper, die wegen Belastungen mit Pflanzenschutzmitteln in einem schlechten chemischen Zustand sind, 2021



■ gut ■ schlecht

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Trinkwasser

- **Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2023)**
 - **Neu:** neue Stoffe (z.B. PFAS, BPA...) und Verschärfung Grenzwerte
 - **Bleileitungen** müssen bis 2026 ausgetauscht werden
 - **Grenz- und Richtwerte** sowie erlaubte Zusatzstoffe für die Trinkwasseraufbereitung
 - keine Schädigung der **menschlichen Gesundheit**, insbesondere durch Krankheitserreger
 - Trinkwasser muss **rein** und **genusstauglich** sein
 - Wassergewinnung und Wasseraufbereitung: Einhaltung **allgemein anerkannten Regeln der Technik (DIN)**

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Trinkwasser

Blei	0,01 mg/ l	Pestizid	0,1 µg/ l
Kupfer	2 mg/ l		Gesamtkonzentration verschiedener Pestizide < 0,5 µg/ l
Nitrat	50 mg/ l	PFAS	0,1 µg/ l (ab Januar 2026)
Nickel	0,02 mg/ l	PFHxS, PFOS, PFOA, PFNA	0,02 µg/ l (ab Januar 2028)
Arsen	0,01 mg/ l	Escherichia coli	0 mg/ 100 ml
Cadmium	0,003 mg/ l	Enterokokken	0 mg/ 100 ml
Chrom	25 µg/ l (ab Januar 2036)	coliforme Bakterien	0 mg/ 100 ml
Quecksilber	0,001 mg/l	Legionellen	100/ 100 ml Technischer Maßnahmenwert
Eisen	0,2 mg/l	Koloniezahl bei 22 °C	100/ 1 ml
Mangan	0,05 mg/l	Bisphenol A	0,001 mg/ 100 ml
		Chlorat	0,25 mg/ l 0,7 mg/ l bei Wasserdesinfektion
		Chlorit	0,25 mg/ l 0,7 mg/ l bei Wasserdesinfektion
		Microcystin-LR	1 µg/ l
		Hallogenessigsäuren	60 µg/ l

Auswahl Grenzwerte TrinkwV, 2023)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie – Trinkwasser DIN 2000

„**Trinkwasser ist das wichtigste Lebensmittel**“.

Es kann durch nichts ersetzt werden.

Trinkwasser muss **frei von Krankheitserregern und keimarm** sein und darf **keine gesundheitsschädigenden Eigenschaften** haben.

Trinkwasser soll seiner Herkunft nach **appetitlich** sein und nach seiner äußeren Beschaffenheit **zum Genuss anregen**.

Es soll daher **farblos, klar, kühl, geruchlos und geschmacklich einwandfrei** sein.

Der **Gehalt an gelösten Stoffen** soll sich **in gewissen Grenzen** halten.



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie – Trinkwasser DIN 2000



- Trinkwasser soll möglichst **keine Korrosion** hervorrufen.
- Trinkwasser soll in **genügender Menge und mit ausreichendem Druck** zur Verfügung stehen.



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Trinkwasser

wichtige Bewertungsparameter

- **pH Wert**
 - Säure/Base
- **Härte**
 - Definition, Arten
 - Anwendung im Trinkwasser
- **Kalk-Kohlensäure-GG**
 - Definition, Arten
 - Anwendung im Trinkwasser

<http://www.wvsb.at/images/haerte/haertleit1.jpg>



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Trinkwasser

Wasserchemie (Schwerpunkt Trinkwasser)

- **Lösung/ Fällung**
 - Definition
 - Anwendung Trinkwasser: Enteisung)

- **Entkeimung**
 - Indikatorparameter
 - Anwendung Trinkwasser: Entkeimung

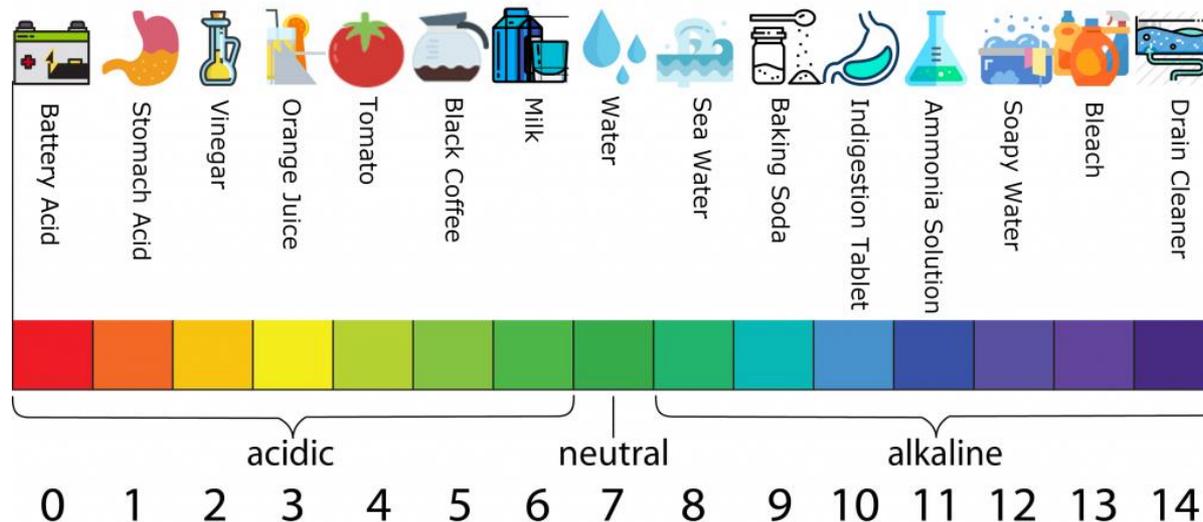


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, pH Wert

übliche pH-Werte in Wassermedien:

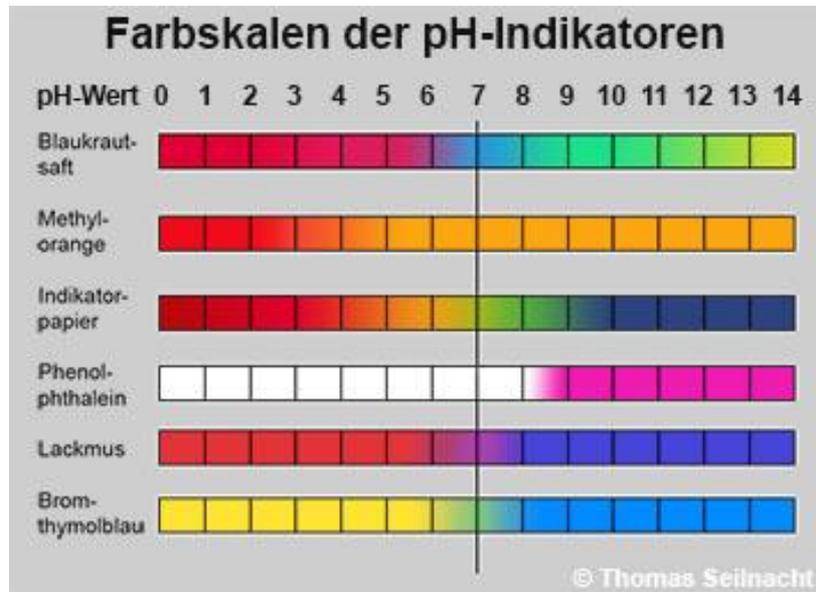
- neutrales Wasser: 7,0
- natürliche Wässer: 7,2 bis 7,7 wegen Kalkgehalt und 5,0 bis 6,5 wegen Huminsäuren oder Kohlensäure



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, pH Wert

Indikatoren:



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Trinkwasser

Vorgabe pH Wert TrinkwasserVO: 6,5-9,5

- **pH Wert zu gering**
 - Lösen von Stoffen (z.B. Cu, Pb...)
- **pH Wert zu hoch**
 - Ausfällen von Stoffen (Ca, Fe...)

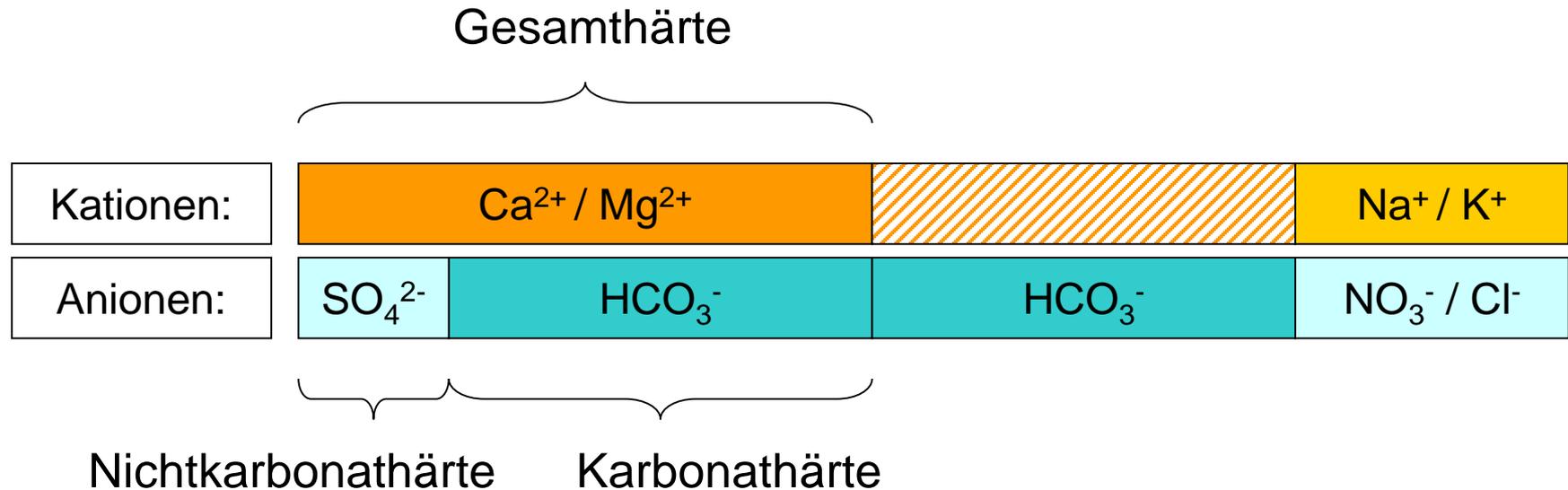
Wichtig für das Wechselspiel mit der
Kohlensäure

<http://www.wvsb.at/images/haerte/haertleit1.jpg>



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte



Wasserhärte: Konzentration Ca^{2+} (ca. 70-85 %) und Mg^{2+} (ca. 15-30 %)

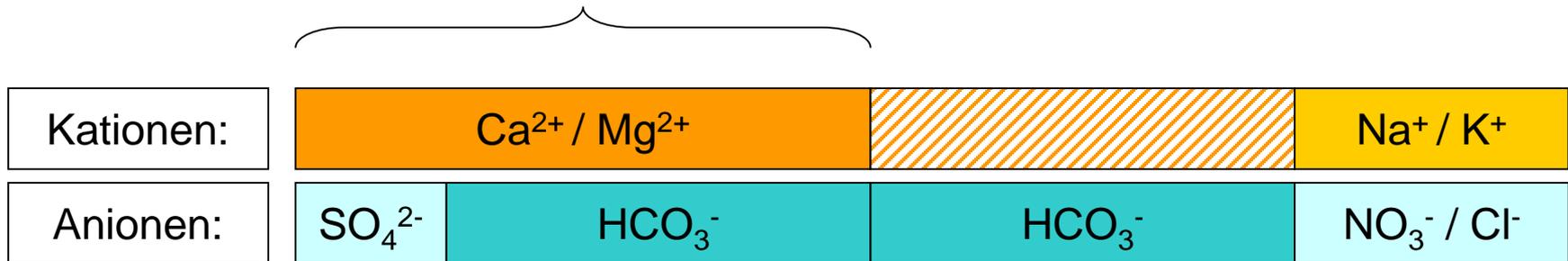
Entstehung Grundwasser Auflöseprozesse im Boden: Kalkspat (CaCO_3), Magnesit (MgCO_3), Dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

1 °dH (deutsche Härtegrade) = 0,18 mmol Ca^{2+} / Liter

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

Gesamthärte



Einteilung:

bis 1,3 mmol/l Ca ²⁺ /Mg ²⁺	sehr weich
1,3 – 2,5 mmol/l Ca ²⁺ /Mg ²⁺	weich
2,5 – 3,8 mmol/l Ca ²⁺ /Mg ²⁺	hart
über 3,8 mmol/l Ca ²⁺ /Mg ²⁺	sehr hart

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Karbonathärte

Kationen:	Ca ²⁺ / Mg ²⁺		Na ⁺ / K ⁺
Anionen:	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ / NO ₃ ⁻ / Cl ⁻

Karbonathärte

Karbonathärte (vorübergehende oder temporäre Härte)

- Ca²⁺ und Mg²⁺ Kationen, zusammen mit HCO₃⁻ und CO₃²⁻ gelöst
- Anteil an **Gesamthärte**, der bei der Ausgasung von CO₂ (Kochen) ausgeschieden wird (Ausfällung von CaCO₃)



Kalkausfällung

gast aus



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Nichtkarbonathärte

Kationen:	$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$		$\text{Na}^{+} / \text{K}^{+}$	
Anionen:	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	HCO_3^{-}	$\text{NO}_3^{-} / \text{Cl}^{-}$

