

*Abwasser wird behandelt, damit die Natur am Leben bleibt.  
Trinkwasser wird aufbereitet, damit der Mensch weiterleben kann.*

## Hydrochemie der Wasseraufbereitung

Begleitmaterial zur Lehrveranstaltung  
des LS Wassertechnik & Siedlungswasserbau der BTU-Cottbus



ISBN 3-934294-14-0

Ralph Schöpke

## Hydrochemie der Wasseraufbereitung

Wasseraufbereitungstechnologien in der Übersicht

Bemessung der Grundwasseraufbereitung

▶ Bemessung der Oberflächenwasseraufbereitung

# Wasseraufbereitungstechnologien in der Übersicht



Grundwässer der Lausitz

Aufbereitungserfordernis

Grundwasseraufbereitung

Oberflächenwasseraufbereitung

*Abwasser wird befundet, damit die Natur am Leben bleibt.  
Trinkwasser wird aufbereitet, damit der Mensch weiterleben kann.*

**Hydrochemie der Wasseraufbereitung**

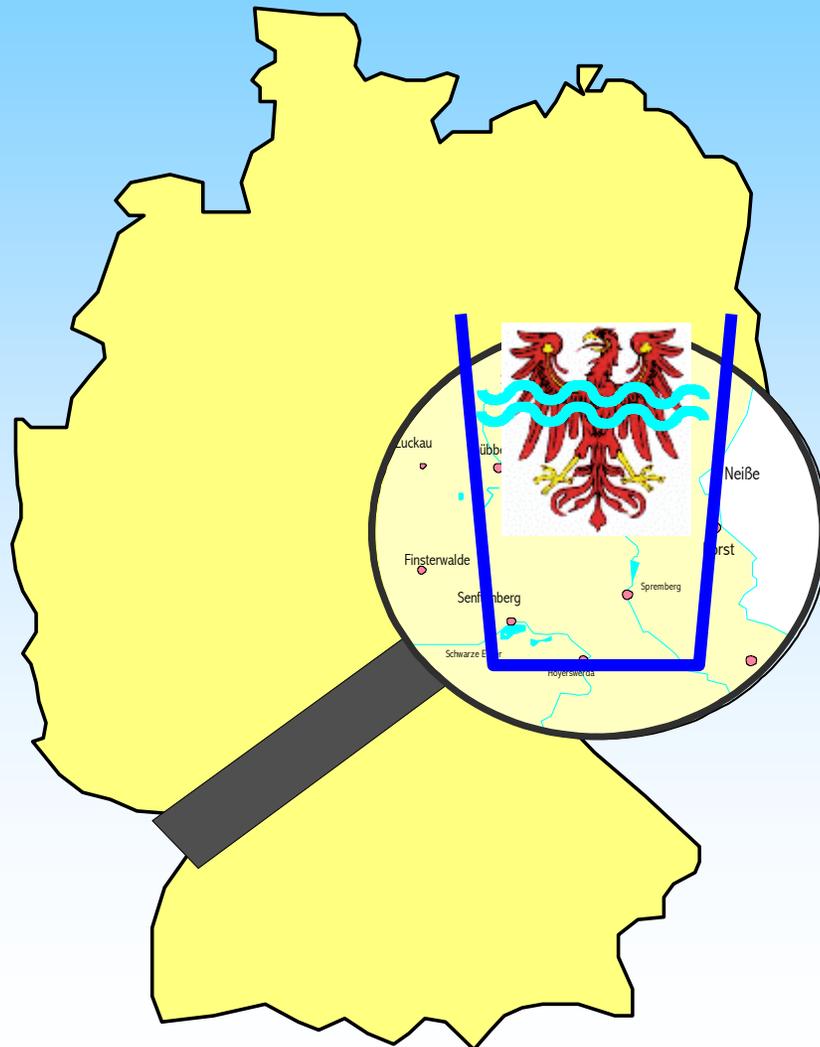
Begleitmaterial zur Lehrveranstaltung  
des LS Wassertechnik & Siedlungswasserbau der BTU-Cottbus



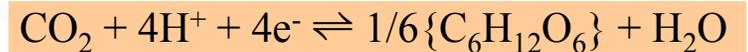
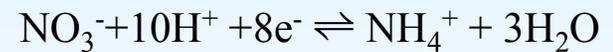
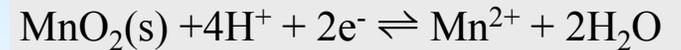
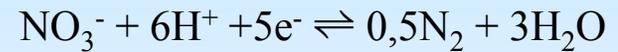
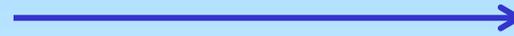
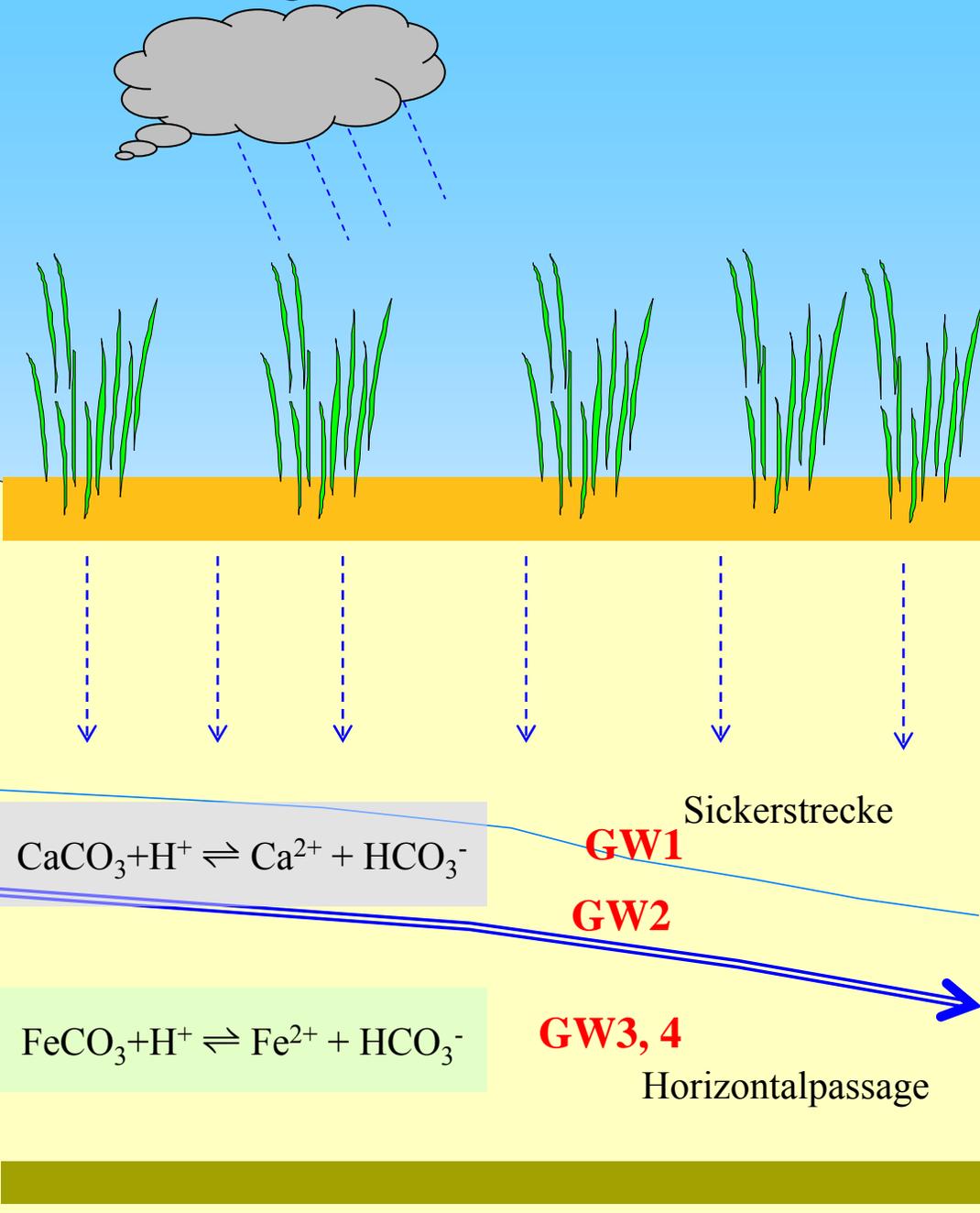
ISBN 3-934204-14-0

Ralph Schöpfke

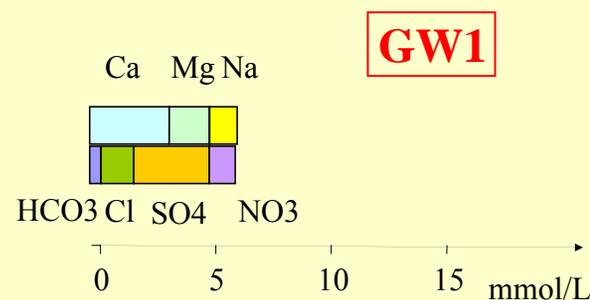
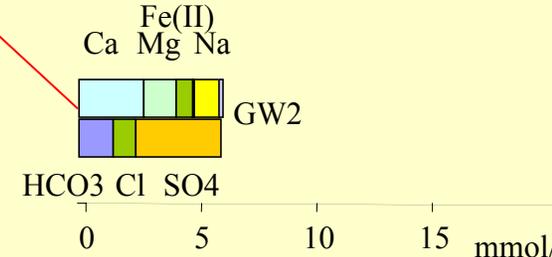
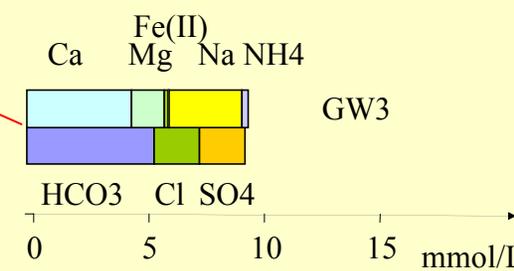
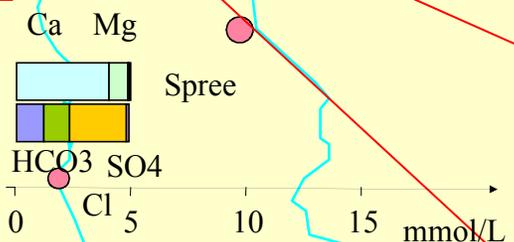
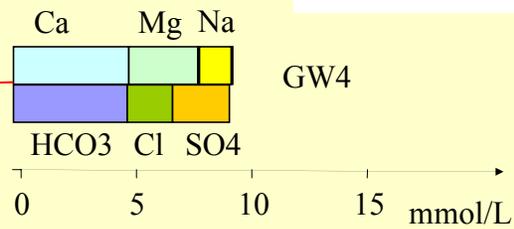
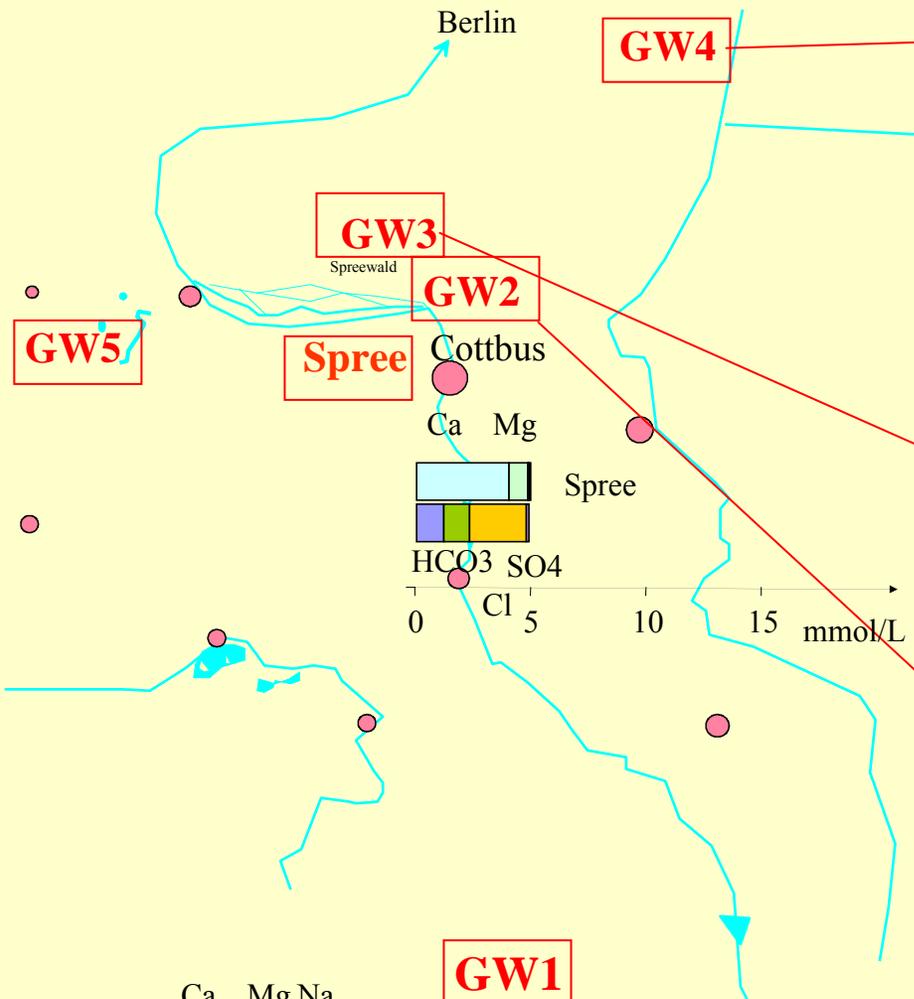
<http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/de/wassertechnik-und-siedlungswasserbau/lehre/skripte/vorlesungen.html>



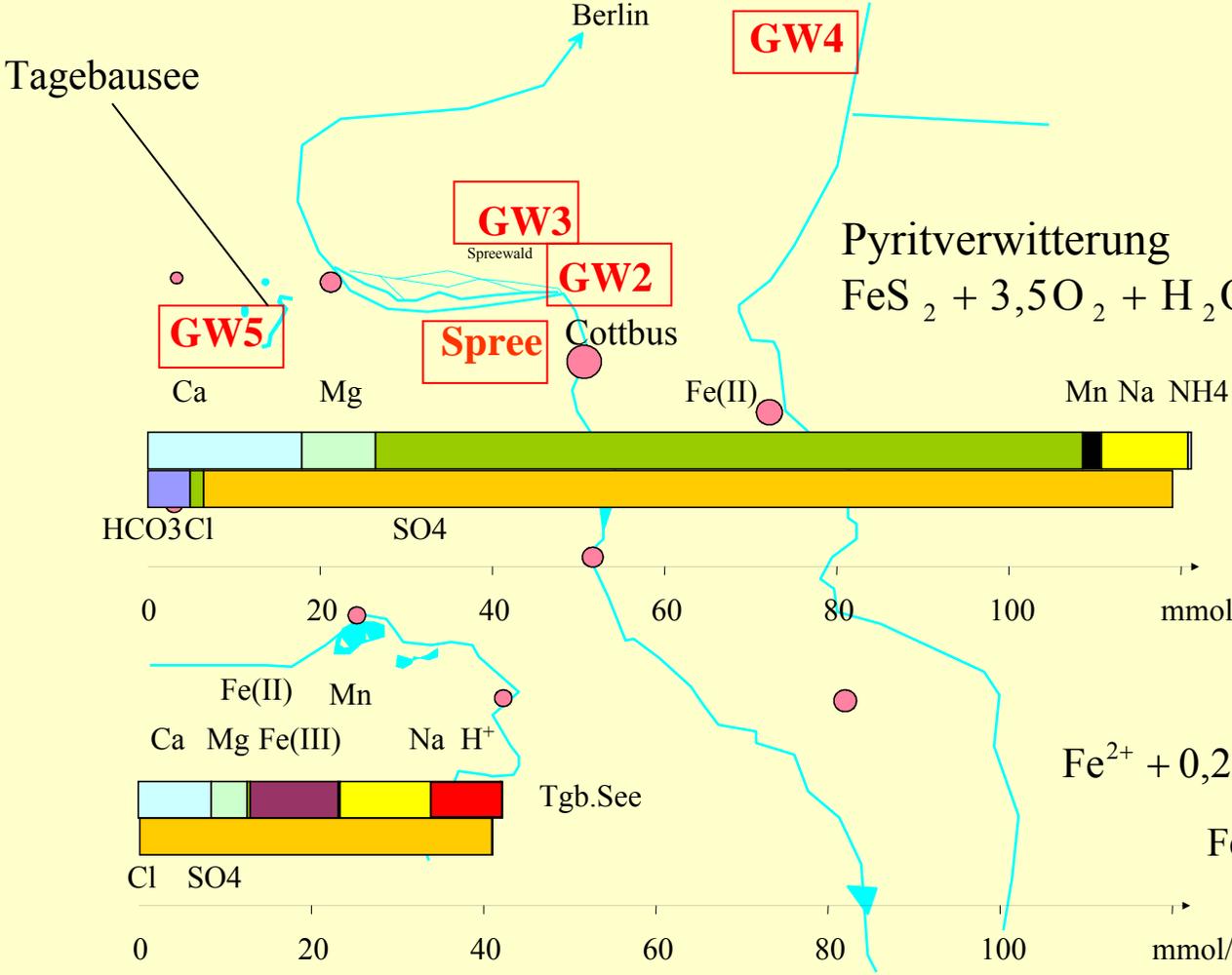
# Entstehung von Grundwasser



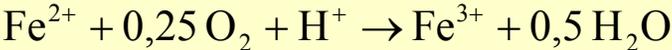
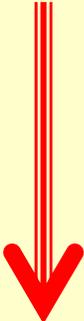
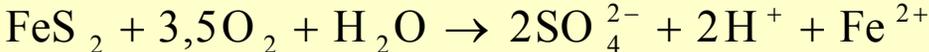
# Wasserbeschaffenheiten



# Wasserbeschaffenheiten



Pyritverwitterung

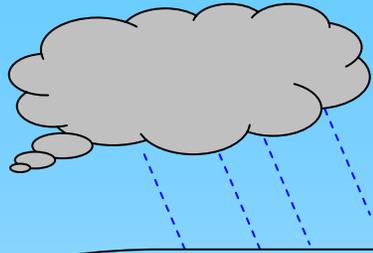


Parameter		GW 1	GW 2	GW 3	GW 4	GW 5	Tagebau seen	Spree	
Bez	Einheit								
Temperatur	°C	10				12	0..25	0...25	
<b>pH</b>	1	5,9	6,7	7,2	7,1	5,8	2,2	6,5...8,5	
<b>Ltf</b>	µS/cm	170	400	600	920	5 940	3 000	650	
<b>KS<sub>4,3</sub></b>	mmol/l	0,5	1,5	5,6	5	5	-15	1..1,5	
<b>K<sub>B8,2</sub></b>	mmol/ l	1,7	1	0,84	1			0..0,2	
<b>GH</b>	°dH	14,3	12	17	22,4	74	35	16	
<b>Ca<sup>++</sup></b>	mg/l	69	56	91	100	357	170	90	
<b>Mg<sup>++</sup></b>	mg/l	21	17	17	36	103	50	14	
<b>KH</b>	°dH	1,4	4,2	16	14	14	***	2,8...4,2	
<b>CO<sub>2</sub></b>	mg/l	75	44	37	44			0..10	
<b>O<sub>2</sub></b>	mg/l	3	anaerob					> 0	6..10
<b>Fe-G</b>	mg/l	0,11	20	5	1,4	2 300	200	2	
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	mg/l	0,04	20	5	1,4	2 300	< 10	< 1	
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	mg/l	0,06	2	0,3	0,3	60	6	< 0,6	
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	mg/l	0	3	5	0,9	6,7	4	< 2	
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	mg/l	70	<0,1	<0,1	<0,1	60	5	< 20	
<b>SO<sub>4</sub><sup>--</sup></b>	mg/l	160	180	96	120	5 500	2 000	120	

natürliche Grundwässer

bergbauversauert

# Grundwasseraufbereitung



Grundwasser enthält meist zu hohe Konzentrationen an:

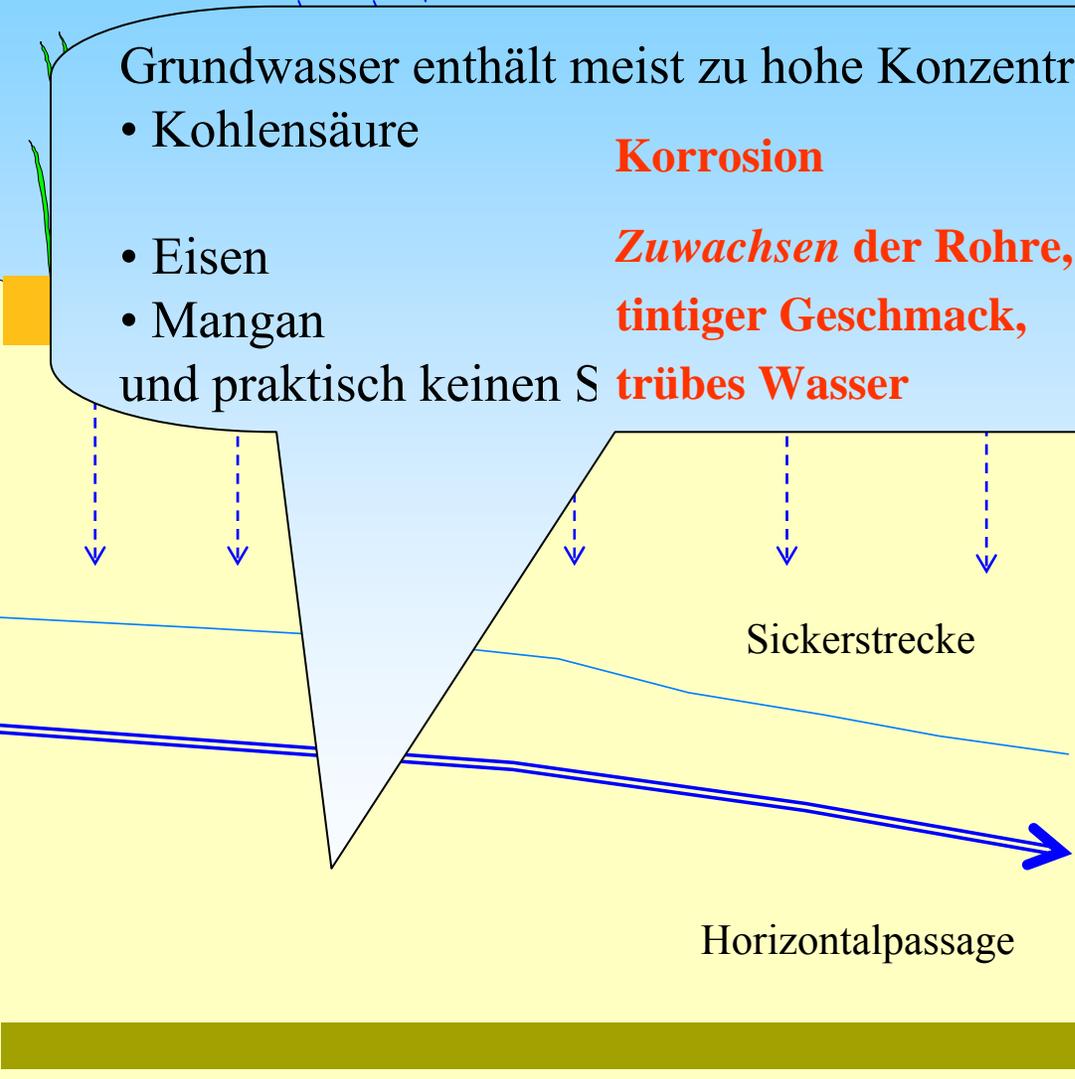
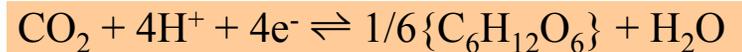
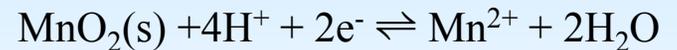
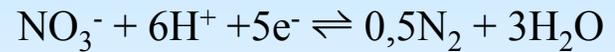
- Kohlensäure
- Eisen
- Mangan

und praktisch keinen Sauerstoff

**Korrosion**

**Zuwachsen der Rohre,  
tintiger Geschmack,**

**trübes Wasser**



# Grundwasseraufbereitung (Beispielgrundwasser)

## Verfahrensvorauswahl

Parameter	Wert	c	
	mg/L	mmol/L	
pH	7,10		7,49
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	305	5,00	KKGI
Ca <sup>2+</sup>	100,0	2,49	KKGI
Fe-G	1,40	0,03	0,20
Fe <sup>2+</sup>	1,40	0,03	
Mn <sup>2+</sup>	0,30	0,00	0,05
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,90	0,05	
CO <sub>2</sub>	44	1,00	KKGI

KKGI = Calcitsättigung

$$\text{pH}_{\text{Gl}} = -8,35 + 0,24 - \lg 2,5 - \lg 5 = 7,49$$

$$\text{SI} = 7,1 - 7,49 = -0,39$$

kalkaggressiv unter Berücksichtigung säurebildender  
Behandlungsprozesse

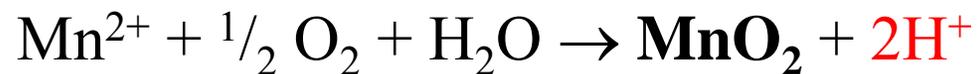
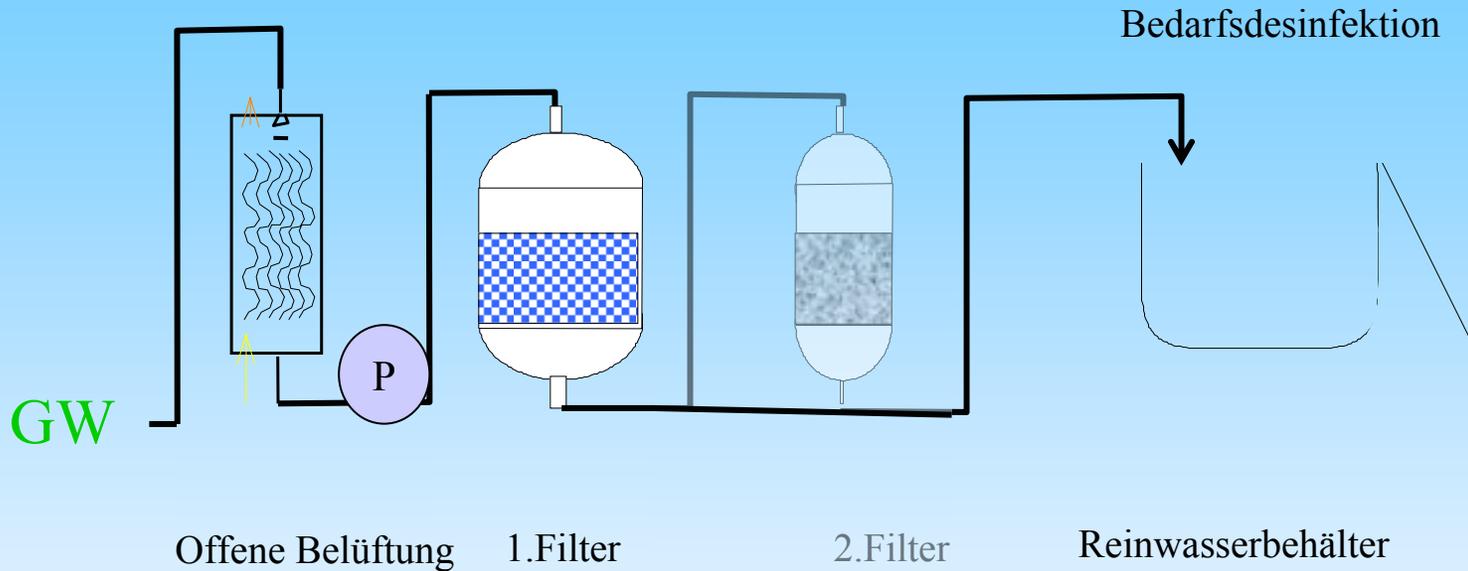
$$\text{pH}_{\text{Gl}} = -\lg K_2 - \text{pK}_L + \lg f_{\Sigma} - \lg c_{\text{Ca}} - \lg c_{\text{HCO}_3}$$