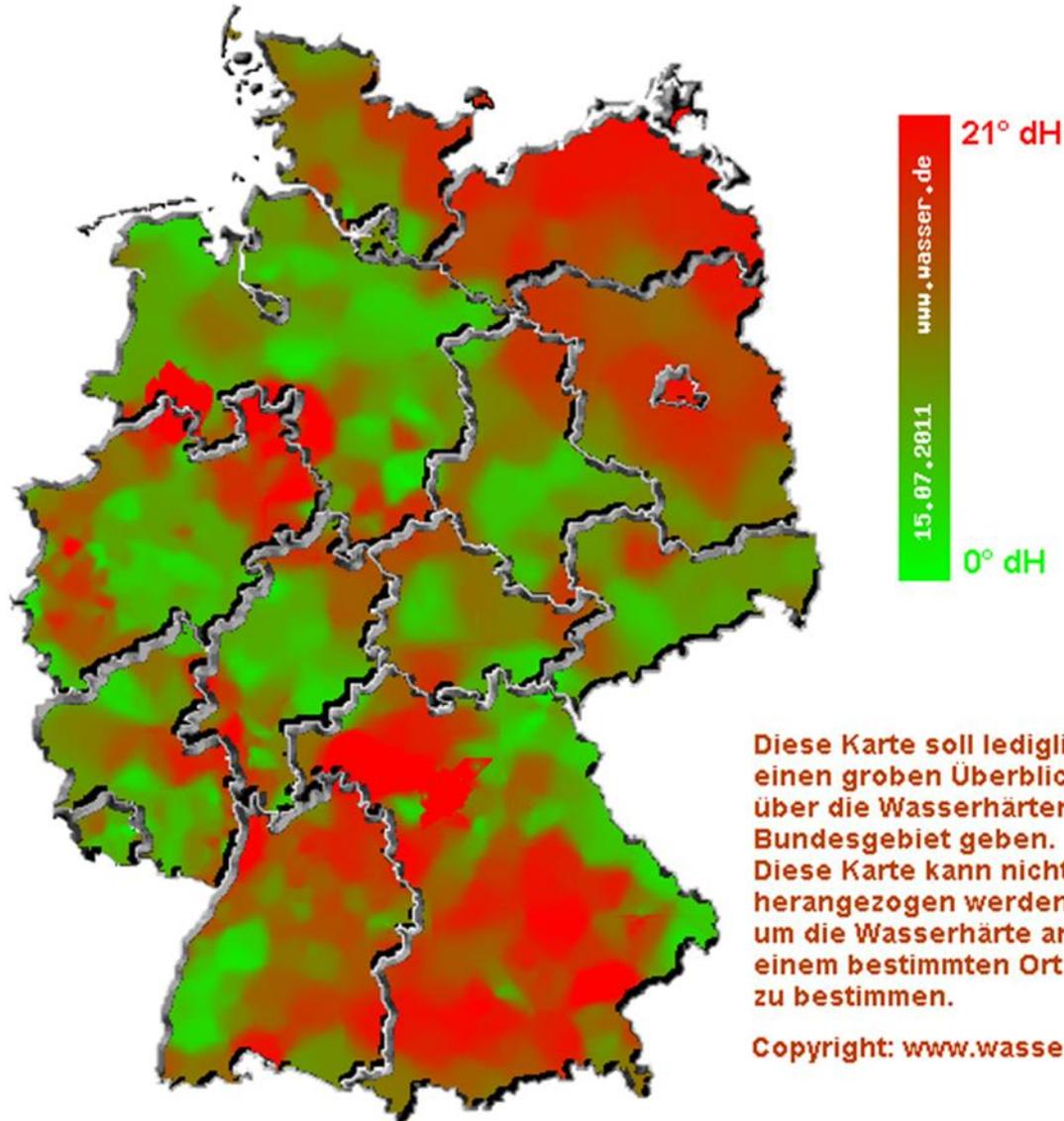
Nichtkarbonathärte

Nichtkarbonathärte (bleibende oder permanente Härte)

- Nichtkarbonathärte = Gesamthärte – Karbonathärte
- bleibt gelöst (**Chlorid und Sulfat**), wenn die Karbonathärte ausgefallen ist.

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

Nachteile harter Wässer:

- **Kesselsteinbildung** (vorwiegend CaCO_3) in Heizungsanlagen und Dampfkesseln (Wärmeübertragung stark verringert),
- **Grauschleier beim Wäschewaschen** durch Bildung von Calcium- und Magnesiumseifen (schwerlösliche Ca- und Mg-Salze der Fettsäuren) → **höherer Verbrauch an Wasch- und Spülmitteln**
- **geschmackliche** Beeinträchtigungen

→ **Enthärtung** relativ oft bei Rohwasser aus Grundwasser durchgeführt

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

- Angabe **Härtebereich** durch Wasserversorgungsunternehmen → Vermeidung von **Überdosierungen** von **Waschmittel**

Tabelle 6.6 Härtebereiche

Härtebereiche	Millimol CaCO_3 pro Liter H_2O	°dH
weich	< 1,5 mmol	< 8,4
mittel	1,5 ... 2,5 mmol	8,4 ... 14
hart	> 2,5 mmol	> 14

Kein
Weichspüler
erforderlich

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

Nachteile zu **weicher** Wässer:

- Ca/ Mg- Mangel
- fader Geschmack
- ggf. Kalk-Kohlensäure-GG schwierig (siehe folgende Folien)

ggf. Aufhärtung, ist aber viel seltener als Enthärtung!

Aufhärtung

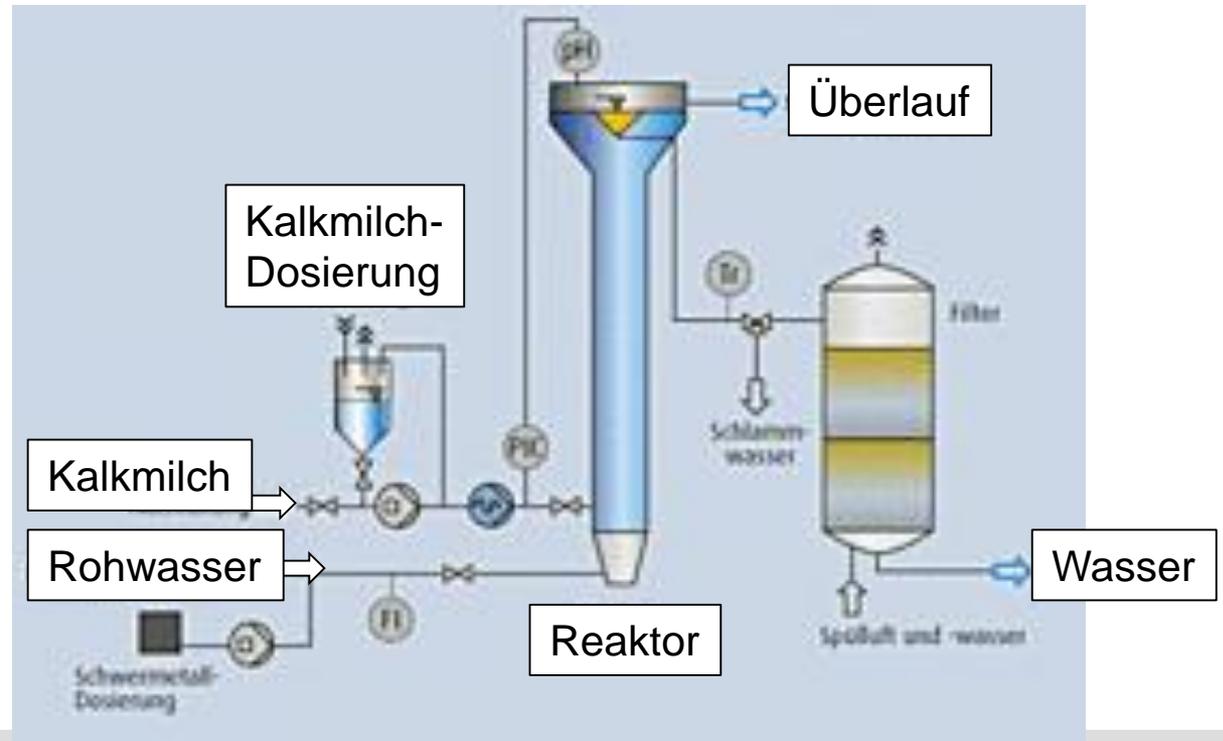
z.B. Filtration über Dolomit, Bildung Karbonathärte

Vom Verbraucher werden Härtegrade von **10 bis 15 °dH** am angenehmsten empfunden.

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

Enthärtung: Kalkausfällung durch Zufuhr von Calciumhydroxid (Kalkmilch):

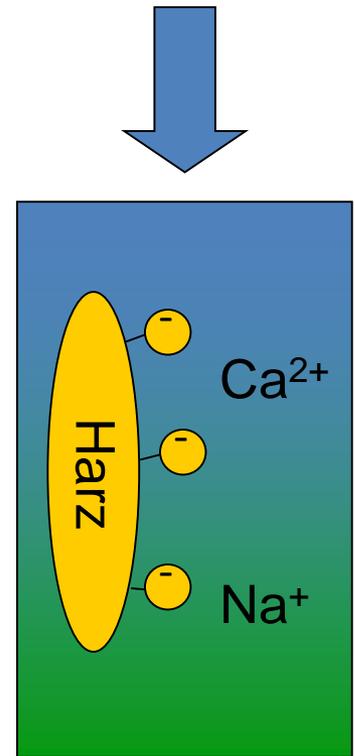


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

Enthärten mit Ionentauscher:

Austauschen von Ca^{2+} gegen Na^+

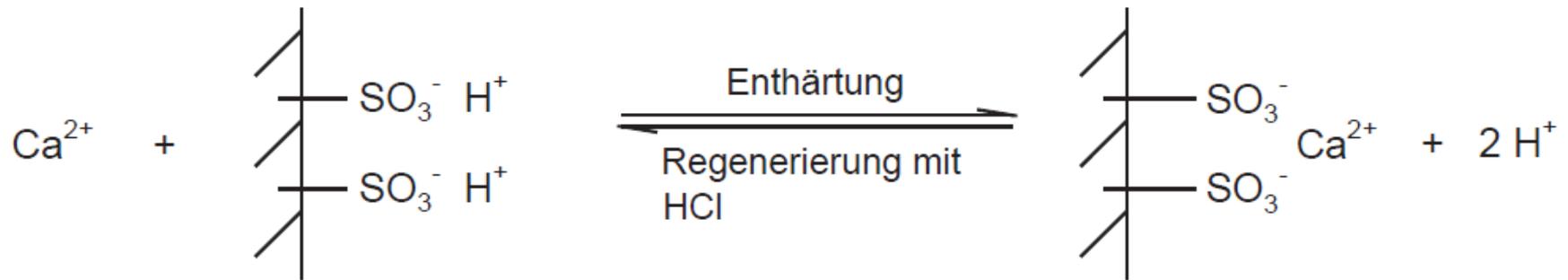


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

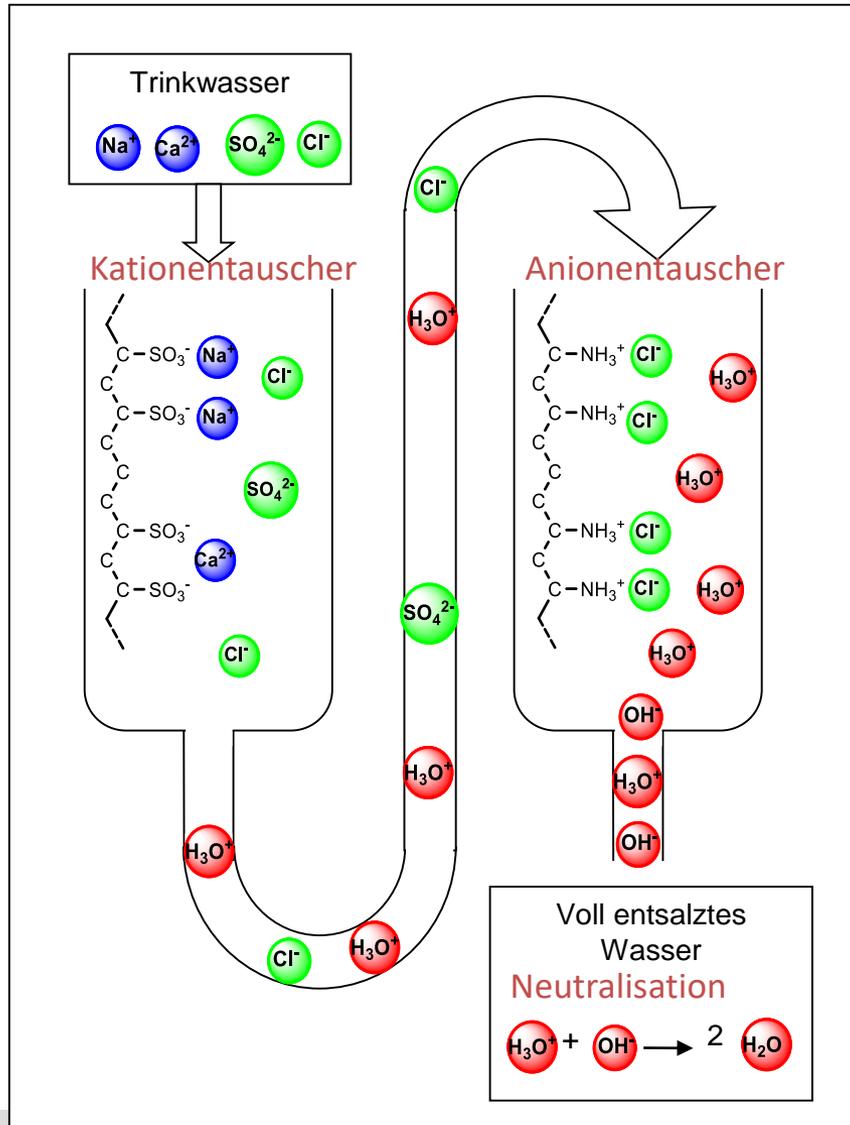
Enthärten mit Ionentauscher: Ca^{2+} gegen H^+

Kationenaustausch



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte



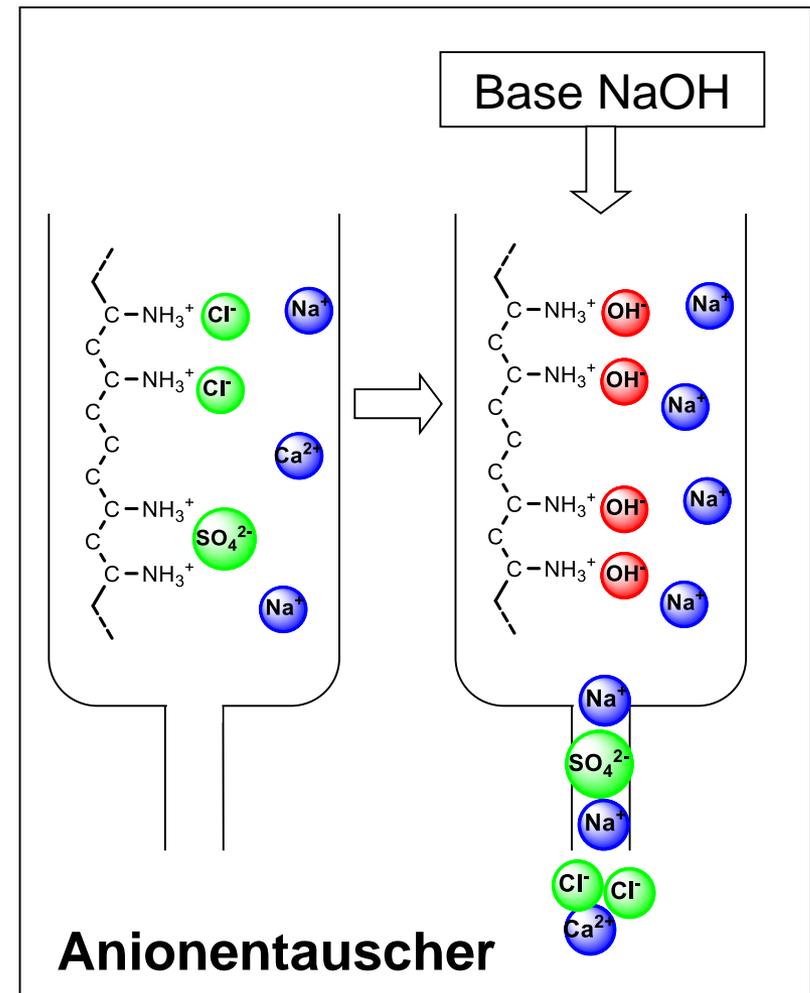
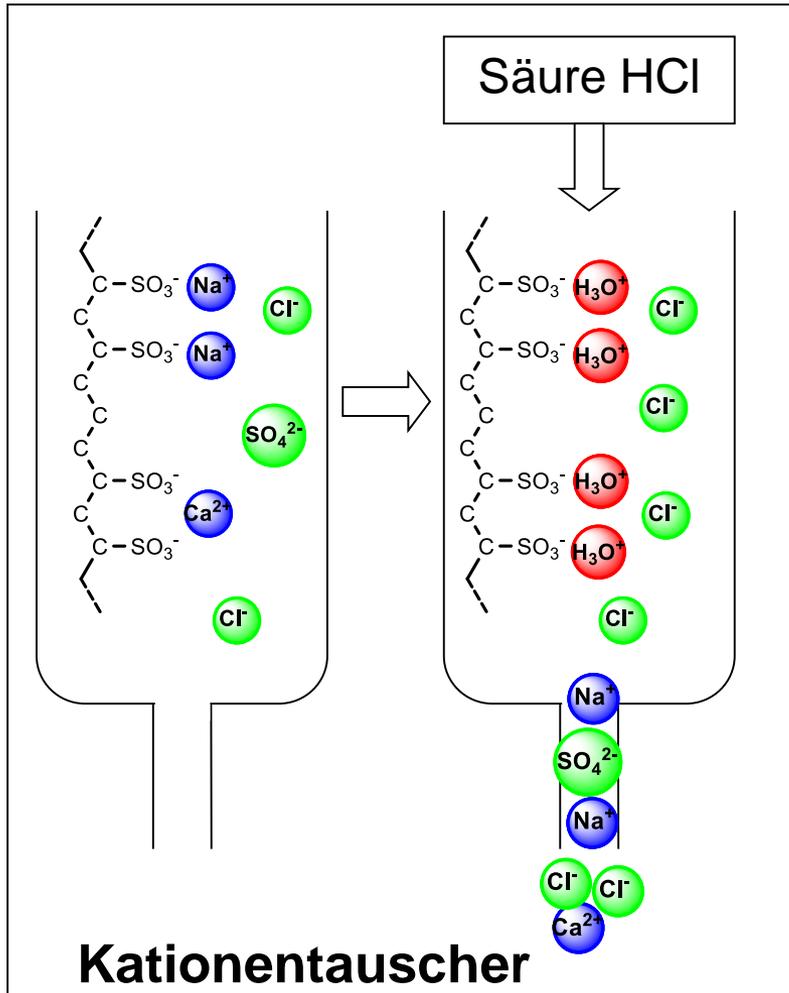
Vollentsalzen aller Ionen:

- **Kationenaustausch:** von Ca^{2+} gegen H_3O^+
- **Anionenaustausch:** Cl^- gegen OH^-
- Anschliessend **Neutralisation**
 $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Härte

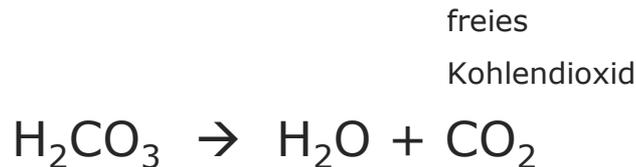
Regeneration nach Vollbeladung



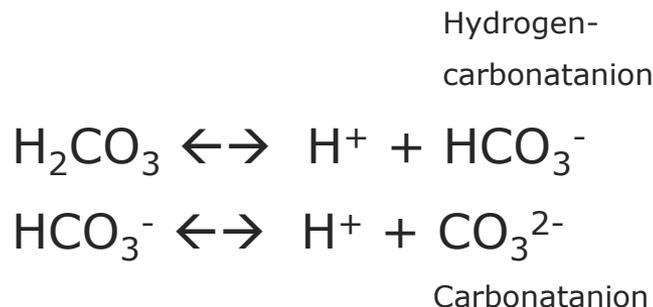
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kohlensäure

- **Kohlensäure:** für den menschlichen Organismus keinesfalls gesundheitsschädigend, aber im Überschuss kalk- und metallangreifend
- kann zwei Protonen abgeben, als freie Säure instabil → Aufspaltung in Wasser und Kohlendioxid



Erfassung **freies Kohlendioxid:** annähernd aus Basenkapazität **K_B 8,2** oder **p-Wert** (Phenolphthalein): Menge an Base [mmol/l] die dem Wasser zugegeben werden muss um pH = 8,2 einzustellen.
 $p \approx c(\text{CO}_2)$



Erfassung **Hydrogencarbonat:** Säurekapazität **K_S 4,3** oder **m-Wert** (Methylorange): Menge an Säure [mmol/l] die dem Wasser zugegeben werden muss um pH = 4,3 einzustellen.
 $m \approx c(\text{HCO}_3^-)$

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

Freie Kohlensäure ist in der Lage, das wasserunlösliche **Magnesium- bzw. Calciumcarbonat (gebundene KS)** in die leicht lösliche Form der **Hydrogenkarbonate (halbgebundene KS)** zu überführen.

Lösen von Kalk aus Böden in Grundwasser

Lösen von Kalk in Wasserleitungen; Rückreaktion (Ausfällung von Kalk)

ungelöst

gelöst



gebundene KS

freie KS

halbgebundene KS

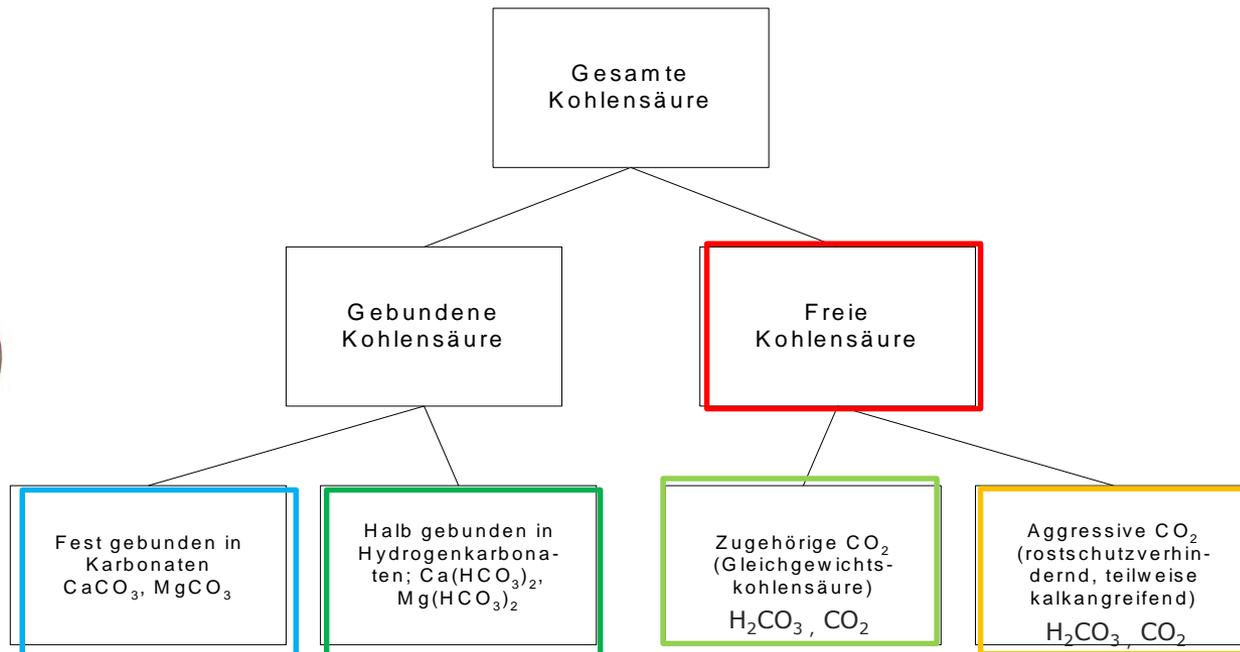
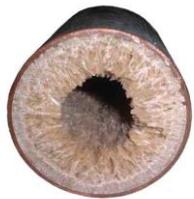
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

- Stabilisierung des **Hydrogenkarbonats (kein Ausfall Carbonat) zugehörige freie Kohlensäure** notwendig.

→ Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

- freie überschüssige aggressive Kohlensäure:** aggressiv (löst den Kalk aus Mörtel/Beton oder Metalle aus Leitungen (Blei, Kupfer))



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

Veränderung einer Komponente CO_2 , Ca^{2+} , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} hat Änderung der Gleichgewichtsreaktionen zur Folge

wichtige Einflussfaktoren: pH Wert und Temperatur des Wassers

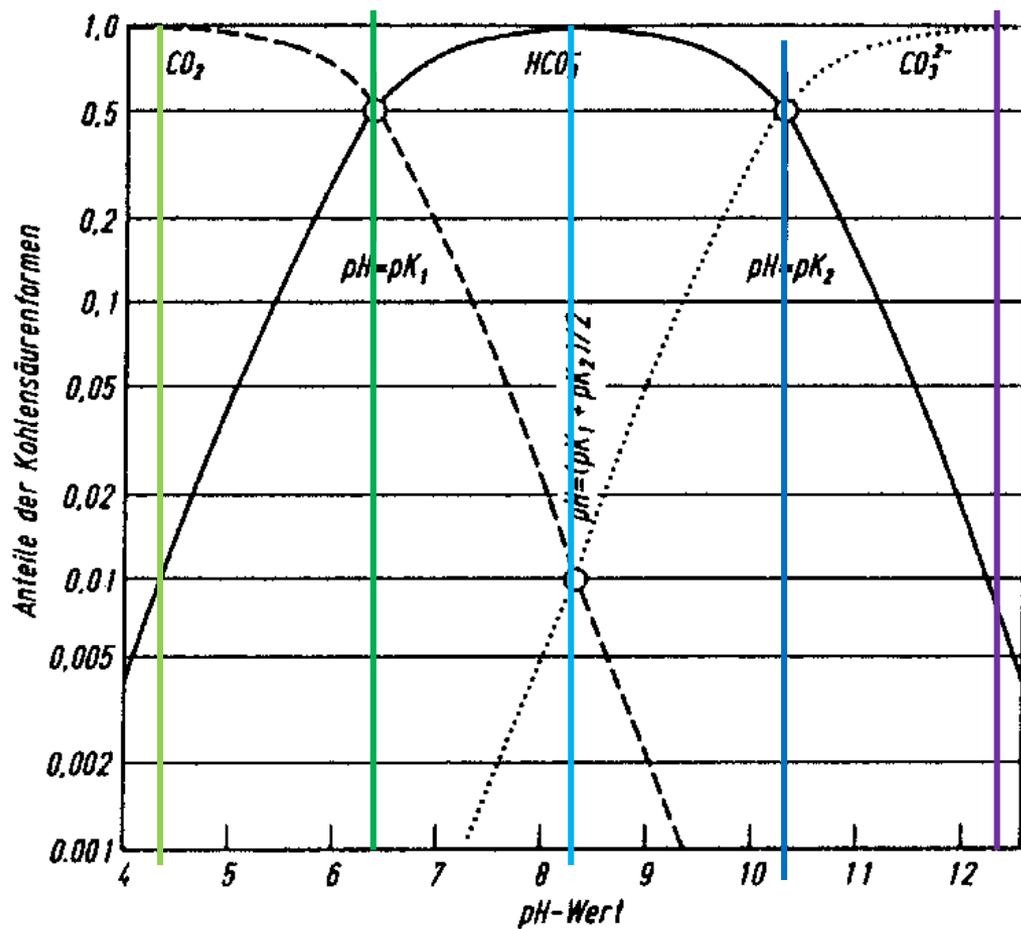
saure Bedingungen: CO_2 und H_2CO_3

basische Bedingungen: CO_3^{2-}

neutraler Bereich: HCO_3^-

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG



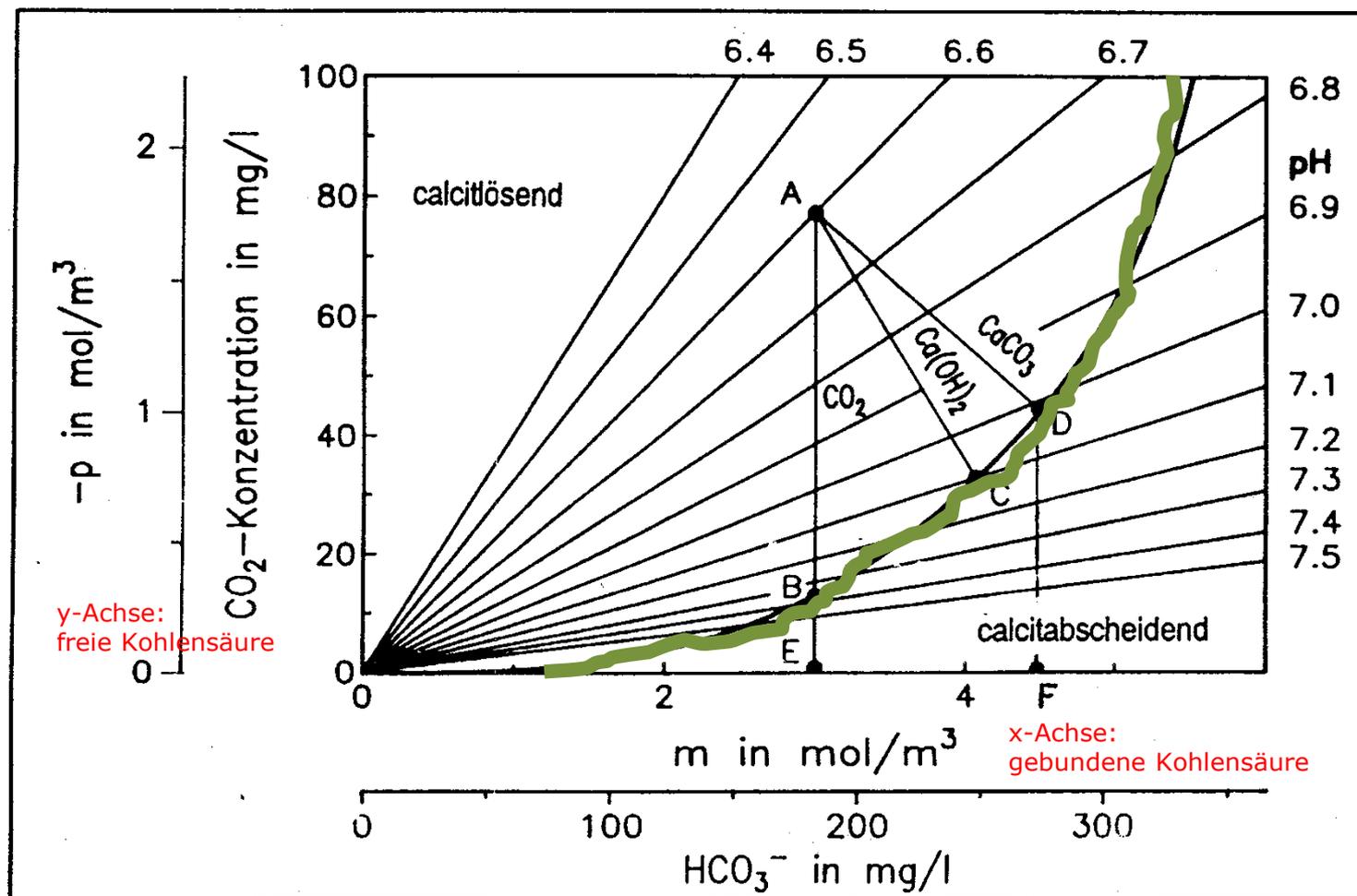
pH	Kohlensäureformen
4,3	99 % $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3$ 1% HCO_3^-
6,4	$[\text{CO}_2]_{\text{aq}} = [\text{HCO}_3^-]$
8,2	98 % HCO_3^- 1 % CO_2 1% CO_3^{2-}
10,3	$[\text{HCO}_3^-] = [\text{CO}_3^{2-}]$
12,5	99 % CO_3^{2-} 1% HCO_3^-

Anteile der Kohlensäureformen CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} an der Konzentrationssumme, berechnet für 25° C. (aus Mutschmann, Stimmelmayer 1991).