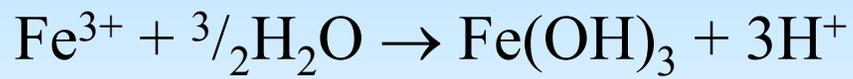
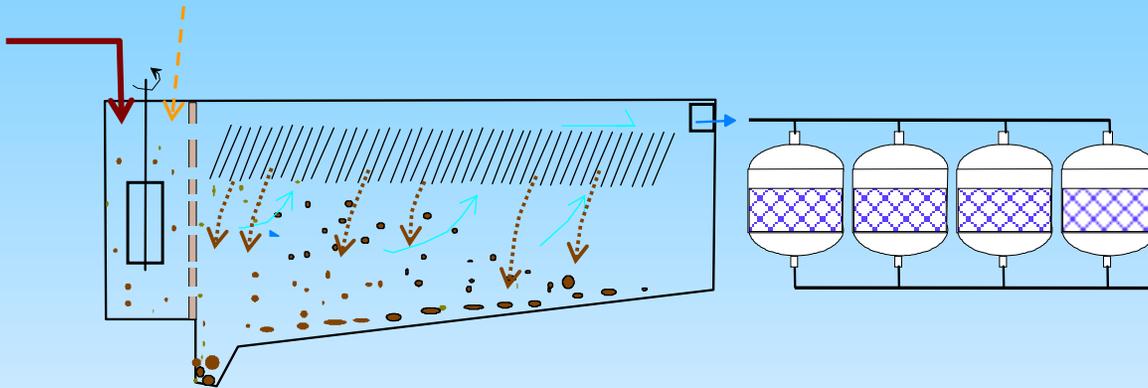
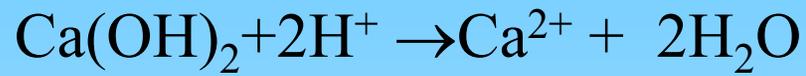
$$\text{SI} = \text{pH}_{\text{gemessen}} - \text{pH}_{\text{Gl}} = \lg \frac{c_{\text{Ca}} (\text{gemessen})}{c_{\text{Ca}} (\text{berechnete Sättigung})}$$

# Typische Grundwasseraufbereitung in der Lausitz kleine und mittlere Wasserwerke



# Typische Grundwasseraufbereitung in der Lausitz kleine und mittlere Wasserwerke





## Biologische Enteisenung

Bei  $\text{pH} < 6,5$  kommt die chemische Reaktion praktisch zum Erliegen.

**Eisenbakterien (Gallionella)** vermögen bei  $\text{pH} < 6,5$  und bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen Eisen zu oxidieren und als Eisen(III)hydroxid zu speichern.

Dieses ist der Bereich der biologischen Enteisenung aber auch Ursache für **Brunnenverockerungen**.

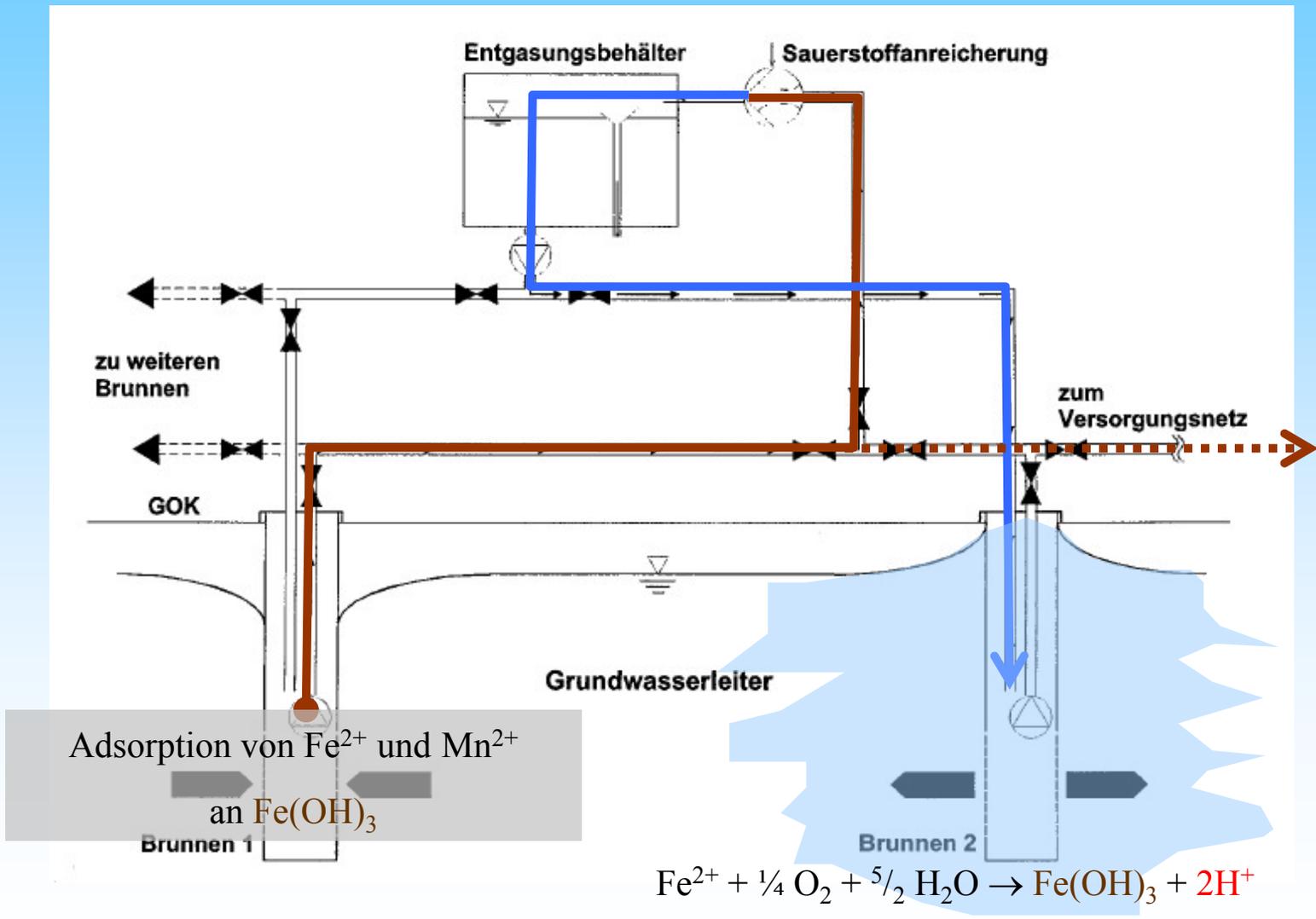
Der **Sauerstoff** darf nur im **stöchiometrischen Verhältnis** zugegeben werden.

Das wird z.B. durch eine Rückführung eines belüfteten Reinwasserteilstromes erreicht.

Die biologische Enteisenung weist gegenüber der autokatalytischen Aufbereitung wesentlich **günstigere Leistungsparameter** auf.

Für die biologische Enteisenung **fehlen** allerdings **Bemessungsgrundlagen**, wie für die autokatalytischen Verfahren.