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

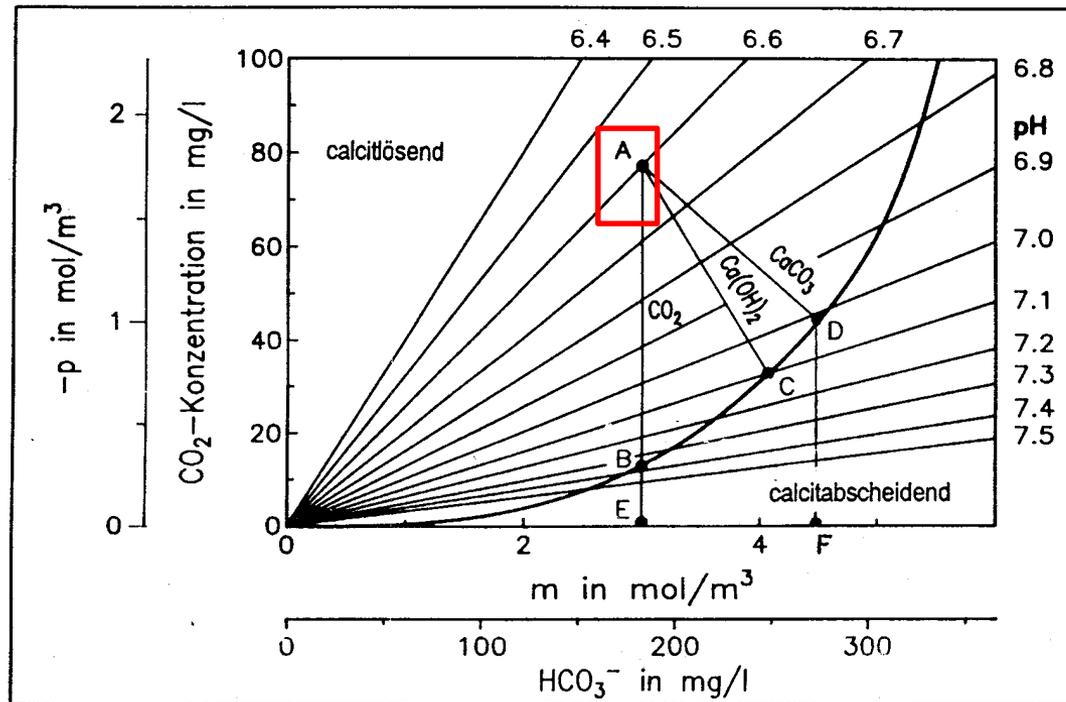
Tillmans – Diagramm mit Gleichgewichtskurve



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

Tillmans – Diagramm mit Gleichgewichtskurve



Eingabewerte

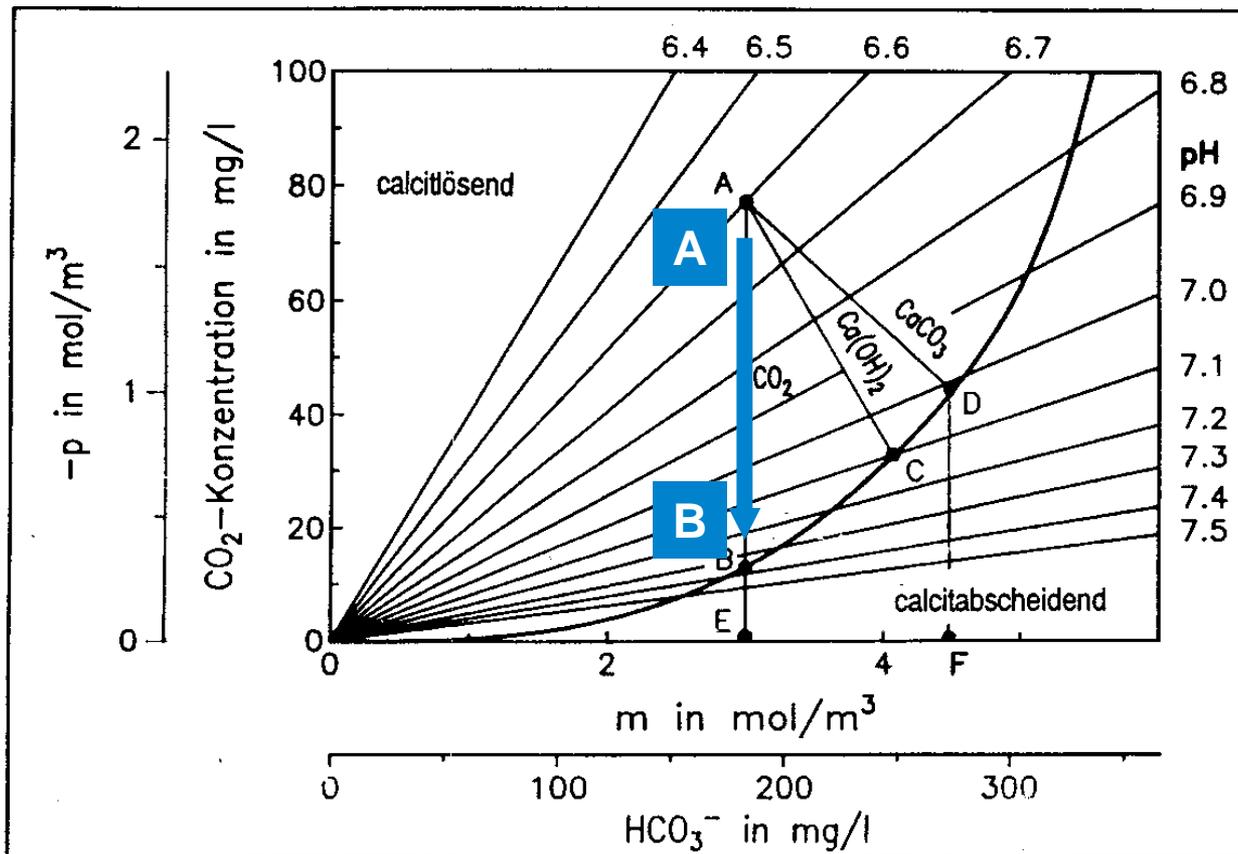
- **pH-Wert**
- **x-Achse: gebundene Kohlensäure** bzw. **Karbonathärte** (Konz HCO₃⁻ in mg/l, m-Wert K_{S 4,3}-Wert)
- **y-Achse: freie Kohlensäure** (Konz CO₂ in mg/l, p-Wert, K_{B 8,2}-Wert)

Beispielwasser A: pH = 6,6; m-Wert = 3 bzw. HCO₃⁻ Konz ca. 180 mg/l → Wasser A ist stark calcitlösend und muss entsäuert werden

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

Entsäuerung durch Belüftung/Gasaustausch - $\text{CO}_2 \uparrow$



- Ausmaß zu **entfernende CO_2 Menge** [mg/l]
- m-Wert (Carbonathärte) ändert sich nicht!
- End pH Wert = 7,37

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

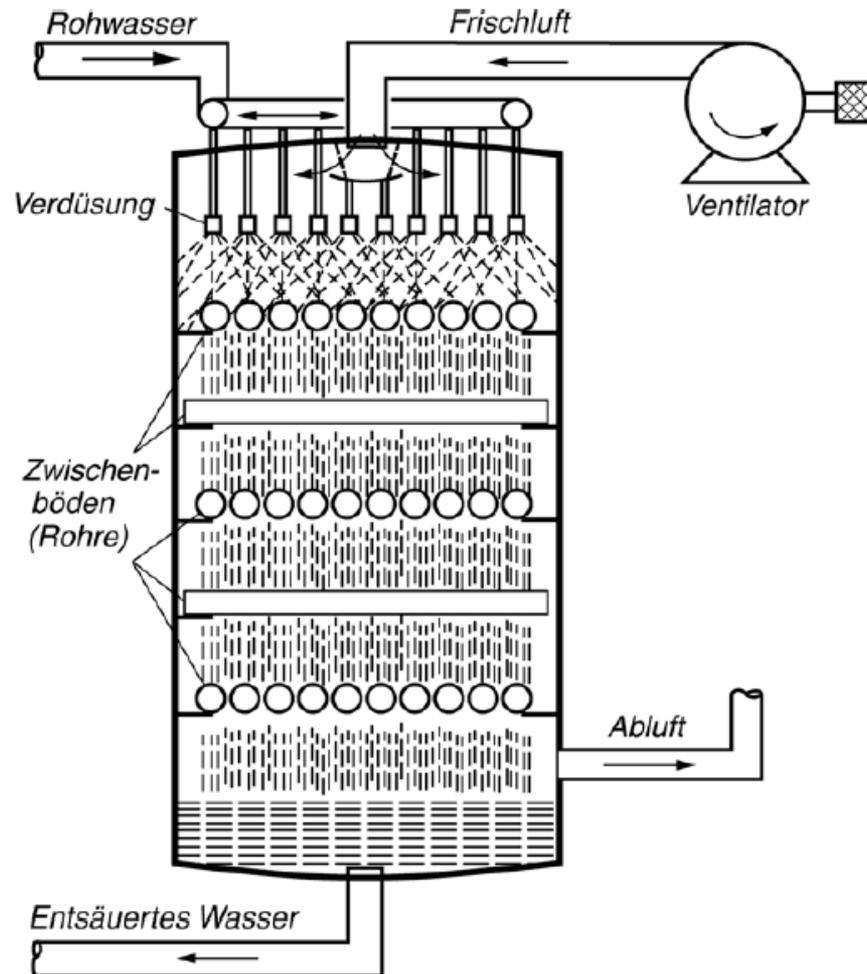
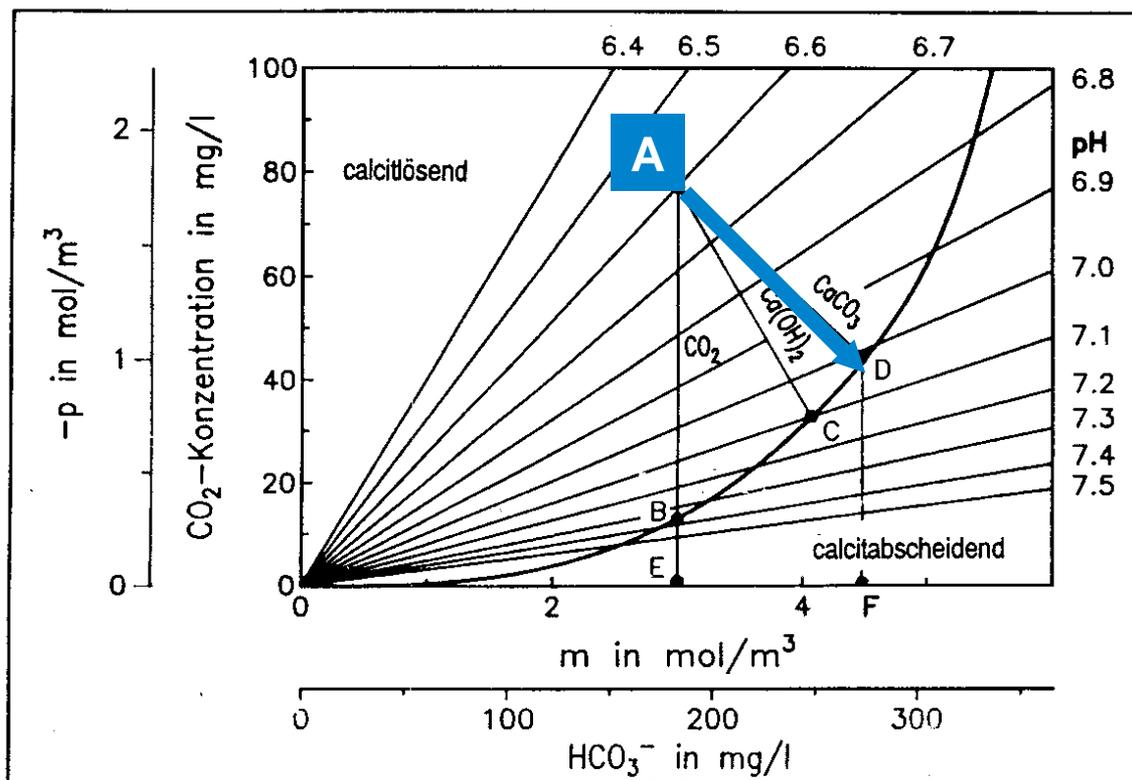
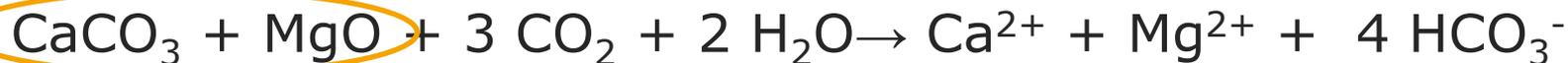


Abb. 5.22 Rohrgitter-Kaskade (Turmbelüftung) [27]

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

Entsäuerung: Filtration über halbgebrannten Marmor oder Dolomit



- Verbrauch von Dolomit [mg/l]
- m-Wert (Carbonathärte) steigt → **Aufhärtung**

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Kalk-Kohlensäure-GG

Tab. 5.10 Vorzugsbereiche für den Einsatz der Entsäuerungsverfahren in Abhängigkeit von der Wasserbeschaffenheit (DVGW W 214-1)

Verfahren	Wasserbeschaffenheit im Zulauf zur Entsäuerung
Ausgasung von Kohlenstoffdioxid	$c(\text{Ca}^{++}) \times K_{\text{S4,3}} > 2 \text{ mmol}^2/\text{l}^2$
Filtration über Calciumcarbonat	$K_{\text{S4,3}} + 2 K_{\text{B8,2}} < 1,5 \text{ mmol/l}$
Filtration über halbgebranntem Dolomit	$K_{\text{S4,3}} + 2 K_{\text{B8,2}} < 2,5 \text{ mmol/l}$
Dosierung basischer Stoffe	-----

- **Ziel Kalk-Kohlensäure-GG:** weder **kalklösende** (Korrosion und Metalllösung) noch **kalkausfallende** (Inkrustationen) Bedingungen im Trinkwasser erzeugen.
- **weiche Wässer** empfindlicher als harte Wässer → ggf. Aufhärtung
- ganz wichtig, gerade in der Zukunft mit Dürreperioden: Beim **Mischen von Wässern** (z.B. aus 2 verschiedenen Quellen) kann aggressive Kohlensäure entstehen!

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Fällung

- Anwendung **Fällung** bei **Trinkwasser (Enteisenung/Entmanganung)**
- Richtwerte in **Trinkwasser-VO** (vorwiegend nicht toxikologisch begründet):
 - 0,20 mg/l an Eisen und
 - 0,05 mg/l an Mangan
- **Gründe:** Geschmack, Farbe, Trübung, bei Mangan auch Bakterien

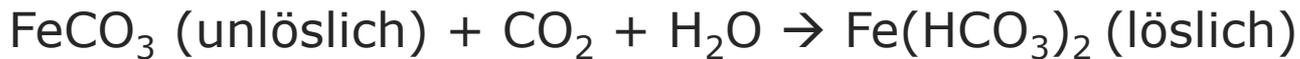


Naturwissenschaftliche Grundlagen

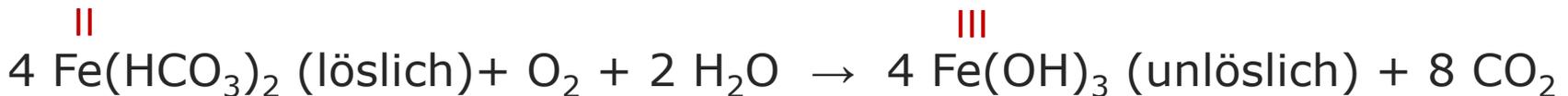
Chemie, Fällung

Entfernung Eisen durch Belüftung (Umkehrung der Lösung von unlöslichen Salzen im Boden/Grundwasser durch CO₂)

Lösung mit Kohlendioxid im **Boden/ Grundwasser**:

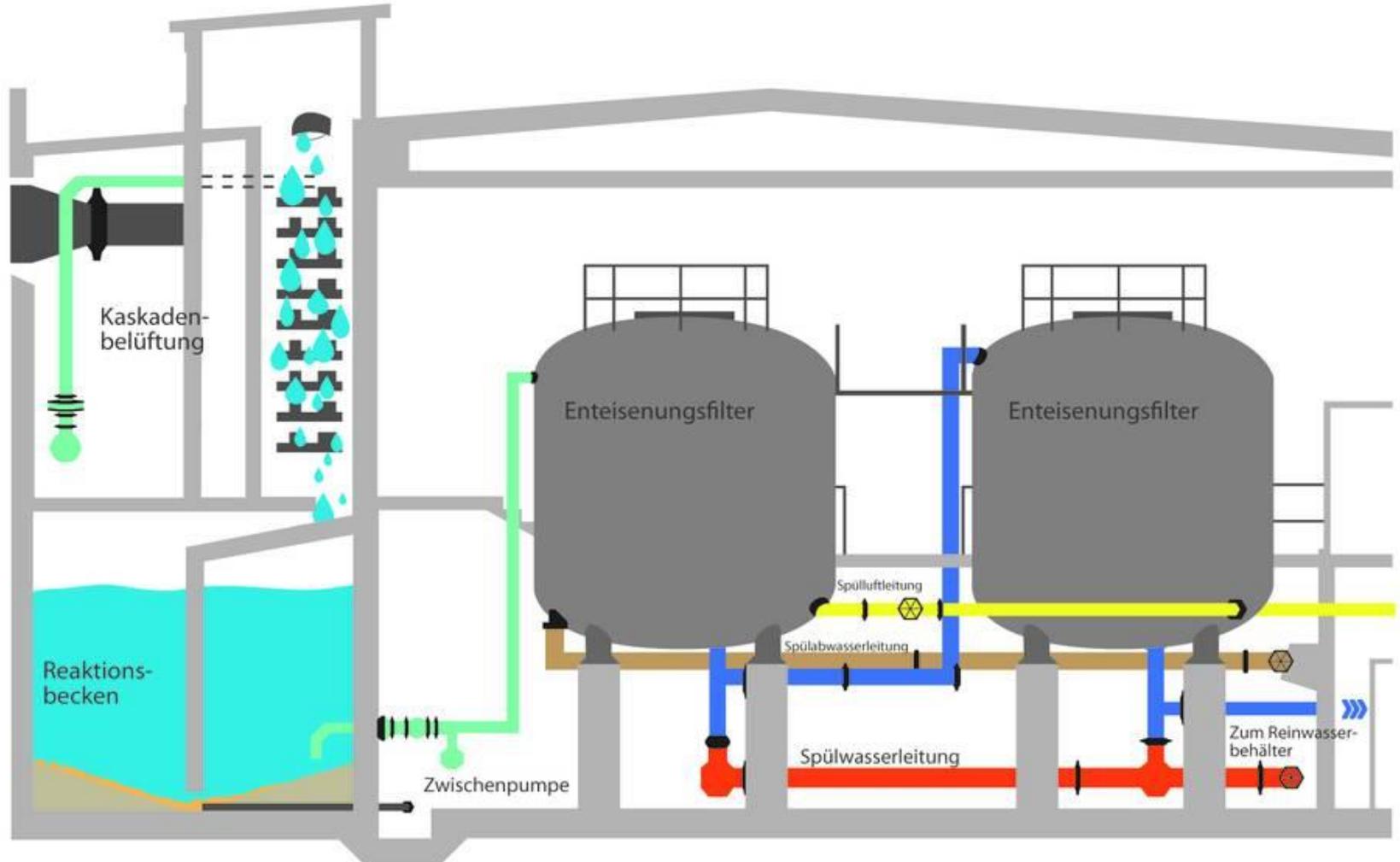


Oxidation in TW-Aufbereitung:



Naturwissenschaftliche Grundlagen

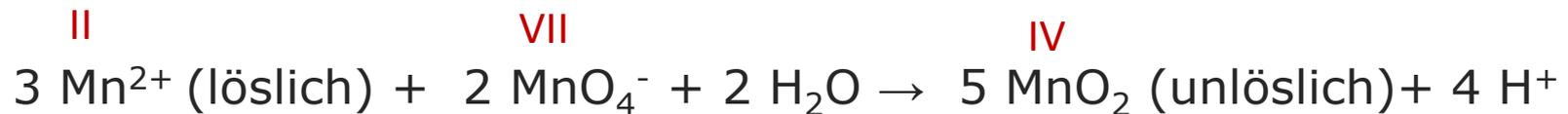
Chemie, Fällung



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, Fällung

- Entfernung **Mangan** durch **chemische Oxidation**
- **Oxidation (z.B. Kaliumpermanganat)** → Überführung Mn^{2+} in MnO_2 (Braunstein)

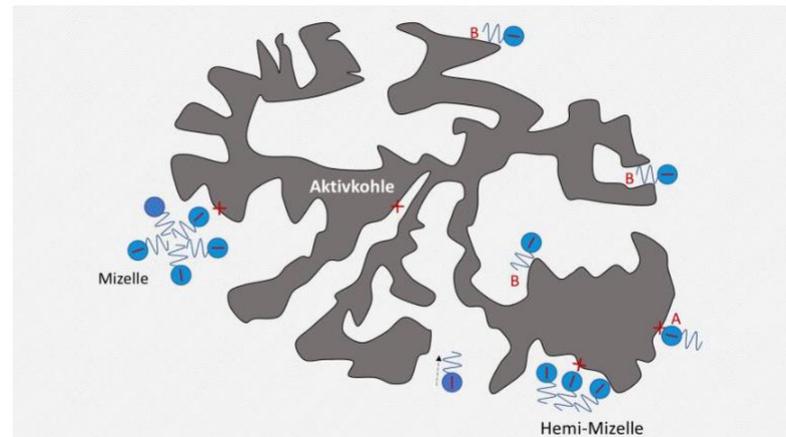


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Chemie, weitere Verfahren

- **Entfernung von speziellen Stoffen**
 - **PFAS und Pestizide mit Aktivkohlefiltration**

Abbildung 5 PFAS-Bindung an Aktivkohle



A: Elektrostatische Interaktion, B: Hydrophobe Bindung⁷, Quelle: Yu, 2009.

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

- **Hygiene**
 - Allgemeine Grundlagen
- **Anwendung Trinkwasser**
 - Maßgebliche Keime und Indikatorparameter
 - Bestimmung Keimzahl und Organismen
 - Verfahren zur Entkeimung

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Ziele

- Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz (Mensch)
- Produktsicherheit (Lebensmittel → Mensch)
- Umweltsicherheit (Mensch und andere Organismen)

Sterilität und Hygiene erlauben:

- Kontrolle über Art und Anzahl der Mikroorganismen
- Produktionsprozesses und Produktaufarbeitung (Reaktoren und Leitungen)
- Behandlung von Wassermedien (Trinkwasser, Abwasser), Abluft und Abfällen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Ziele: nicht leicht zu definieren!

- **zelluläre oder nichtzelluläre biologische Agenzien**, die fähig sind, sich zu vermehren oder genetisches Material weiterzugeben
 - **Bakterien**
 - **Parasiten (Protozoen: Malaria, Giardien...)**
 - ...
- **Biologische Agenzien**, die Infektionen, Allergien oder toxische Wirkungen auslösen können
 - **Viren**
 - **Prionen** (Glycoprotein, Creutzfeldt-Jakob-Krankheit „Rinderwahnsinn“)
 - **Plasmide** (Ringförmige DNA, vornehmlich in Bakterien, Austausch möglich → Antibiotika-Resistenzen in Belebungsbecken KA)
 - ...

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Bioterroristisch relevante Noxen		
Bakterien <ul style="list-style-type: none">● Bacillus anthracis Milzbrand● Yersinia pestis Pest● Francisella tularensis Tularämie (Hasenpest)● Brucella spec. Brucellose● Coxiella burnetii Q-Fieber● Burkholderia spec. Rotz, Melioidose	Viren <ul style="list-style-type: none">● Variolavirus Pocken● Hämorrhagische Fieber Ebola, Marburg● Virus-Enzephalitiden VEE	Toxine <ul style="list-style-type: none">● Clostridium botulinum Botulinum Toxin● Ricinus communis Rizin● Staphylokokken- Enterotoxin B (SEB)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Inaktivierung:

- vollständige **Zerstörung der biologischen Aktivitäten** von Mikroorganismen und biologischen Agenzien (CEN-Norm 12740)

Sterilisation:

- **Elimination (Abtrennung, Abtötung)** praktisch aller Mikroorganismen. Keimzahl**reduzierung**, so dass höchstens **ein lebender Mikroorganismus in 10^6 sterilisierten Einheiten des Endprodukts** auftritt.
- Sterilisation bezieht sich auf lebensfähige Organismen, während Inaktivierung auch nichtzelluläre biologische Agenzien einschließt.



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Desinfektion:

- gezielte **partielle Verminderung der Keimzahl** (Oberflächen), die normalerweise nicht zur Sterilität führt.
- **Vermeidung Gefährdung**
 - eine sterile Lösung oder Gerät ist also auch automatisch desinfiziert, wohingegen eine Desinfektion noch keine Sterilität bedeutet.
 - praktisch bedeutet dies: Eine Reduktion der Keimzahl um mindestens 5 Zehnerpotenzen

Pasteurisieren:

- Sonderfall: Desinfektion zur Abtötung aller **vegetativen** Zellen (Bakterien, Viren, Protozoen, Pilze):
- **Erhitzen** einer Flüssigkeit auf 80°C (10 min) oder Ultra-Hocherhitzung 130°C-150°C (2-3 sec) (Lebensmittel)

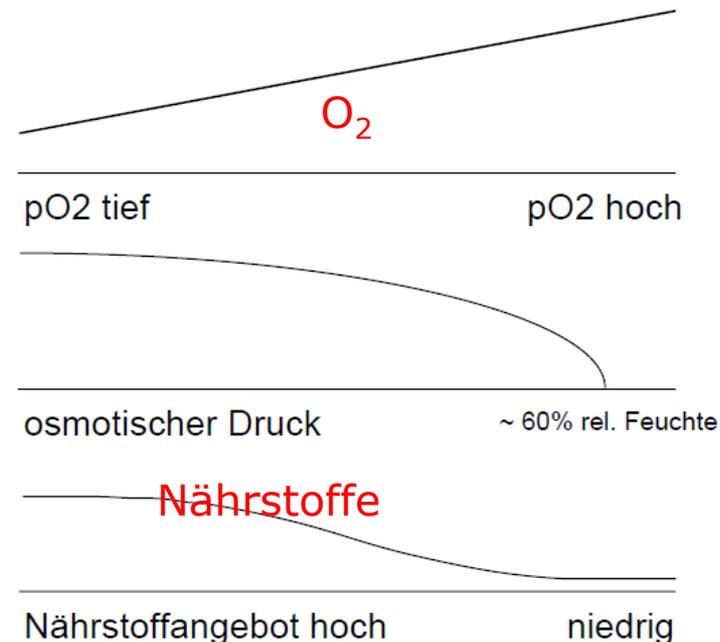
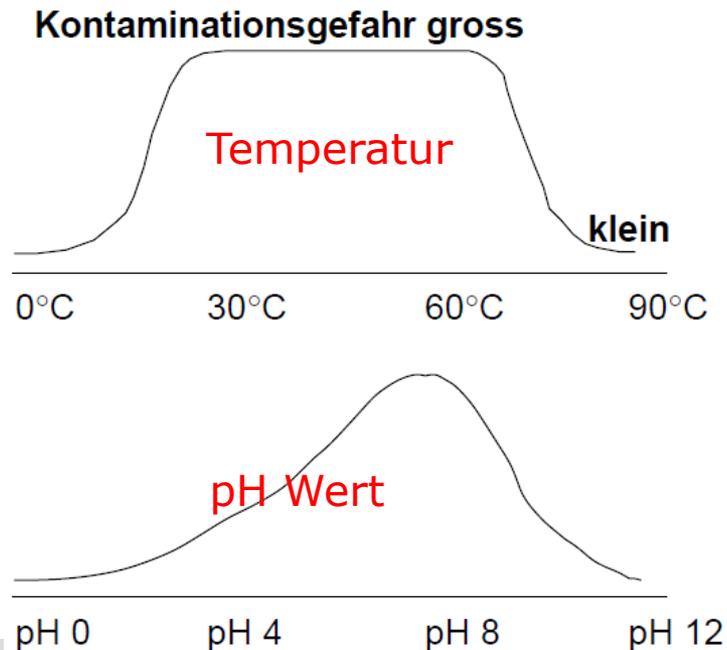
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Kontamination:

- **unerwünscht** eingeschleppte Keime auf Geräten (Laborgeräte) oder Produkten (Lebensmittel) oder anderen Medien (Wasser)

Wichtige Einflussfaktoren



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Es gibt kein universelles **Sterilisationsverfahren**. Die Wahl des Verfahrens richtet sich nach:

- **Eigenschaften des Sterilisationsgutes** (z.B. Temperatur)
- **Art und Umfang der mikrobiellen Kontamination**

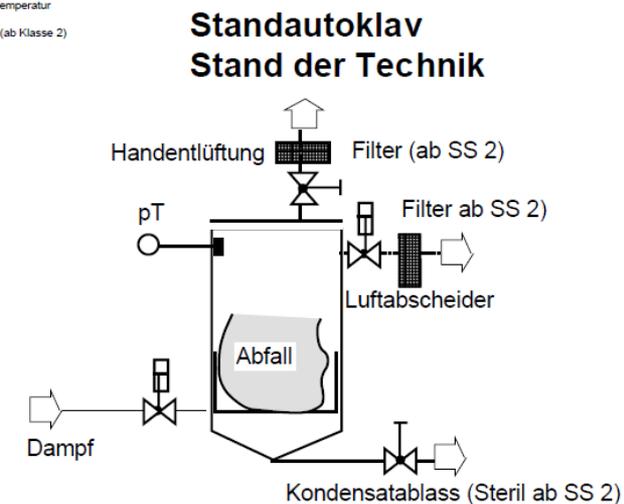
Resistenzstufe	Mikroorganismen (Testkeime)	In der Praxis angewandte Verfahren	Temperatur und Einwirkungszeit	Entspricht dem Wirkungsbereich
1	alle vegetativen Bakterienformen Pilze und Pilzsporen, Viren, Parasiten (Enterococcus faecium)	Pasteurisieren, thermische Desinfektion von Instrumenten, Wäsche, Geschirr	z.B. 62 °C/ 30 min z.B. Heißwasser 85 °C/ 10 min 90 °C/ 5 min	A, B ohne HBV mit HBV
2	Milzbrandsporen (Sporen von Bacillus subtilis)	Dampfdesinfektionsverfahren	z.B. strömender Wasserdampf 100 °C/ 15 min	A, B, C
3	Gasbrand- und Tetanussporen (Sporen von Bacillus stearothermophilus)	Dampfsterilisation	z.B. gespannter Wasserdampf 121 °C/ 15 min oder 134 °C/ 3min	A, B, C, D (entspricht Sterilisation im med. Bereich)
4	höchstthermostabile thermophile Keime, Prionen	längere Dampfsterilisation (nur für Prionen von Bedeutung)	z.B. gespannter Wasserdampf 134 °C/ > 20 min	A, B, C, D + Prionen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Thermisch (feuchte Hitze)

- **Kochen** (100°C)
- **Feuchte Hitze mit Sattdampf** (Autoklaven Dampf 121°C und 1 bar)
- Abtötung durch **Denaturierung von Proteinen** und Hitzezerstörung von Nukleinsäuren
- Resistenzen: thermophile Endosporen, Tetanus
- Krankenhaus, Labore, dezentrale „Abkocheempfehlungen“ bei TW (hoher Energieverbrauch)
- **nicht** geeignet für **zentrale TW-Versorgung**



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Thermisch (trockene Hitze)

- **Heissluftsterilisation, Ausglühen, Abflammen**
- Instrumente und hitzestabile Geräteteile, weniger wirksam als Wasserdampf

→ höhere Temperaturen und längere Einwirkungszeiten

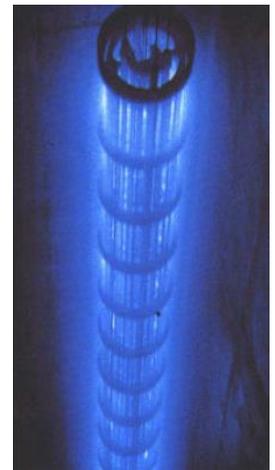


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Strahlung

- **γ -Strahlung Kobalt Co60**
 - z.T. hohe Dosen notwendig, die das Sterilgut verändern (z.B. manche Kunststoffe)
 - Behälter, verpackte Gegenstände, pharmazeutische Produkte
- **UV-Strahlung**
 - Oberflächenbehandlung, geringe Eindringtiefe (Poren, Schmutz etc.)
 - **Luft** (klinischer Bereich) und **Wasser (Wasseraufbereitung)**:
 - nur bei genügend langer **Kontaktzeit** wirksam
 - **keine Depotwirkung**



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

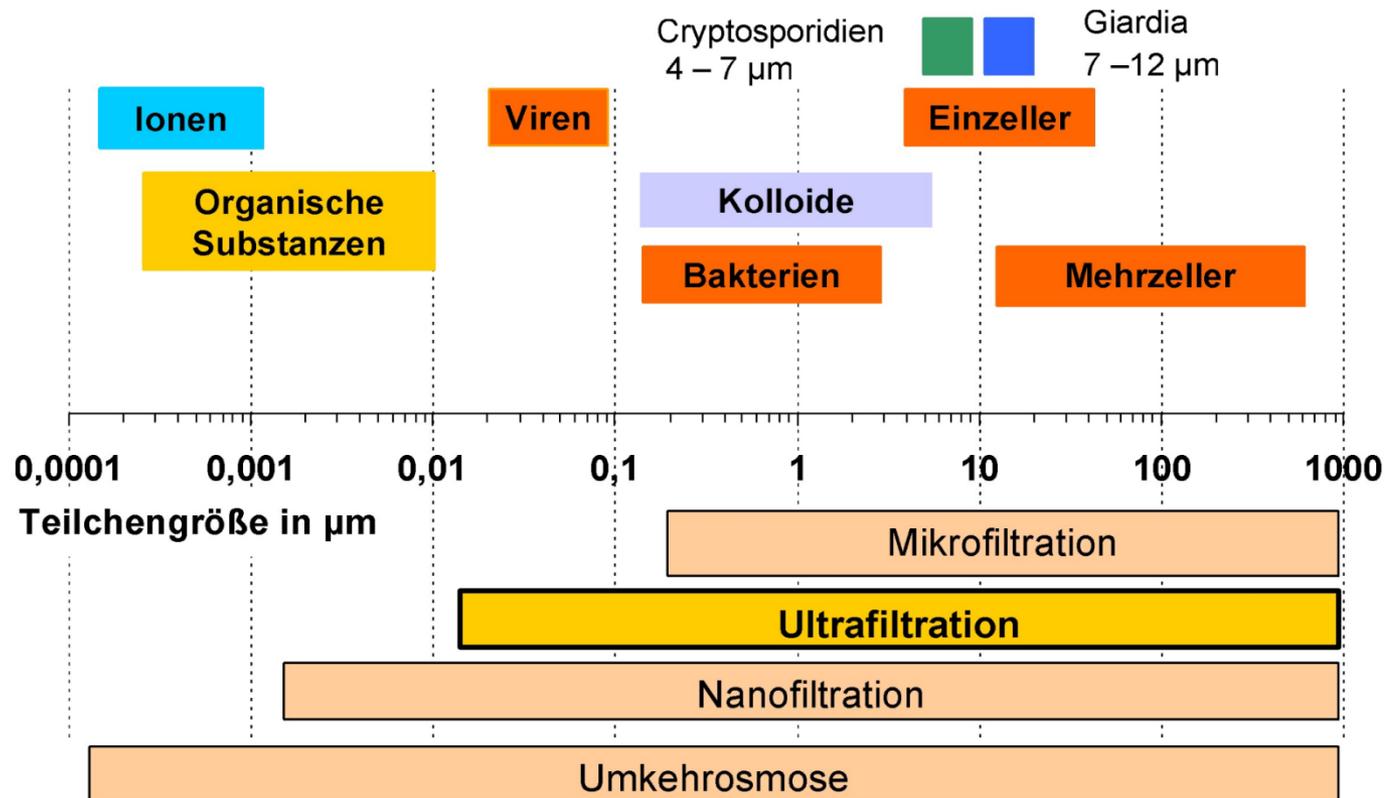
Filtration

- Je nach **Porengröße** und **Filtrationsverfahren**:
 - Keimzahlreduktion
 - Keimentfernung
- Porengrößen für Filtration von Flüssigkeiten: 0,2 µm oder 0,45 µm
- Scheibenfilter oder Filterkerzen für **Flüssigkeiten**
- Tiefenfilter (z.B. HEPA oder Hosch) für **Luftfiltration** (Adsorption von Partikeln)
- Für **Viren** spezielle Adsorptions- und Ultrafilter

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Wirksamkeit von **Filtrationsverfahren** bezüglich der **Größe von Krankheitserregern**

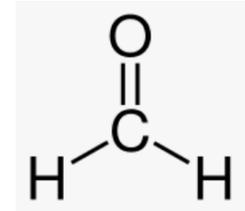


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

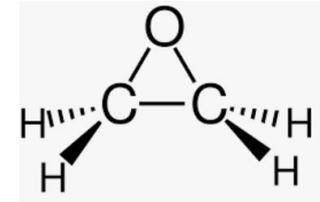
- **Formaldehyd 2-5 %**

- geeignet für Bakterien und Bakteriensporen
- toxisch, cancerogenes Potenzial



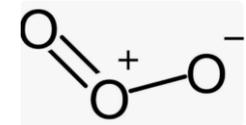
- **Ethylenoxid**

- geeignet für Pilze, Bakterien und Viren
- Luft explosive Gemische → Vakuumverfahren
- toxisch



- **Ozon**

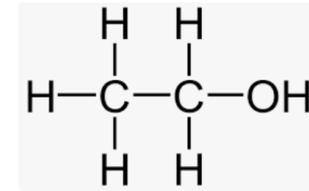
- geeignet für Pilze, Bakterien und Viren
- toxisch, wenig stabil
- Aufbereitung von **Trink- und Badewasser**



Naturwissenschaftliche Grundlagen

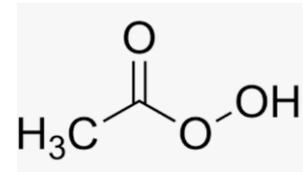
Entkeimung

- wässrige **Alkohollösungen** von Ethylalkohol/ Propylalkohol, mind. 2 Min. Einwirkungszeit



- **Peressigsäure**

- Historischer Einsatz in DDR und Abwasser in England
- bei pH 2 bis 3,5
- sehr breites Spektrum: Bakterien, Bakteriensporen, Viren, Pilze



- **Halogene**

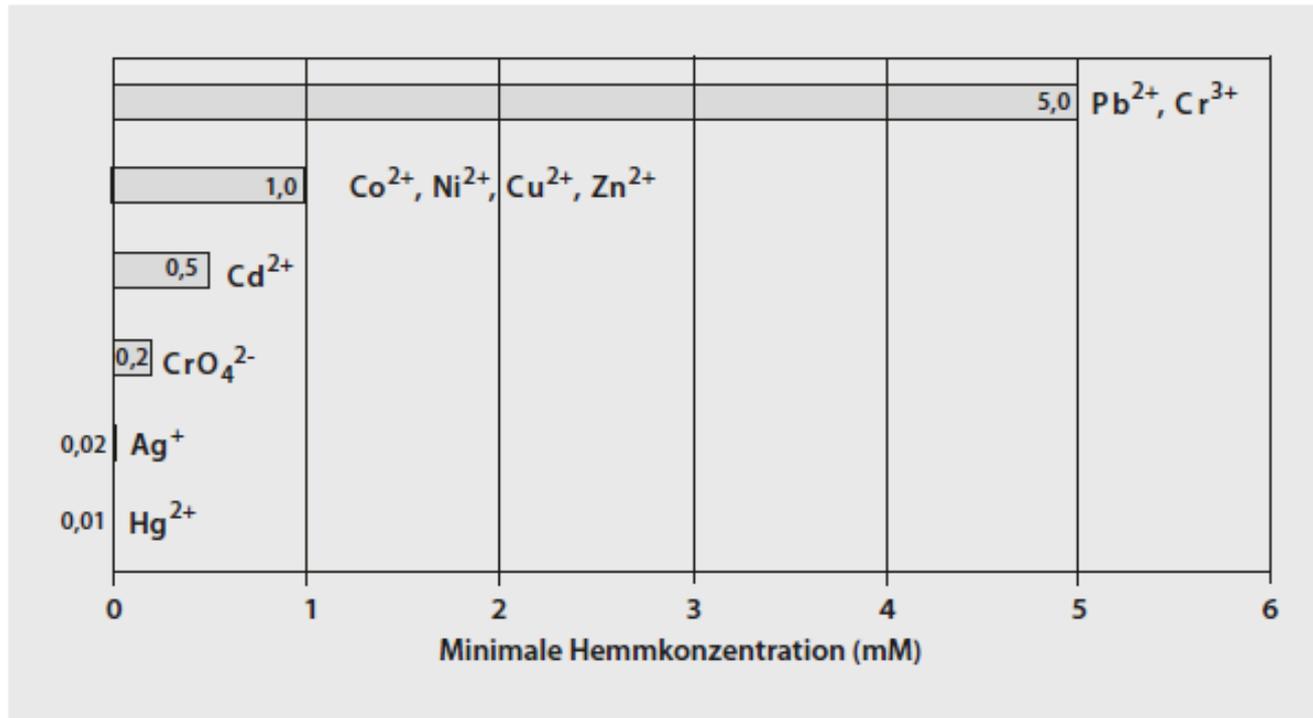
- **Chlor, Natriumhypochlorit** bei pH 4 bis 6,5; **Jod**
- breites Spektrum: Bakterien, Bakteriensporen, Viren

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

Schwermetalle

- **Schiffsfarben** (Kupfer) und **Textilien** (Silber)
- in Trinkwasser i.d.R. keine Option