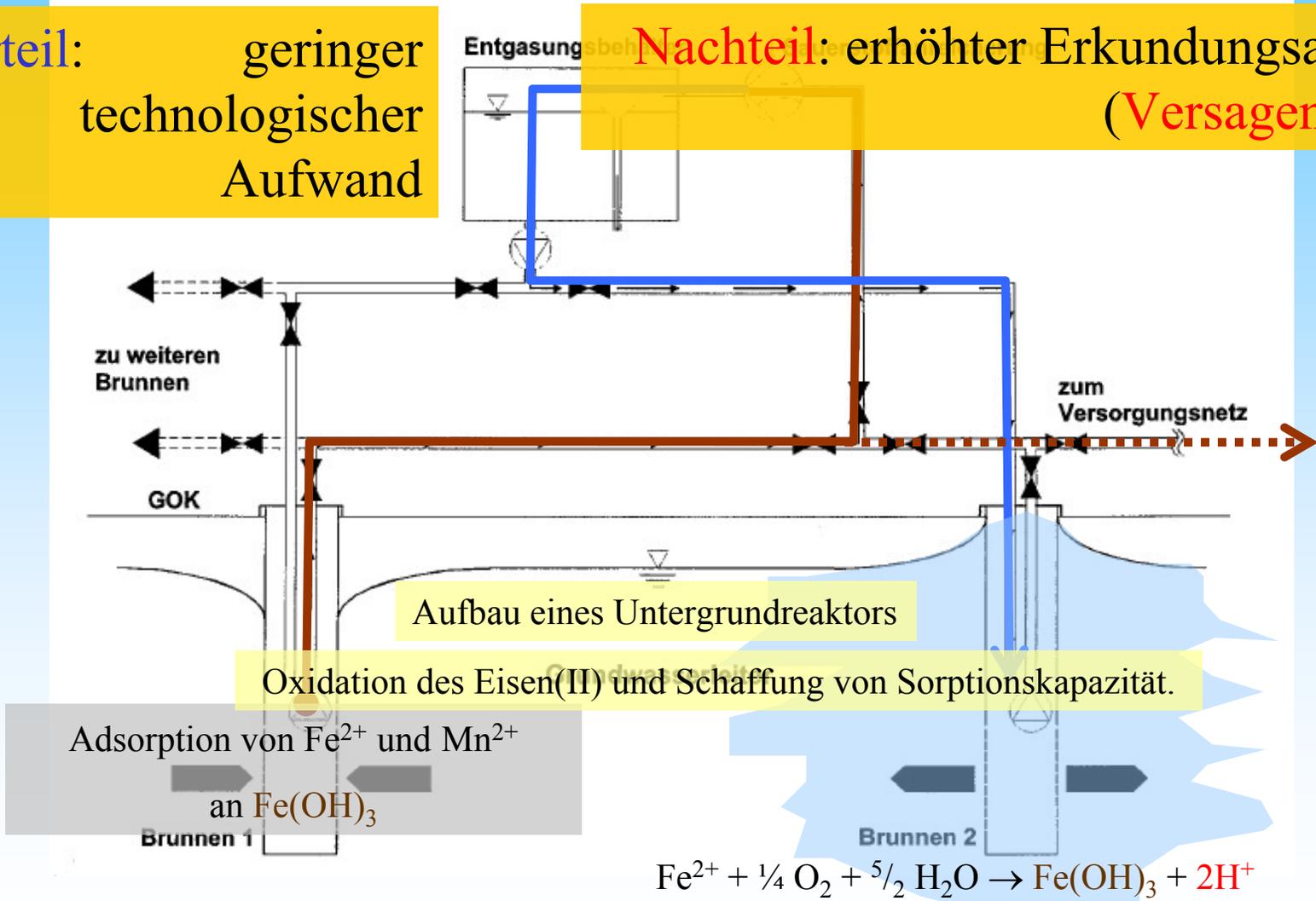
## Untergrundeisenung



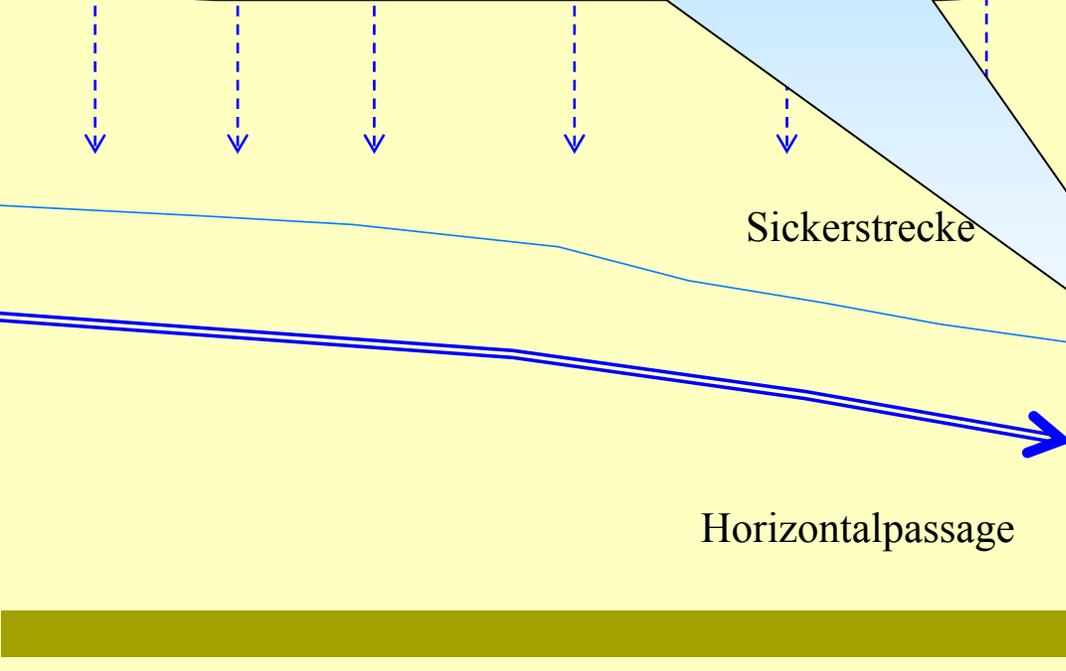
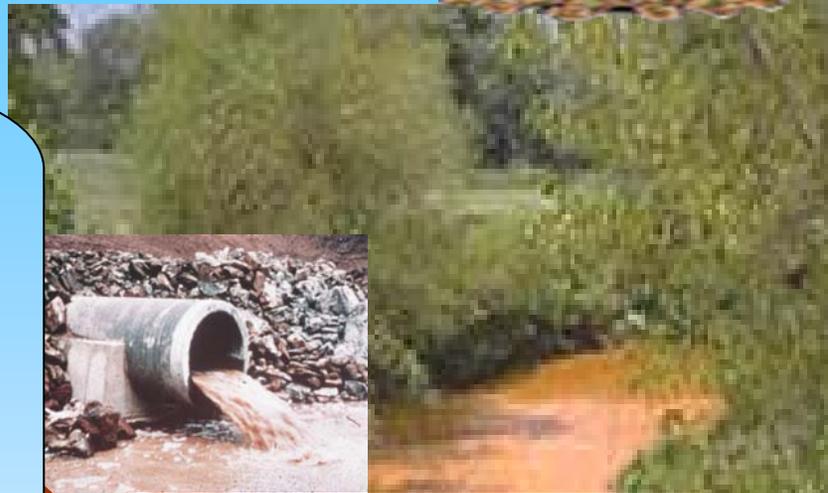
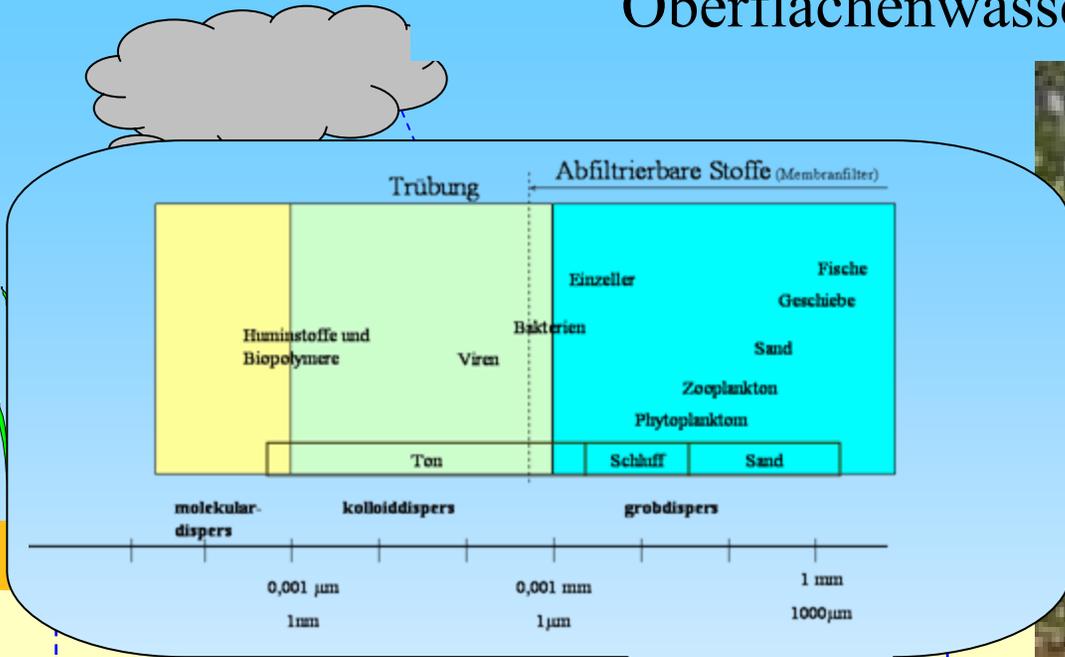
## Untergrundeisenung

**Vorteil:** geringer technologischer Aufwand

**Nachteil:** erhöhter Erkundungsaufwand (Versagensrisiko)

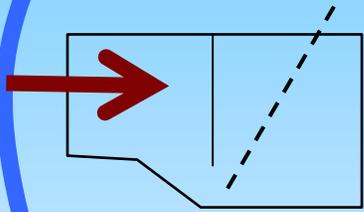


Der Reaktionsraum muss so bemessen werden, dass die Reaktionsprodukte die Lebensdauer des Brunnens nicht wesentlich beeinträchtigen.



Parameter		Spree
Bez	Einheit	
Temperatur	°C	0...25
pH	1	6,5...8,5
HCO3	mmol/l	1..1,5
Ca <sup>++</sup>	mg/l	90
Abf	mg/L	20
Tr	FAU	10
TOC	mg/L	15
DOC	mg/L	8
org Spuren		

Einlaufbauwerk



Rechenanlage (Grob- oder Feinrechen)