■ Abb. 9.1 Minimale Hemmkonzentration von Schwermetallen gegenüber *Escherichia coli* (Werte aus Nies 1999)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung

	Wirkbereich	Wirkung	Abbaubarkeit	Korrosion	Bemerkung
Alkohole	A, (B)	schnell	+++	0	Explosiv, Flammbar
Aldehyde	A, B, C	mittel	+++	0	Allergisierend
Phenol	A	mittel	+	0	geringer Eiweißfehler Toxisch
Oberflächenaktive Substanzen	(A)	mittel	++	0	teilweise Wirkungslücken, großer Eiweißfehler
Halogenabspalter	A, B, C	mittel	++	+	lang anhaltende Wirkung
Peroxide	A, B, C	schnell	+++	++	instabil
Metalle	A	mittel	+	0	
Säuren, Laugen	A	mittel	++	+	

A Vegetative Bakterien, Pilze
B Viren

C Sporen von *Bacillus anthracis*
D Sporen von *Clostridium perfringens*
(Gasbrand, anaerob)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Anwendung Trinkwasser:

Krankheitserreger: vorwiegend **Bakterien**, übertragbar durch Abwasser/ Trinkwasser

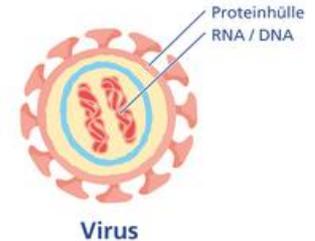
Bakterien	Krankheit
<i>Salmonella</i>	Typhus, Paratyphus
<i>Shigella</i>	Ruhr
<i>Vibrio cholerae</i>	Cholera
<i>Pseudomonas</i>	u.a. Atemwegserkrankungen
<i>Legionella pneumophila</i>	Lungenentzündung, Pontiacfieber

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

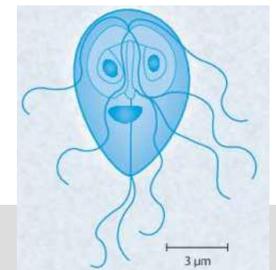
Viren

- kleiner als Bakterien
- **Corona** (aerosol vermittelt infektiös)
- mögliche Exposition **Wasser: Fäkalverunreinigungen bei Polio (Kinderlähmung), Hepatitis A, Noroviren, Rotaviren**



Parasiten (Protozoen)

- einzellige Parasiten, die zu heftigen Durchfällen und unspezifischen Allgemeinbeschwerden führen
- **Malaria** (Übertragung Mücken), **Toxoplasmose** (Übertragung Haustiere)
- mögliche Exposition **Wasser: Fäkalverunreinigungen bei Cryptosporidien, Giardien**



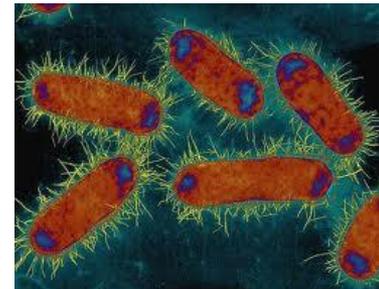
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Indikatorparameter

- **Kolonienzahl KBE** (koloniebildende Einheiten (auch Keimzahl (KZ) genannt) bei unterschiedlichen **Temperaturen** zu messen
- **Bakterien Escherichia coli** sowie **coliforme Bakterien** (**Gruppe von Bakterien**, selbst nicht krankheitserregend (EHEC, pathogene Untervariante), aber „**frische**“ fäkale Verschmutzungen anzeigend
- **Bakterien Enterokokken** (Streptokokken, Harnwegsinfekte): zeigen „**ältere**“ Verschmutzungen an
- **spezieller Verdacht oder spezielle Nutzungen**
→ *Legionella pneumophila*, *Pseudomonas aeruginosa* (Grenzwert für Badewasser) oder *Salmonellen*

Colibakterien



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Indikatorparameter

Kolonienzahl

Grenzwert TVO

100/ ml (22°C)

Coliforme Bakterien

(Gruppe: Enterobacter, Klebsiella...)

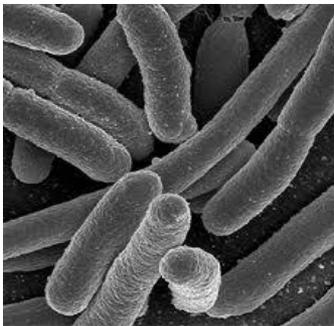
0/ 100 ml

Escherichia coli (E. coli)

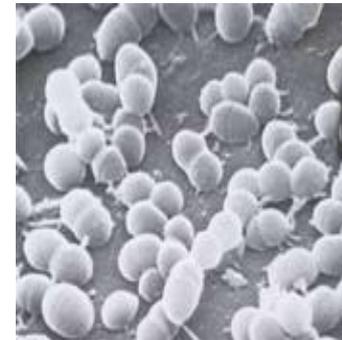
0/ 100 ml

Enterokokken

0/ 250 ml



E. coli



Enterokokken

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Bestimmung Kolonienzahl

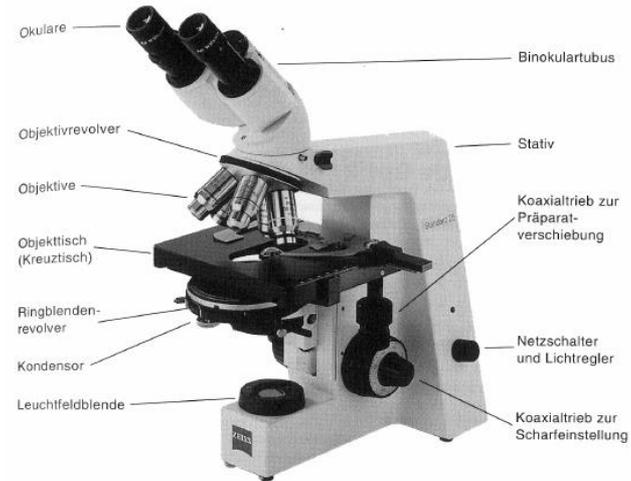
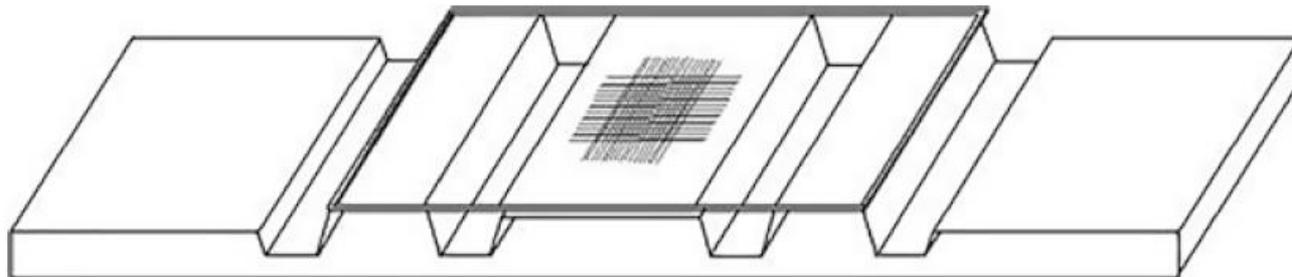


Abb. 19: Labormikroskop mit Phasenkontrasteinrichtung (Zeiss)

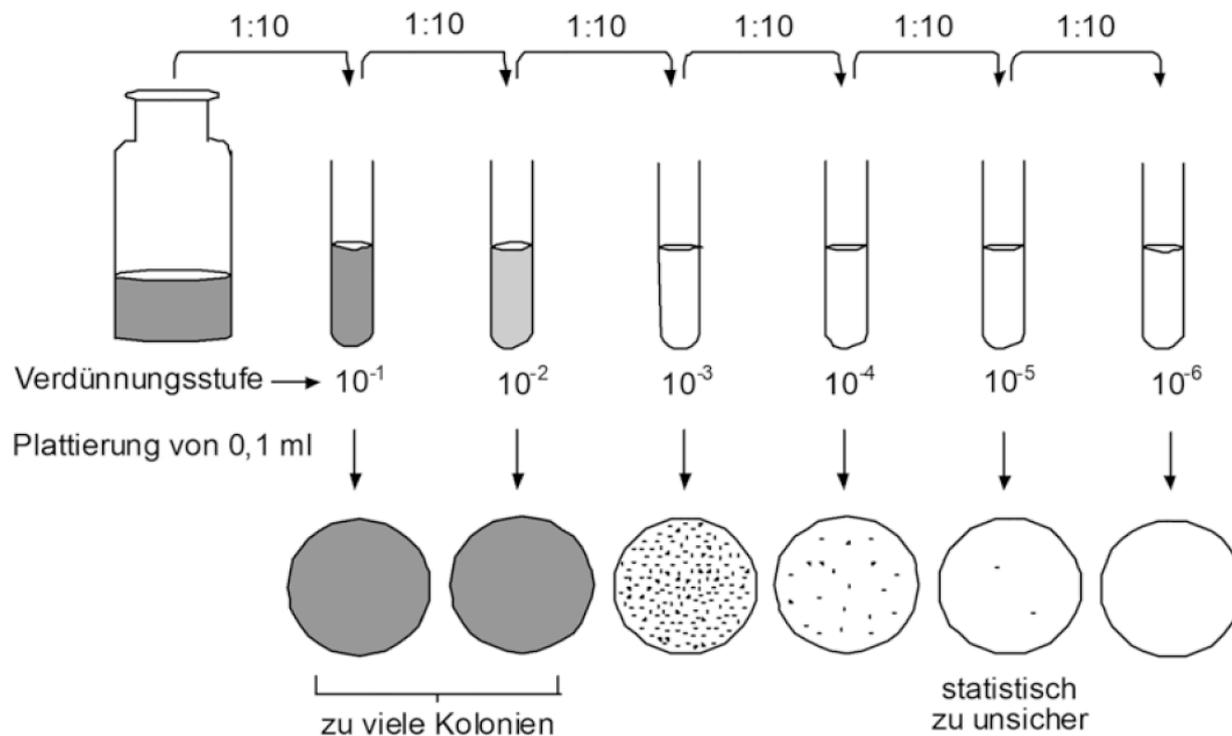


■ Abb. 11.1 Zählkammer zur Bestimmung von Gesamtkeimzahlen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Bestimmung Kolonienzahl



■ Abb. 11.4 Bestimmung der Lebendkeimzahl einer Probe auf festen Nährböden

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

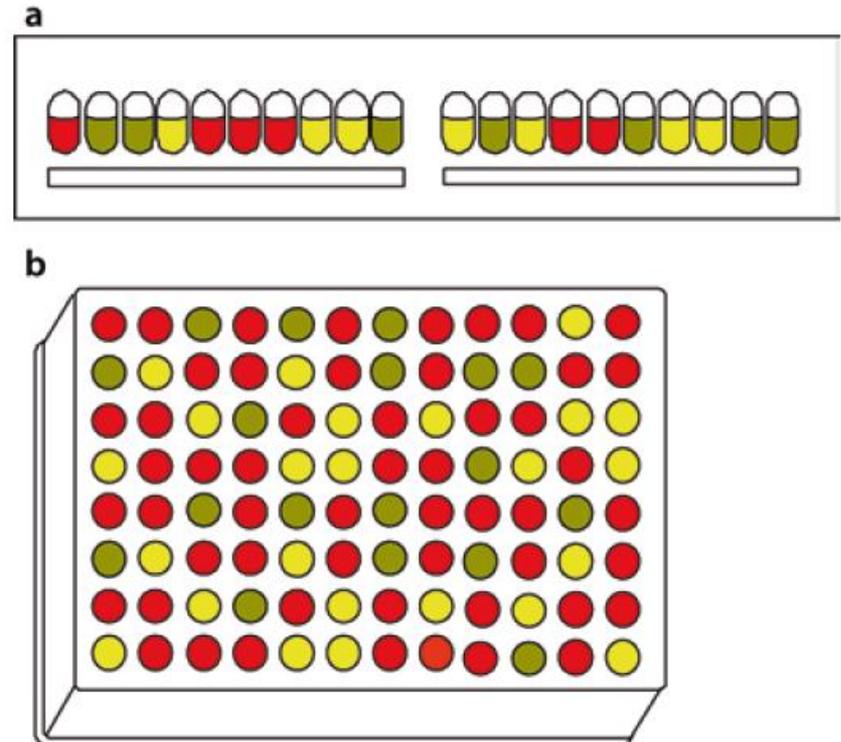
Bestimmung selektiver Kulturen:

E Coli/ Coliforme:

- Oxidase-Test negativ (kein Farbumschlag)
- Indol-Test positiv (rote Färbung)
- ...

Stoffwechsel- und Resistenzeigenschaften nutzendes, mehrstufiges Identifizierungsverfahren

→ Identifikation dauert mehrere Tage



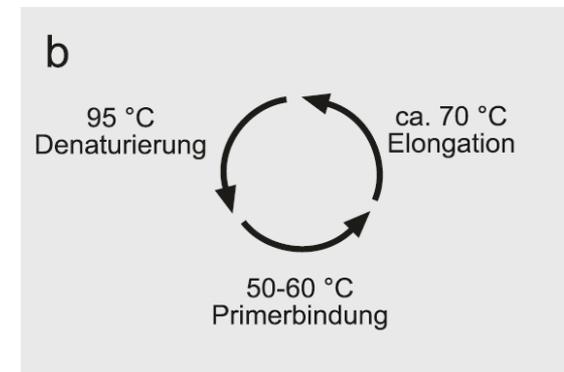
■ **Abb. 11.13** Bakterienidentifizierung durch gleichzeitiges Austesten mehrerer Stoffwechseleigenschaften in a „Bunten Reihen“ oder b Tests zur Substratoxidation in Mikrotiterplatten in Gegenwart eines Redoxfarbstoffes

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Bestimmung selektiver Organismen mit PCR (Polymerase Chain Reaction) (Mullis 1985, Nobelpreis)

- drei Schritte zur **Vervielfältigung DNA** zur anschließenden **Detektion**
- Nachweise spezifische **DNA Anteile mit Elektrophorese** oder anderen Methoden (z.B. Fluoreszenz)
- Ausmaß an **Sequenzähnlichkeit** zeigt, wie nah verwandt die jeweiligen Organismen miteinander sind.