Ausgleich von Wasserstandsschwankungen

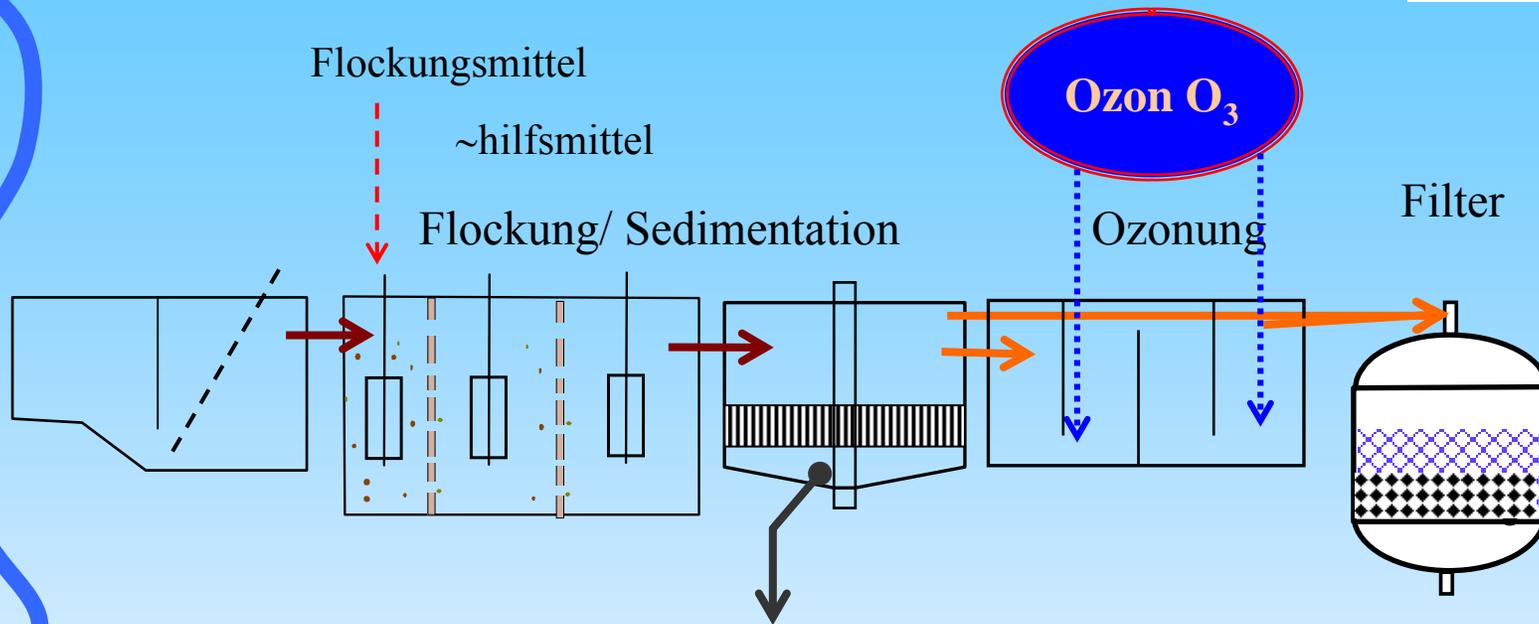
Pumpen

ein Oberflächenwasser,  
z.B. Rheinwasser



Aufbereitung bis zum  
Reinwasser

# Oberflächenwasseraufbereitung

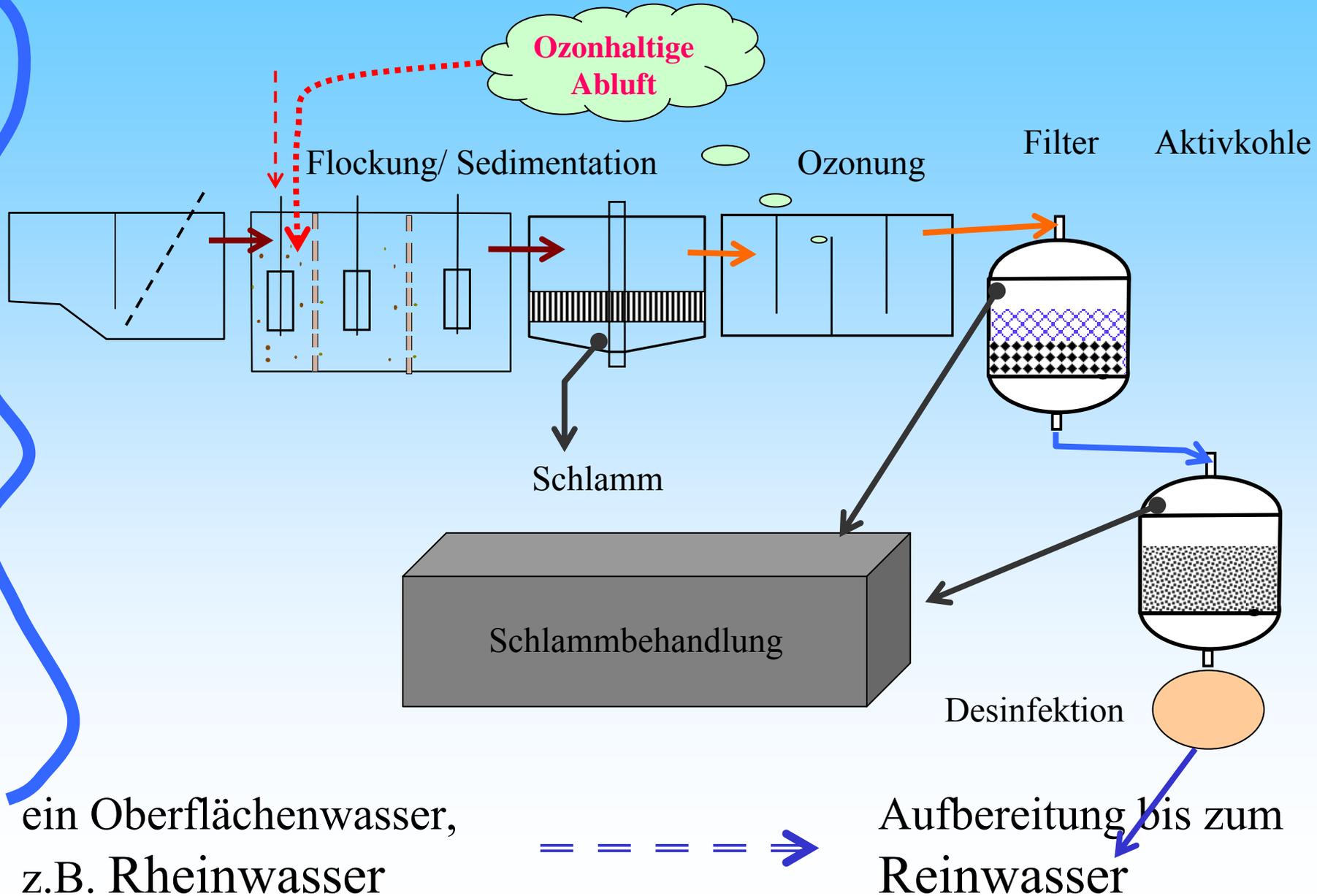


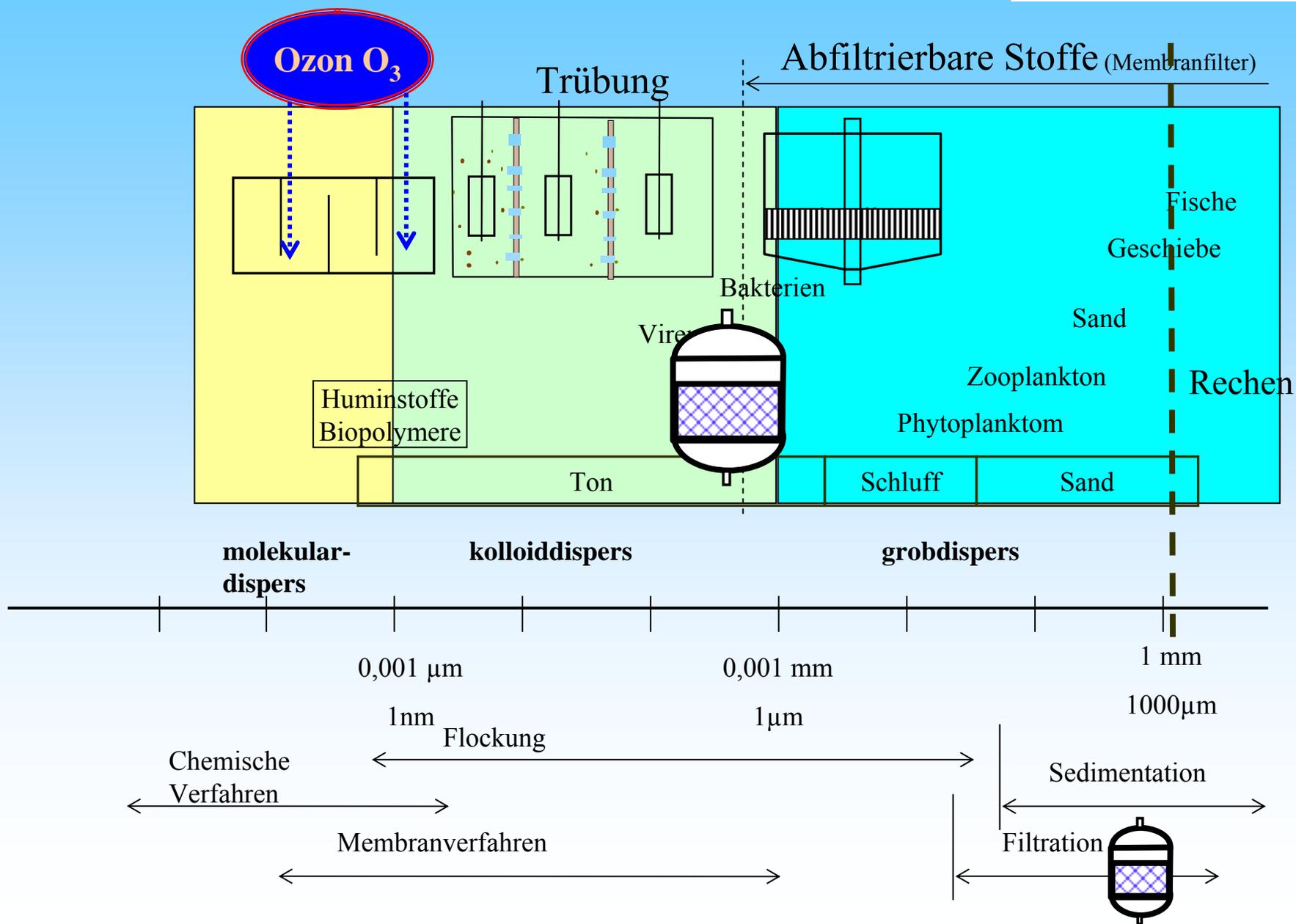
ein Oberflächenwasser,  
z.B. Rheinwasser



Aufbereitung bis zum  
Reinwasser

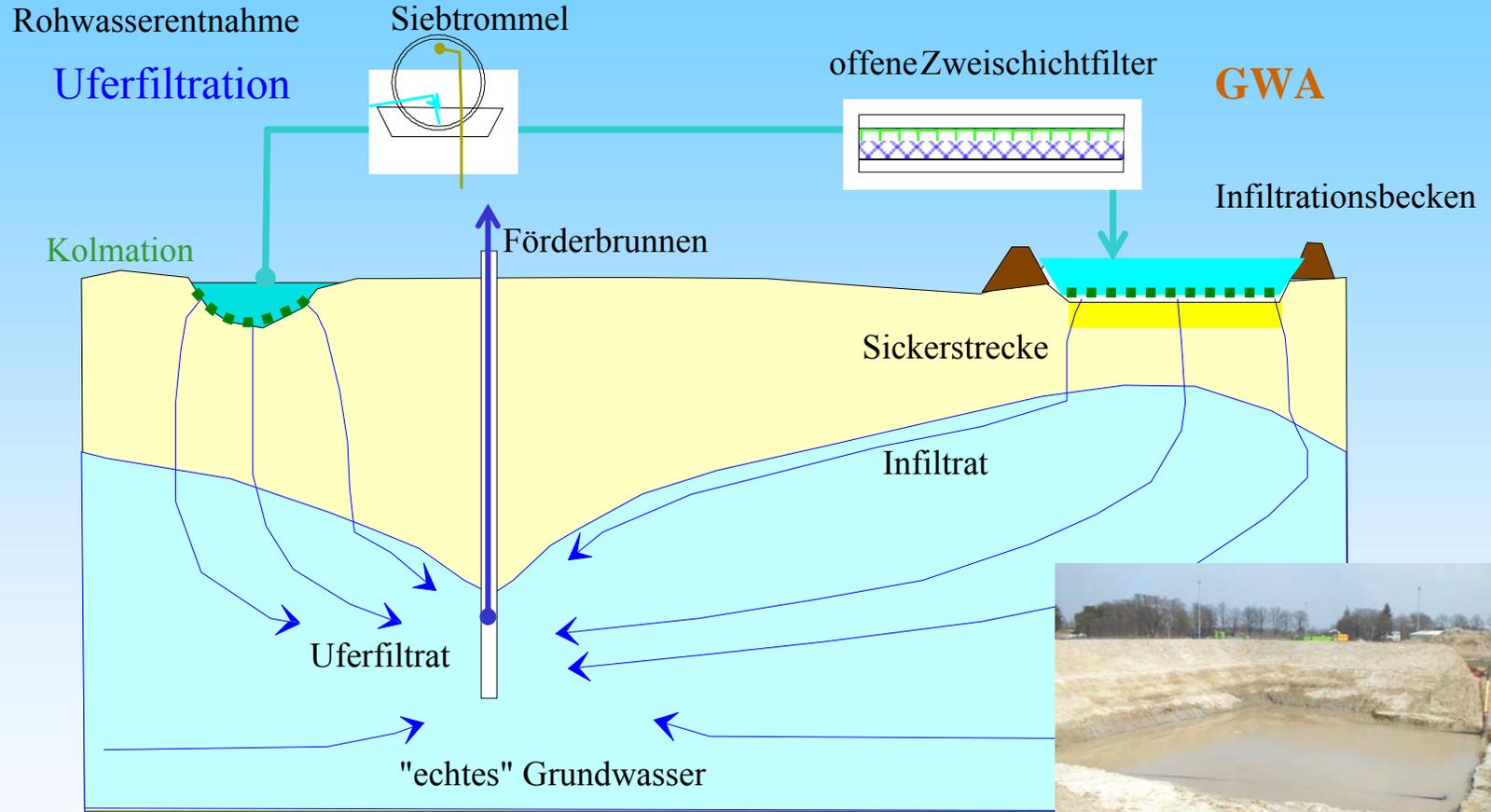
# Oberflächenwasseraufbereitung





# Oberflächenwasseraufbereitung

über Uferfiltration und Grundwasseranreicherung



anschließend Grundwasseraufbereitung  
(mindestens)

# Bemessung der Grundwasseraufbereitung



Gasaustausch

Laugedosierung

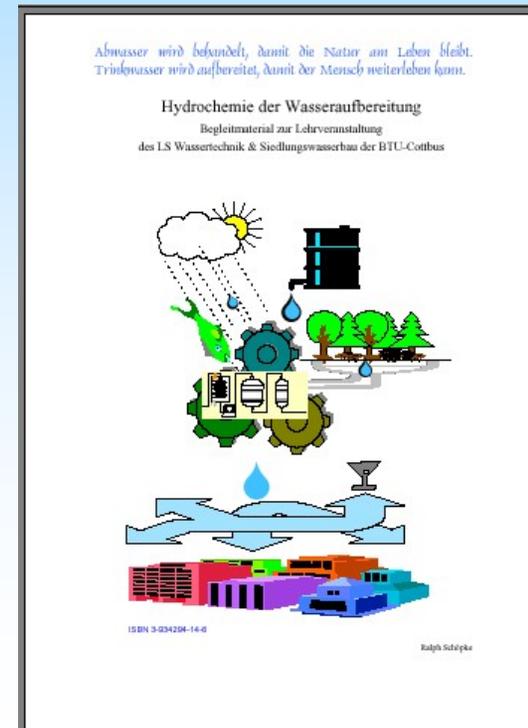
Filtration

Entsäuerung durch Filtration über alkalische Materialien

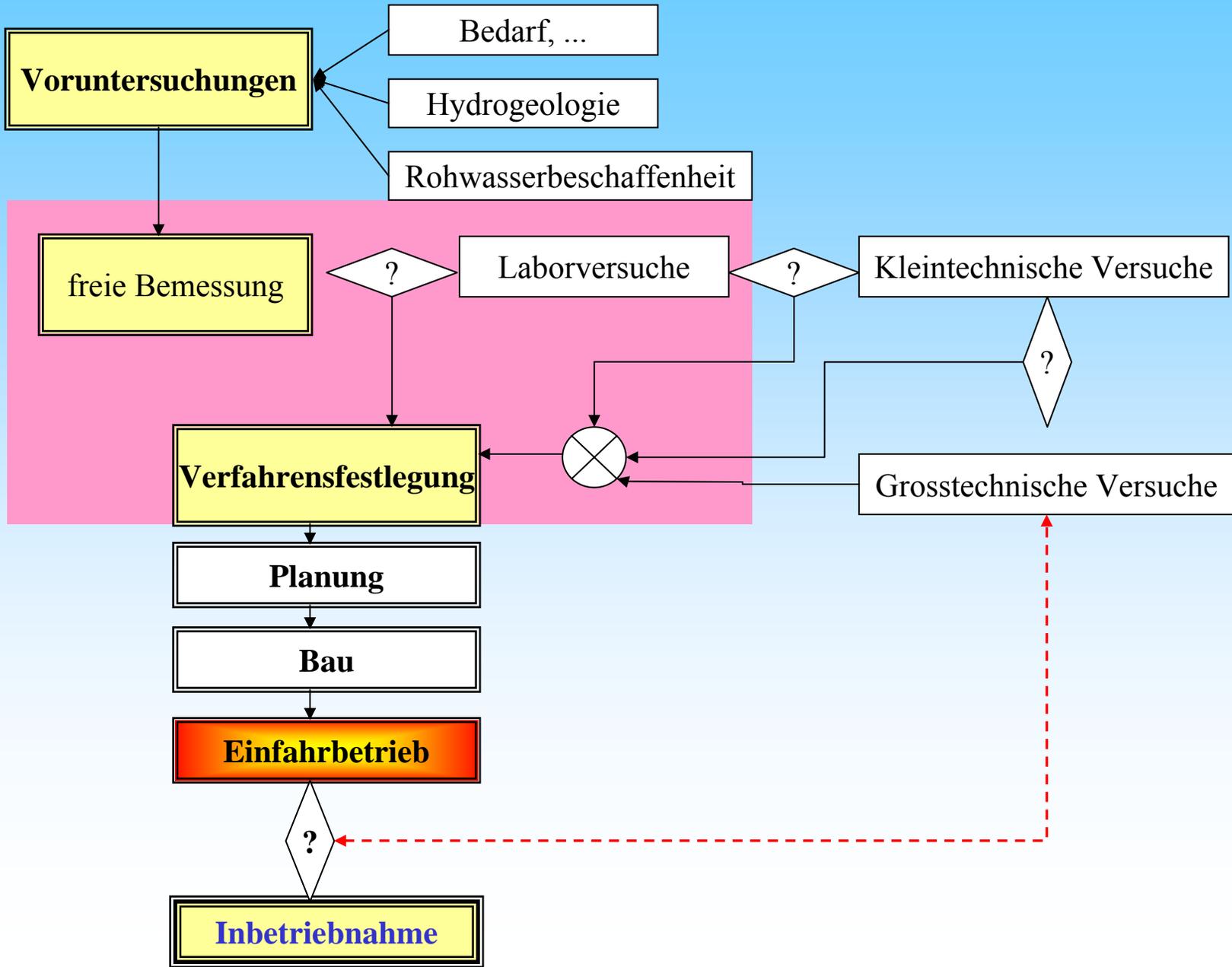
Enteisungsfiltration (Entmanganung)

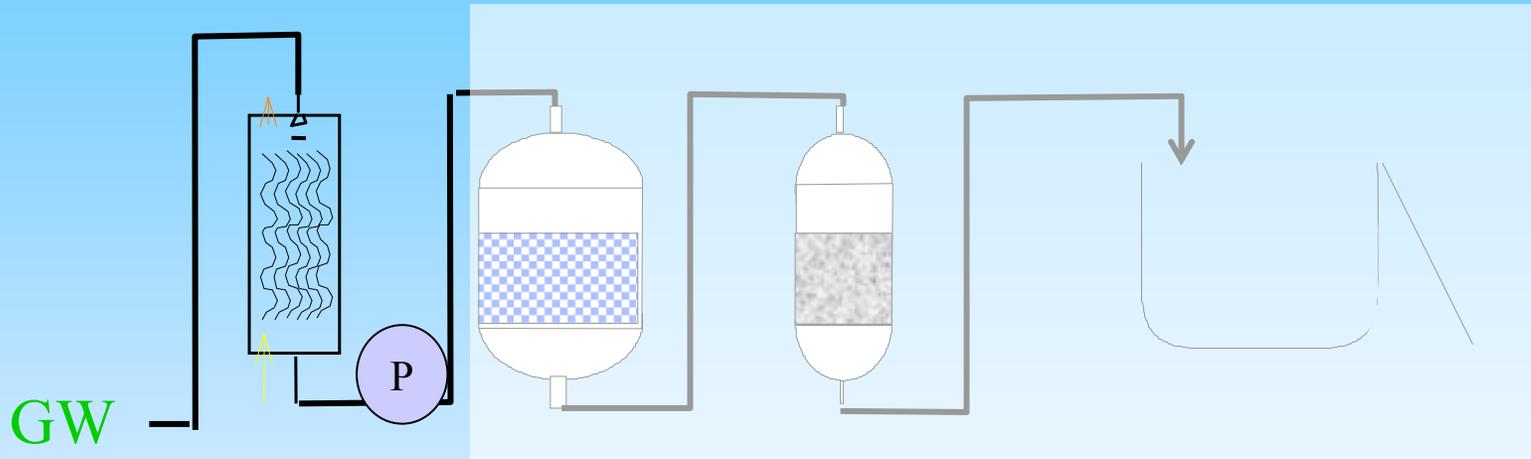
Sedimentation-Eisen(III)filtration

<http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/de/wassertechnik-und-siedlungswasserbau/lehre/skripte/vorlesungen.html>



# Bemessung von Aufbereitungsanlagen





Mit Anlagen zur physikalischen Entsäuerung können außer

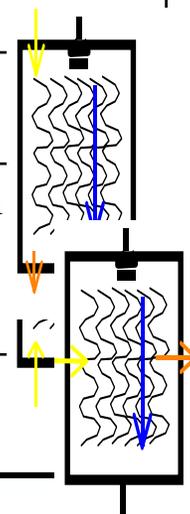
**Kohlenstoffdioxid** auch

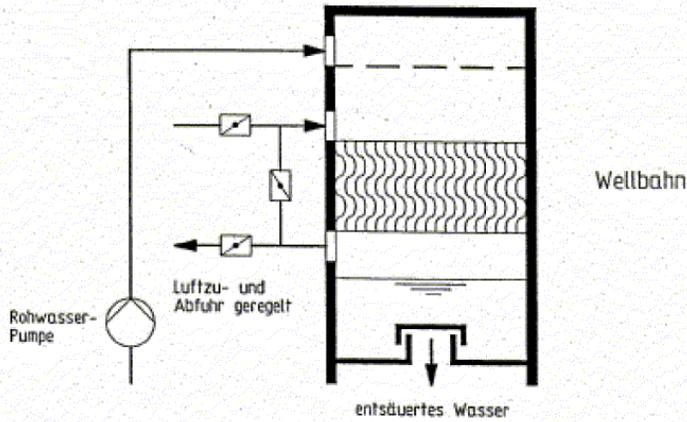
andere flüchtige Stoffe aus dem Wasser ausgetragen (**H<sub>2</sub>S**, **CH<sub>4</sub>**, ...) oder  
eingetragen (**O<sub>2</sub>**) werden.

Gasaustauschverfahren können auch mit dem Ziel eingesetzt werden, den **pH-Wert** und den **Sauerstoffgehalt** soweit anzuheben,

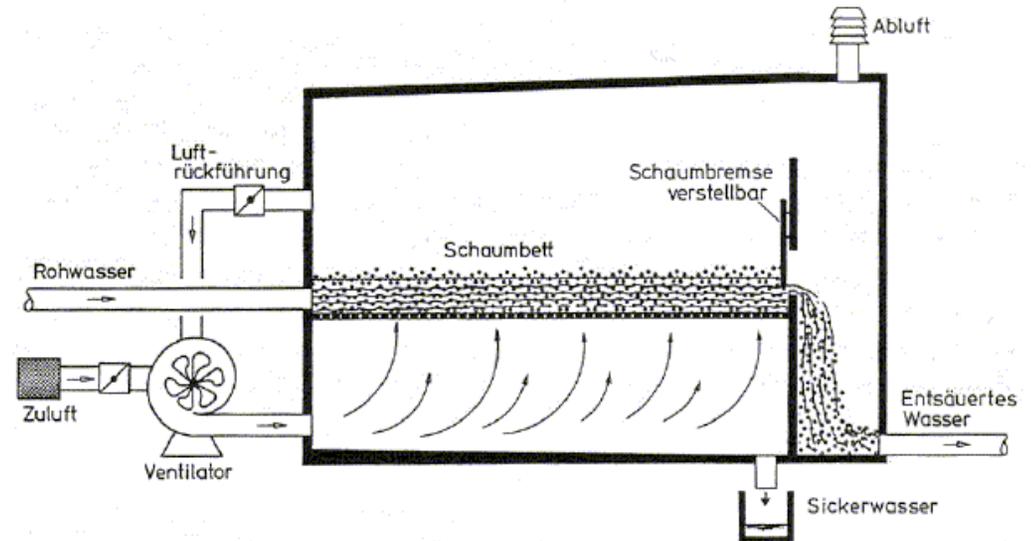
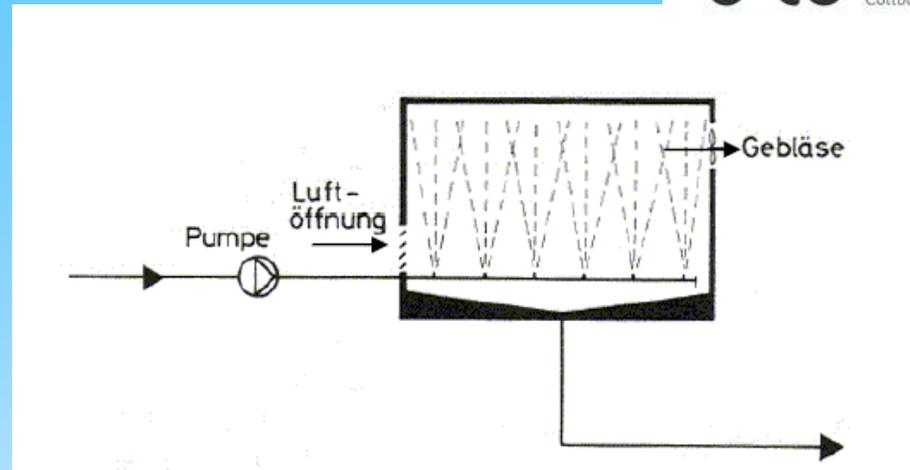
dass nachfolgende Aufbereitungsschritte günstig beeinflusst werden. Mit Anlagen zur **physikalischen Entsäuerung** lassen sich **pH-Werte bis etwa 8** einstellen (DVGW W 214/III).

nur Sauerstoffeintrag	geschlossen	Druckbelüftung	niedriges Luft/Wasser-Verhältnis
	offen	Überfall	
Gasaustausch und Sauerstoffeintrag meist offen	Gleichstrom	Rohrgitterkaskaden	riables Luft/Wasser-Verhältnis teuerbare Wirkung
	Gegenstrom	Belüftungskolonnen Zwangselüftung, Stripkolonnen	
	Kreuzstrom	Verdüsungshallen, Flachbelüfter	





Wellbahnbelüfter mit Gleichstrombelüftung (nach DVGW Regelwerk W 214-3, 1998)



Flachbelüfter mit Lochboden („INKA-Belüftung“) (nach DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 87, 1997)

Die Konstruktion der einzelnen Verfahren sind entsprechend optimiert:

- Luftmischer zur Druckbelüftung enthalten Schikanen zur Verteilung der zudosierten Luft in kleine Bläschen mit hoher Oberfläche. (Entlüftungsventile nicht vergessen)
- Pralltellerdüsen in offenen Belüftungsapparaturen zerstäuben das Wasser => hohe Oberfläche, niedrige Fallgeschwindigkeit
- Wellbahnen in Kolonnen, Profilblock- und Füllkörperkolonnen => hohe Oberfläche(Rieselfilm)
- Zwangsbelüftung im Gegenstrom => hohes Luft/Wasser-Verhältnis mit ständigem Defizit

Beispiele für Belüftungseinrichtungen enthalten /R1105/, ... .

Wenn die anzustrebende Kohlenstoffdioxidkonzentration bekannt ist, errechnet sich daraus der erforderliche Austragseffekt.

Bemessungsgröße ist der erforderliche Wirkungsgrad E [1,%] der Entsäuerung:

$$E = \frac{c_0 - c_E}{c_0}$$

Für die Belüftungsverfahren werden von den Herstellern die Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom

- Durchsatz,
- auszutauschendes Gas,
- ... angegeben.

## Beispiel:

Berechnung der Entsäuerung des Beispielgrundwassers durch Gasaustausch

Ziel-pH = 7,3      Hydrogencarbonatkonzentration bleibt beim Gasaustausch konstant



$$\lg K_1 = \lg c_{\text{HCO}_3^-} - \text{pH} - \lg c_{\text{CO}_2} \approx 6,36 \quad (20^\circ\text{C})$$

oder

$$\text{pH} = \text{const} - \lg c_{\text{CO}_2}$$

$$\text{pH}_1 - \text{pH}_2 = \lg c_2 - \lg c_1$$

$$\text{pH}_1 - \text{pH}_2 = \lg \frac{c_2}{c_1} = 7,1 - 7,3$$

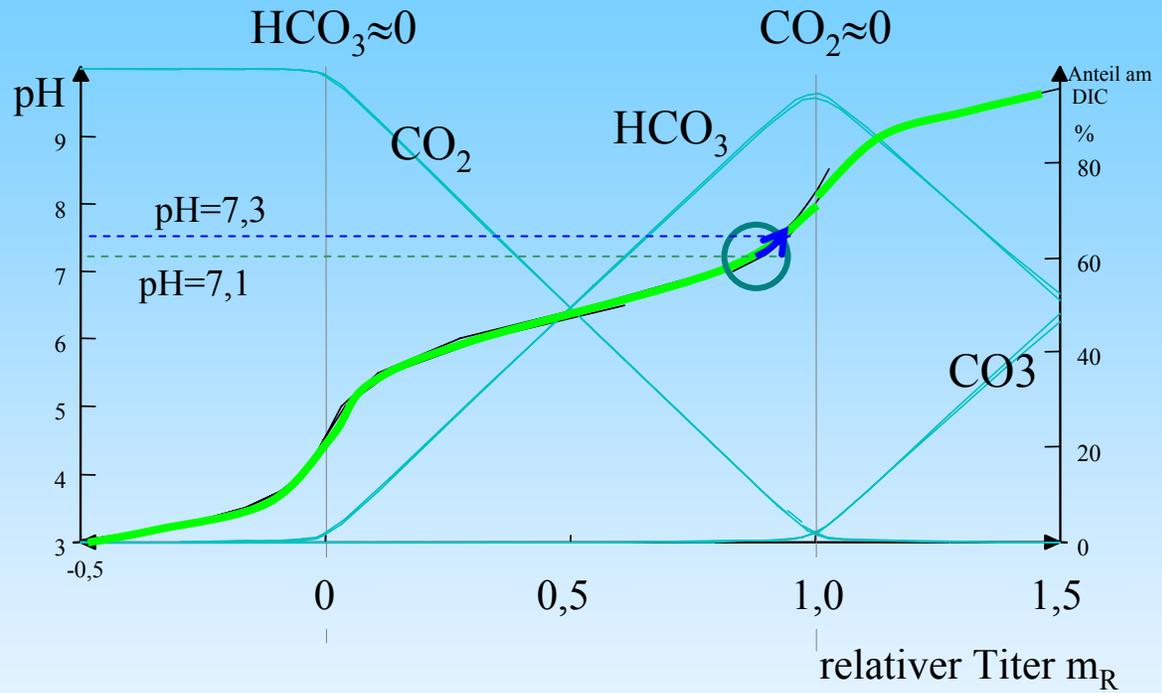
$$\frac{c_2}{c_1} = 0,63$$

Es sind

- 37% des Kohlenstoffdioxides bzw.
- 16 mg/L auszutragen.

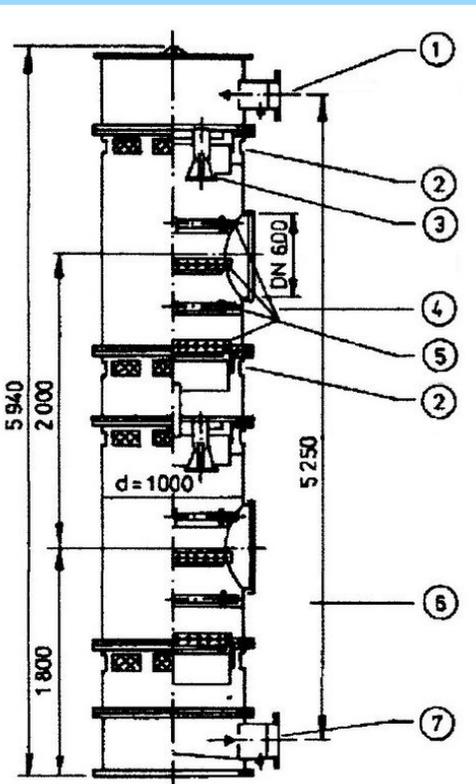
Die Belüftungsanlagen sind für einen Wirkungsgrad von  $E = 0,37$  auszulegen.