Naturwissenschaftliche Grundlagen

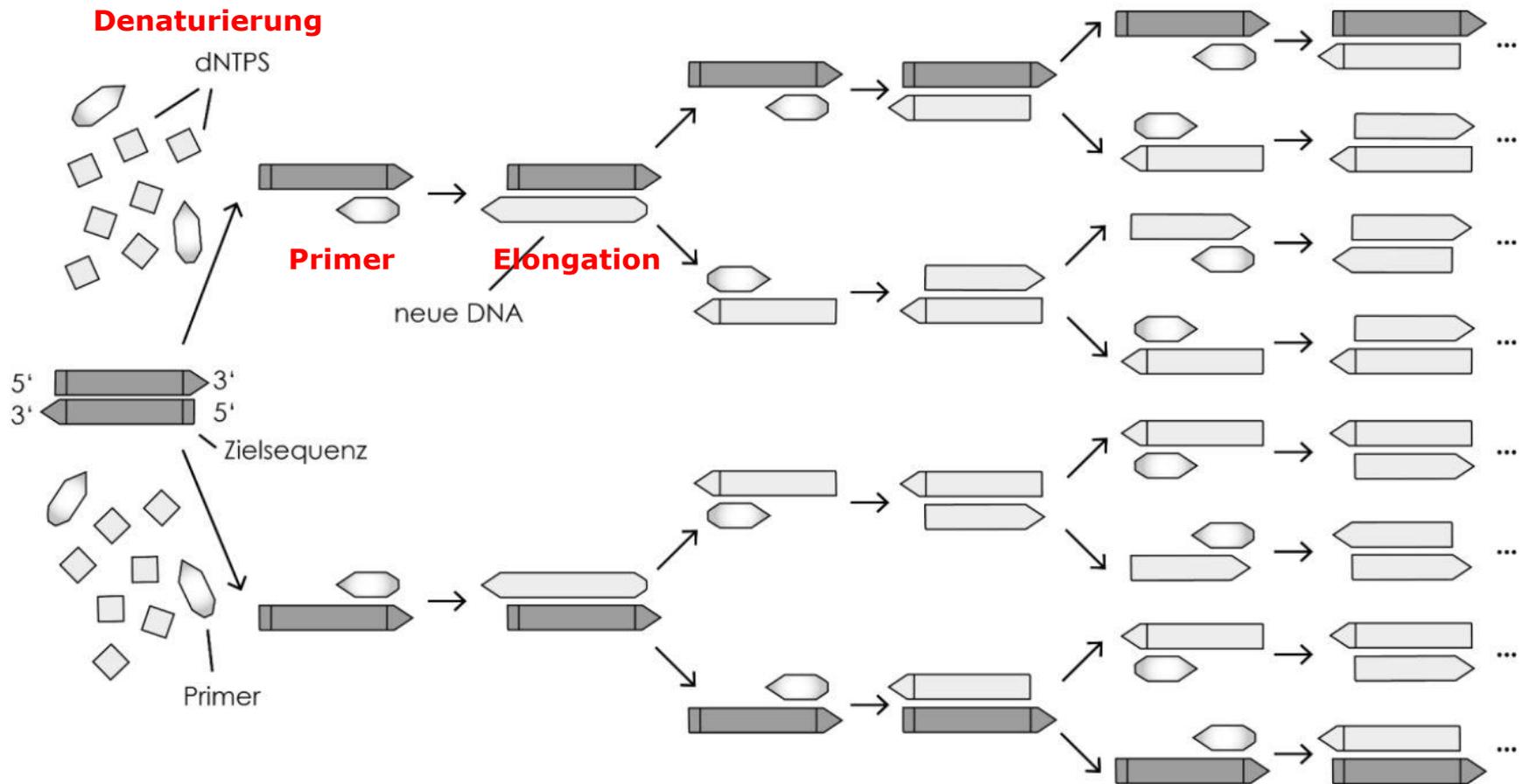
Entkeimung, Trinkwasser

Bestimmung selektiver Organismen mit PCR (Polymerase Chain Reaction)

- **Denaturierung (95°C):** Trennung DNA Doppelstrang in Einzelstränge
- **Primer-Bindung (50 bis 60°C):** Primer (zwei nötig): kurze einsträngige DNA-Moleküle (Länge ca. 20 Basen), Auswahl definiert Ergebnis, markieren Anfang/ Ende des amplifizierten DNA-Abschnittes
- **Elongation (70°C):** Taq-Polymerase baut die passenden Nukleotide
→ zwei komplette Doppelstränge (ab hier Wdh. ca. 25-35 mal → exponentielle Amplifikation 2^{25} -fach bis 2^{35} -fach) Taq Polymerasen (Bakterium *Thermus aquaticus*)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

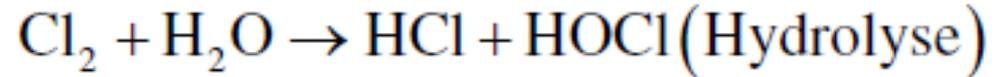
Anwendungen PCR (Polymerase Chain Reaction)

- **Erbgutbestimmung** (Vaterschaftstests, genetische Krankheiten...)
- **Forensik**
- Identifikation von **Infektionen** (Streptokokken, Corona....)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Chlorgasverfahren:



- **Prinzip:**

- Chlorgas reagiert im Wasser zu hypochloriger Säure HOCl (starkes Oxidationsmittel) und Salzsäure

- **Nachteile:**

- Entstehung chlorierte organische Verbindungen (Chloroform)
- Geschmackbeeinträchtigungen möglich
- ca. 30 Minuten Einwirkzeit erforderlich
- Hantieren mit einem Gift → Überdosierung möglich
- Grenzwert in TVO: 0,3 mg/l

- **Vorteile:**

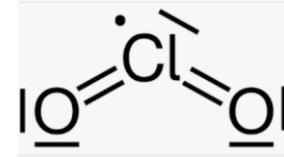
- geringe Investitions- und Betriebskosten
- Depotwirkung (Schutz bei Fernwasserleitungen)



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Chlordioxidverfahren:



- **Prinzip:**

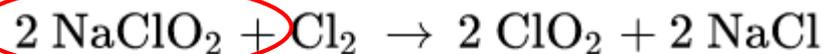
- Oxidation Zellbestandteile (Enzyme)

- **Vorteile:**

- geringere Bildung von chlororganischen Verbindungen
- desinfizierende Wirkung 2,5 * größer als bei Chlorgas
- Chlordioxid ist stabiler im Rohrnetz als Chlor

- **Nachteile:**

- Chlordioxid muss vor Ort aus Chlorit und Chlor → Kosten höher
- Unerwünschte Wirkung Chlorit ClO_2^- (Methhämoglobinämie) → Grenzwert in TVO: 0,2 mg/l



Wartung und Betrieb aufwendig (Sachkunde/Firma)

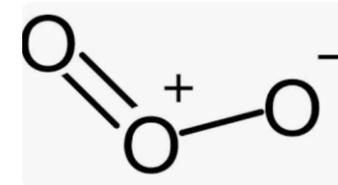
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Ozon (O_3):

- **Prinzip:**

- Oxidation Zellbestandteile



- **Vorteile:**

- Kein Entstehen von chlororganischen Verbindungen
- Keine Geschmacksveränderung

- **Nachteile:**

- Keine Depotwirkung in langen Netzen, wird sofort abgebaut



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

UV-Desinfektion:

- **Vorteile:**

- unproblematisches Verfahren (keine gefährlichen Stoffen keine Veränderung des Trinkwassers durch Zusatzstoffe)
- Betriebskosten niedrig
- Platzbedarf niedriger als bei Chlorverfahren

- **Nachteile:**

- Nachhaltigkeit (Depotwirkung) nicht vorhanden
- Investitionskosten wie Chlordioxidverfahren



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Maßnahmen und ihre Wirksamkeit

Verfahren	Mikroorganismen einschließlich Krankheitserreger					
	einzeln, frei suspendiert			in Partikeln fäkalen Ursprungs		
	Bakterien	Viren	Parasiten	Bakterien	Viren	Parasiten
Filtration ¹⁾	+	+	+	+	+	+
Chlor/Chlordioxid	+	+	-	-	-	-
Ozon	+	+	+ ²⁾	-	-	-
UV	+	+	+	-	-	-
thermisch (>90° C)	+	+	+	+	+	+

- 1) gilt als seuchenhygienisch ausreichend, wenn Koloniezahl im Filtrat < 100/ml und keine E.coli und coliforme Keime in 100 ml.
- 2) gute Wirkung im Labor, praktische Erfahrungen fehlen bislang

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Entkeimung, Trinkwasser

Einhaltung Grenzwerte deutschlandweit (2017-2019):
ca. 98,7 bis 100 %

Qualität des Trinkwassers aus größeren Wasserwerken Deutschlands (Versorgungsgebiet Wasserabnahme > 1 000 m³ pro Tag oder mehr als 5 000 versorgte Einwohner)

Parameter	Grenzwert nach TrinkwV	Anzahl der gesamten Messungen			Anzahl der Messungen mit Einhaltung des Grenzwerts			Anzahl der Messungen mit Nichteinhaltung des Grenzwerts			Anteil der Messungen mit Einhaltung des Grenzwerts in Prozent		
		2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Geruch	2 bei 12 °C 3 bei 25 °C	77.475	76.458	77.602	77.350	76.327	77.541	125	131	61	99,3	99,8	99,9
Trübung	1,0 NTU	75.672	49.723	75.111	75.468	49.560	74.849	204	163	262	99,0	99,7	99,7
Färbung	0,5 m-1	68.932	69.453	70.349	68.894	69.402	70.272	38	51	77	99,9	99,9	99,9
Leitfähigkeit	2000 µS cm-1	77.726	75.909	74.261	77.726	75.907	74.260	0	2	1	100	100	100
pH-Wert	nicht unter 6,5 nicht über 9,5	71.466	71.548	71.222	71.458	71.528	71.193	8	20	29	99,9	100	100
Blei	0,01 mg/l	14.239	14.210	14.848	14.142	14.130	14.771	97	80	77	99,8	99,4	99,5
Kupfer	2 mg/l	13.303	13.552	13.985	13.288	13.535	13.971	15	17	14	99,8	99,9	99,9
Nickel	0,02 mg/l	14.243	14.314	14.938	14.210	14.267	14.888	33	47	50	99,9	99,7	99,7
Nitrat	50 mg/l	17.296	16.884	16.561	17.284	16.881	16.559	12	3	2	99,9	100	100
Pestizide	0,0001 mg/l	200.480	247.101	299.025	200.475	247.095	299.023	5	6	2	100	100	100
Escherichia coli (E. coli)	0 in 100 ml	119.357	117.981	118.860	119.335	117.947	118.834	22	34	26	99,9	100	100
Enterokokken	0 in 100 ml	22.282	63.606	71.050	22.256	63.532	70.955	26	74	95	99,9	99,9	99,9
Coliforme Bakterien	0 in 100 ml	119.105	118.215	118.675	117.938	116.712	117.629	1.167	1.503	1.046	100	98,7	99,1
Koloniezahl 22 °C	*ohne anormale Veränderung oder *100/ml (*20/ml für desinfiziertes Wasser)	119.279	115.912	114.342	119.047	115.653	114.135	232	259	207	99,8	99,8	99,8

*abhängig vom Untersuchungsverfahren

Quelle: Umweltbundesamt (Hrsg.), Bericht des Bundesministeriums für Gesundheit und des Umweltbundesamtes an die Verbraucherinnen und Verbraucher über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) in Deutschland (2017 - 2019)

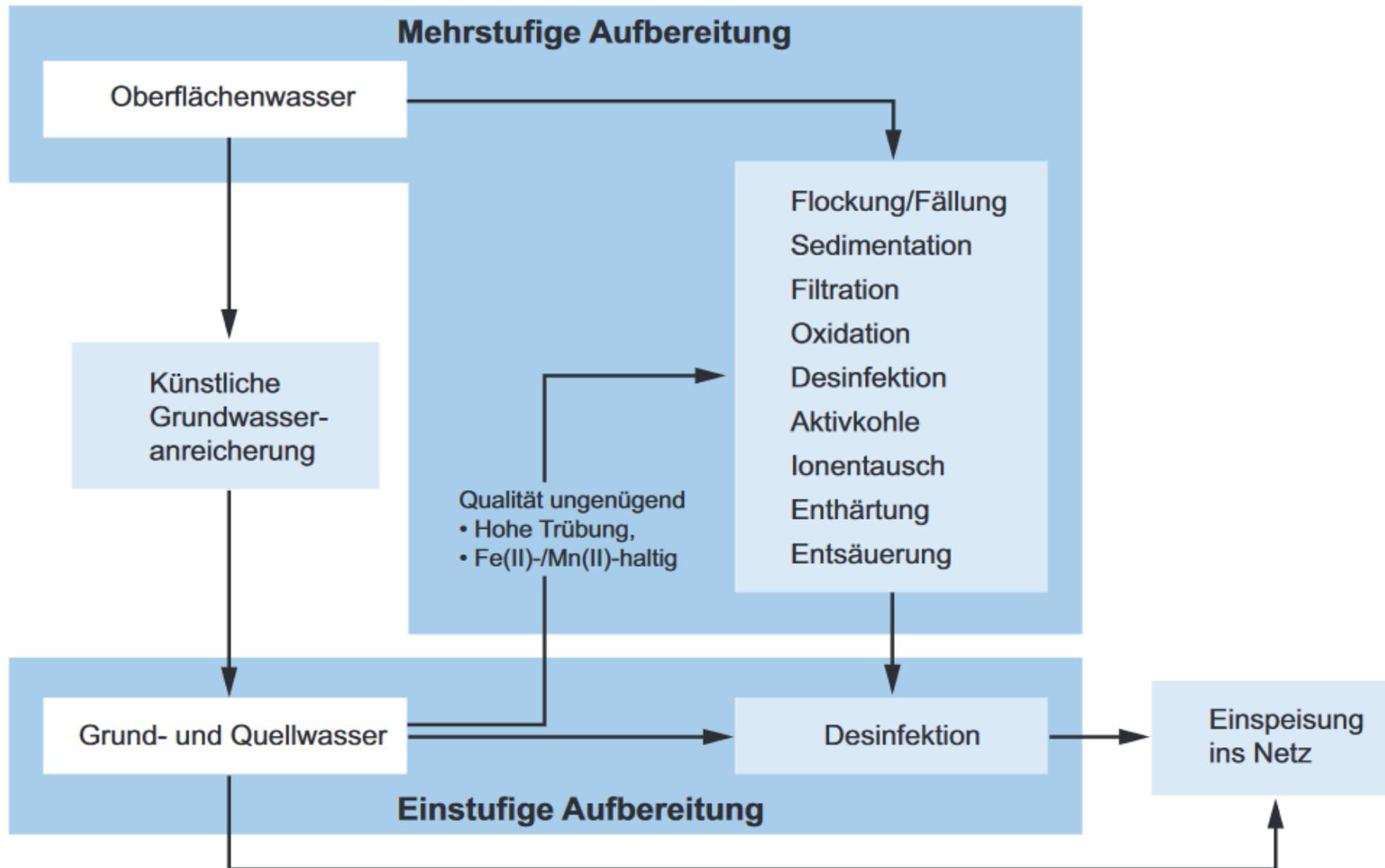


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Aufbereitungsmethoden für Grund-, Quell- und Oberflächenwasser