# Gasaustausch



einstufig:

$$E = \frac{c_0 - c_E}{c_0} \approx 60\%$$

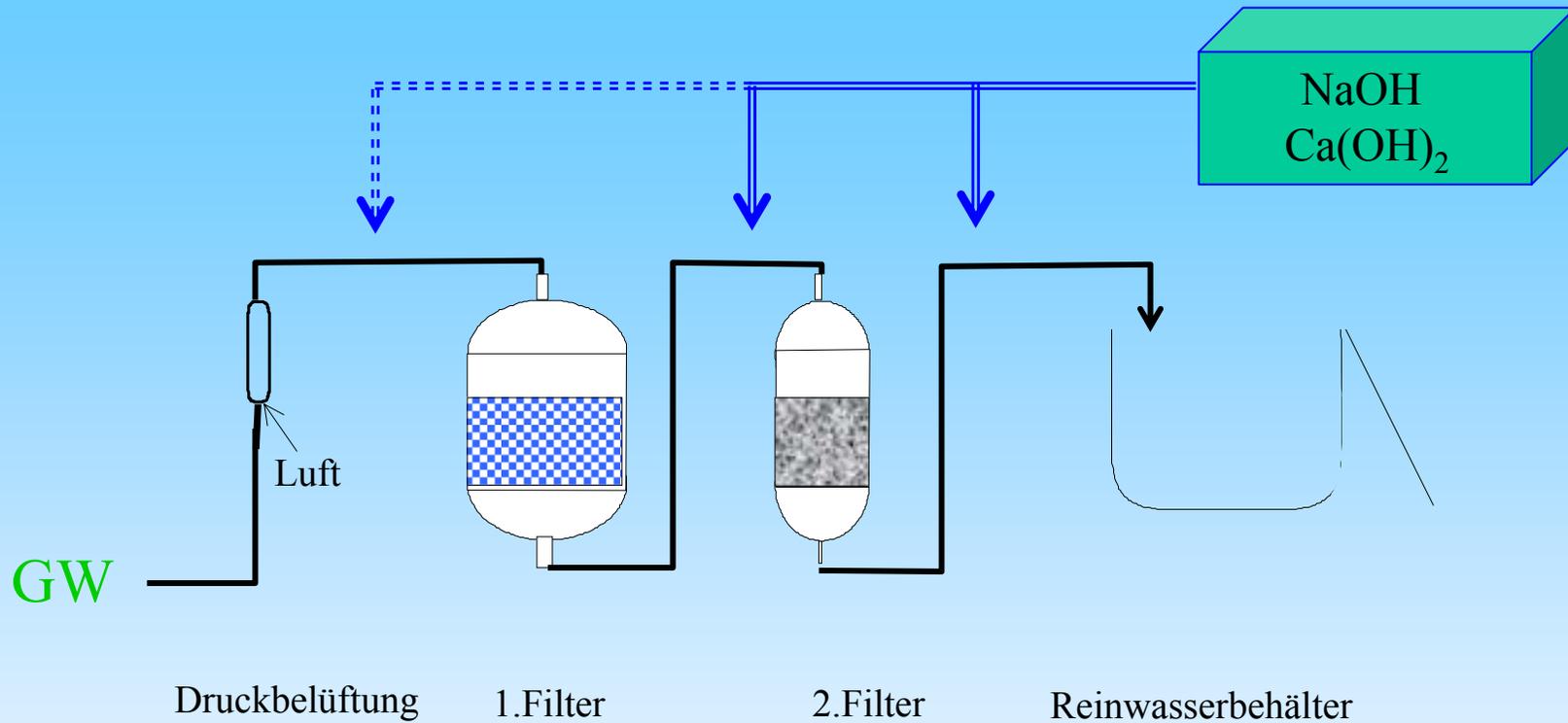


1. Rohwasserzulauf
2. Lüftungsöffnungen
3. Pralltellerdüsen
4. Reaktionsteil
5. Rohrgitter
6. Reaktionsteil 2
7. Ablauf

Quelle: [www.merwa.de](http://www.merwa.de)



# Entsäuerung durch Laugedosierung



Als Dosierchemikalien für die Entsäuerung sind nach Trinkwasserverordnung zugelassen:

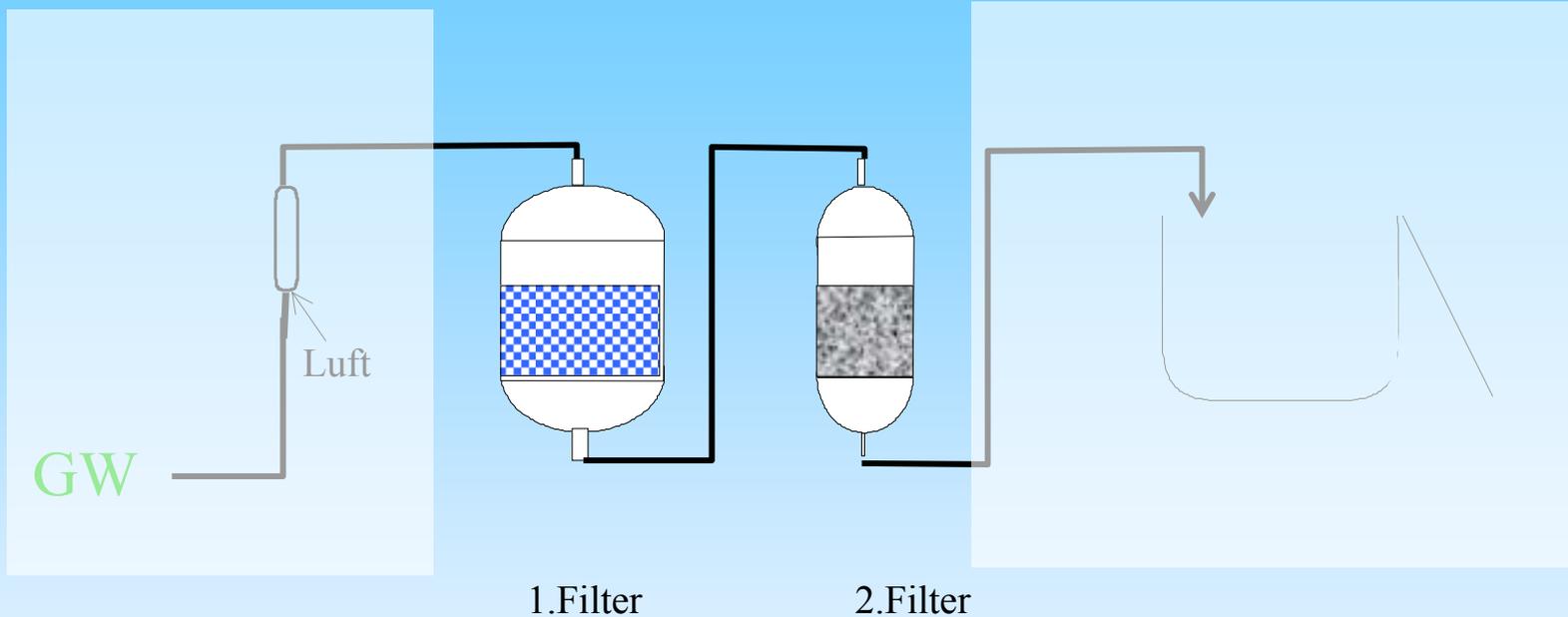
- Calciumoxid (DIN EN 12518)
- Calciumhydroxid
- Natriumhydroxid (DIN EN 896)
- Natriumcarbonat (Soda, DIN EN 897)
- Natriumhydrogencarbonat (DIN EN 898)

Für Vorbereitung der Dosierlösungen sind je nach gewählter Chemikalie erforderlich:

- Vorratsbehälter für Chemikalien
- Ansetzgefäße zur Verdünnung und Bereiten der Dosierlösung
- Dosierpumpen
- Dosierstelle, Mischeinrichtungen (Lanze, Rohrkrümmer, Schikanen)
- Mess- Steuer- und Regelungstechnik

Kalkanlagenbestehen aus:

- Kalksilo
- Kalkmischer, Kalkmilchbereitung
- Kalksättiger

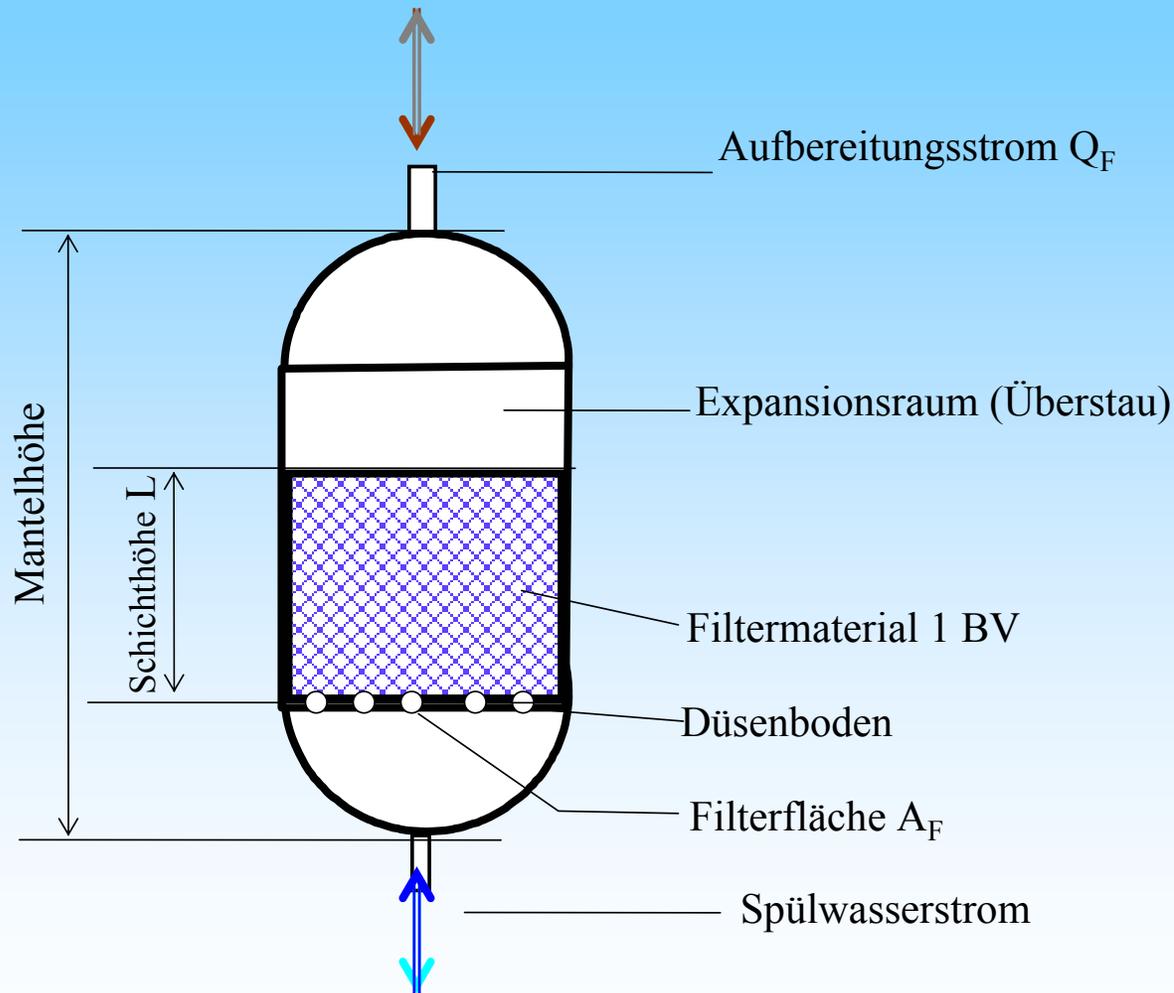


# Filtration

## Anlagen zur Filtration über körnige Medien (Filter)



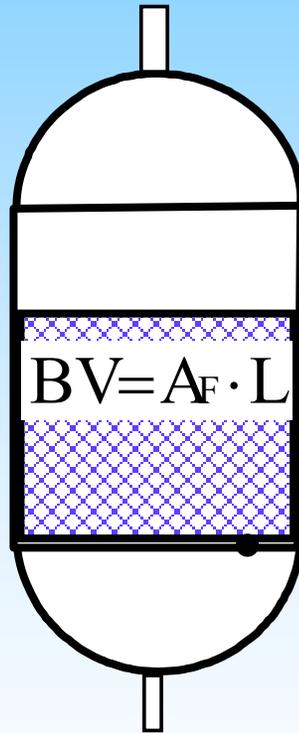
## Anlagen zur Filtration über körnige Medien (Filter)



# Filtration

## Anlagen zur Filtration über körnige Medien (Filter)

Filtrergeschwindigkeit  $V_f = \frac{Q_F}{A_F}$



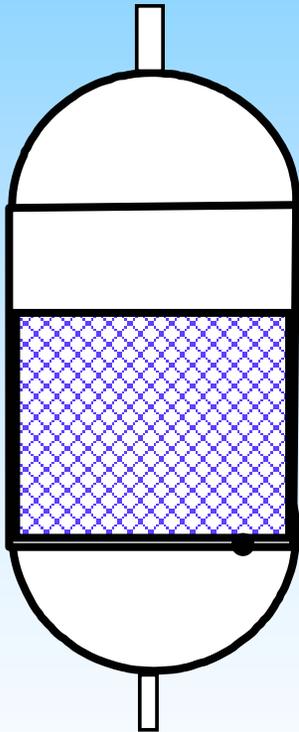
Druckverlust  $h_f$  als Druckhöhe

fiktive Verweilzeit im Filterbett

$$t_F = \frac{BV}{Q_F} = \frac{L}{v_f}$$

# Filtration

## Filtermaterial



### **engklassierte chemisch inerte Körnungen:**

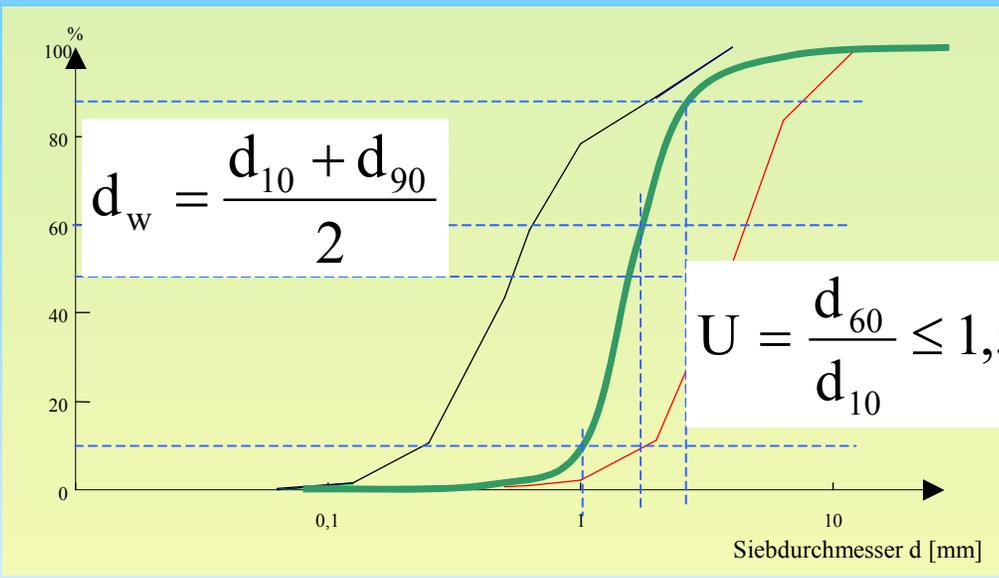
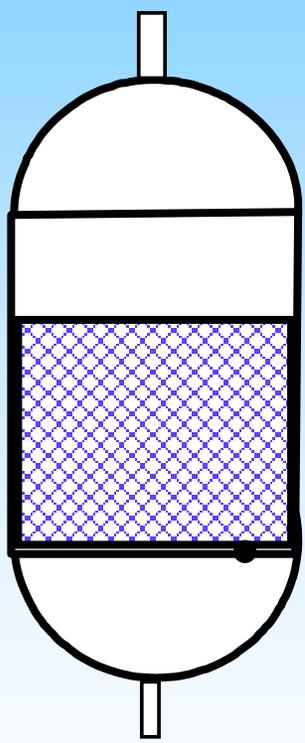
- Quarzsand / -kies,
- Hydroanthrazit, Granatsand, Ilmenit
- Blähton, Bims und Kunststoffgranulate

### **chemisch aktive Materialien :**

- Calcitkörnungen
- halbgebrannte Dolomite
- Aktivkohlen,
- Ionenaustauscher

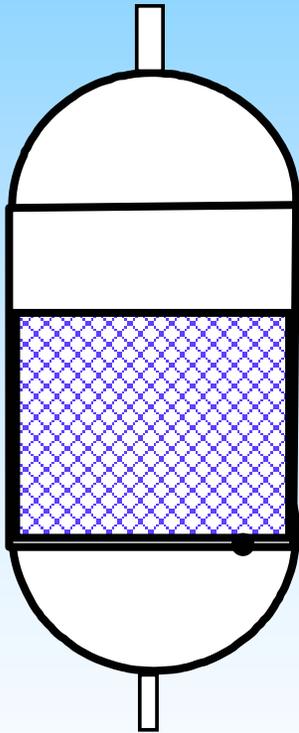
# Filtration

## Filtermaterial



# Filtration

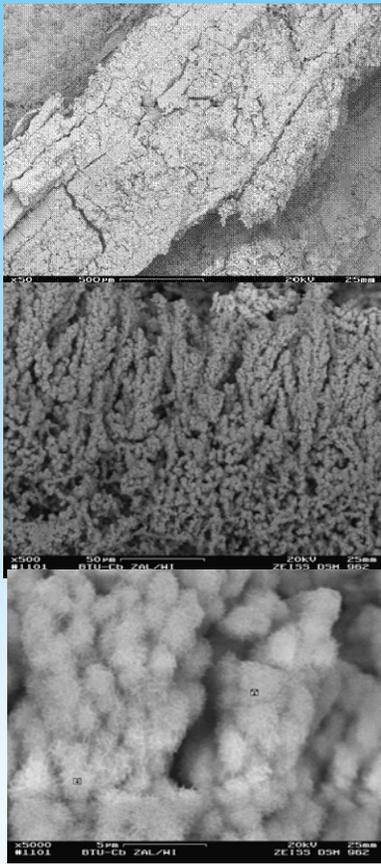
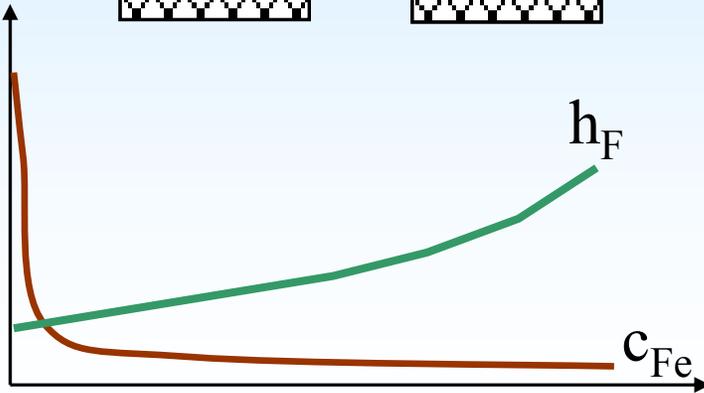
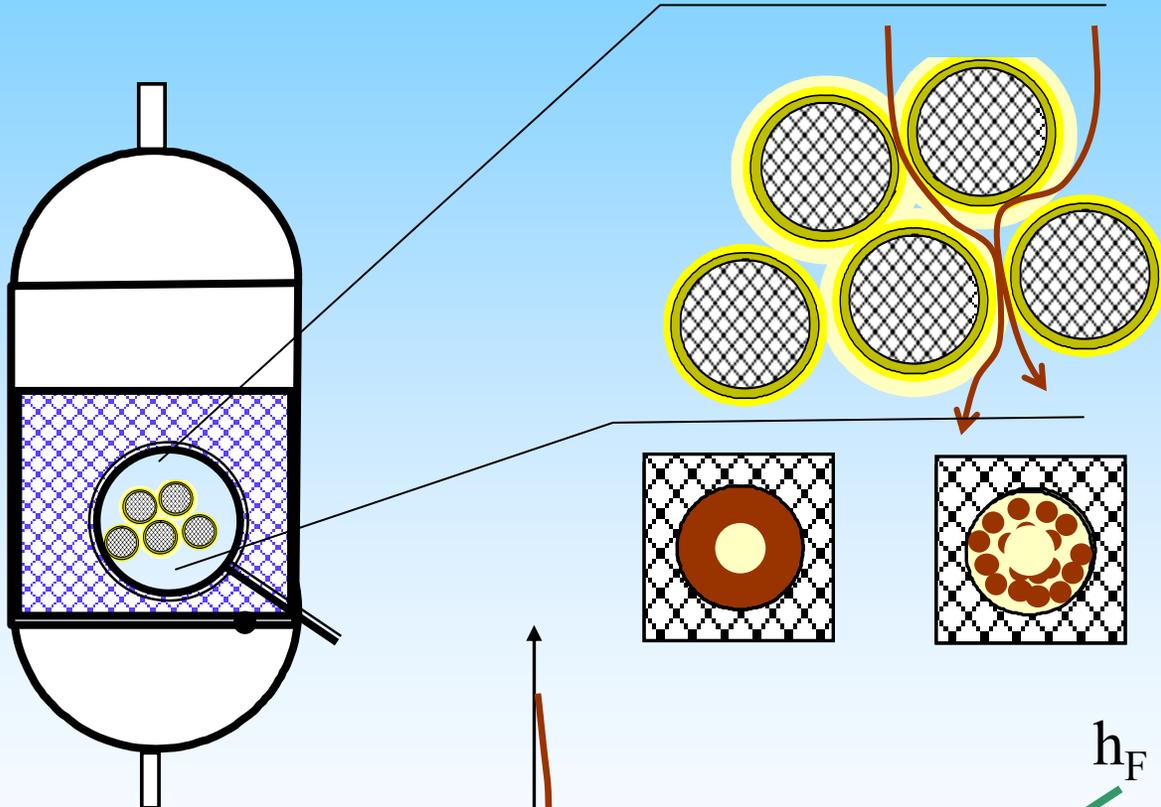
## Filtermaterial



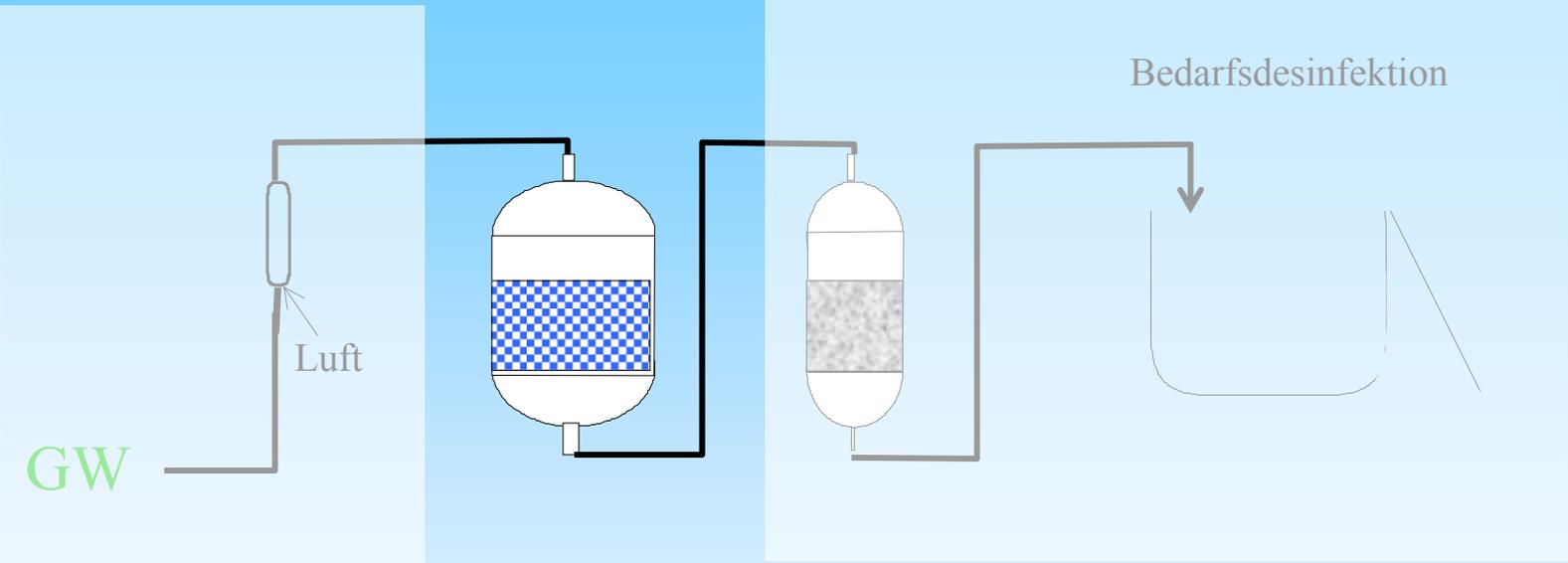
Material	Korngrenzen mm	$d_w$ mm
Filtersande	0,4...0,63	0,52
	0,4...0,8	0,6
	<b>0,63...0,8</b>	<b>0,72</b>
	0,63...1,0	0,82
	<b>0,71...1,25</b>	<b>1</b>
	1,0...1,6	1,3
	<b>1,0...2,0</b>	<b>1,5</b>
	1,25...1,8	1,5
	1,6...2,0	1,8
1,6...2,5	2,1	
Filterkiese	2,0...3,15	2,6
	3,15...5,6	4,4

# Filtration

## Filterprozesse



# Entsäuerung durch Filtration über alkalische Materialien



1.Filter

2.Filter



# Entsäuerung durch Filtration über alkalische Materialien

Als körnige Entsäuerungsmaterialien kommen derzeit im wesentlichen

- Weißjura,
- devonischer Massenkalk und
- Muschelkalk zum Einsatz.

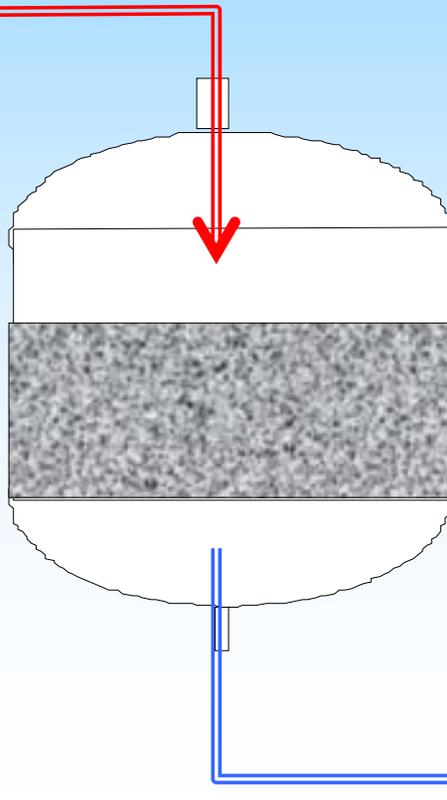


Die Materialien unterscheiden sich zwar in ihrer kristallinen Struktur, bestehen jedoch in ihrer chemischen Zusammensetzung zu über 99 % aus Calciumcarbonat (/R1105/).

$$c_{\text{Fe}} \leq 0,5 \text{ mg/L}$$

$$c_{\text{Mn}} \leq 0,1 \text{ mg/L}$$

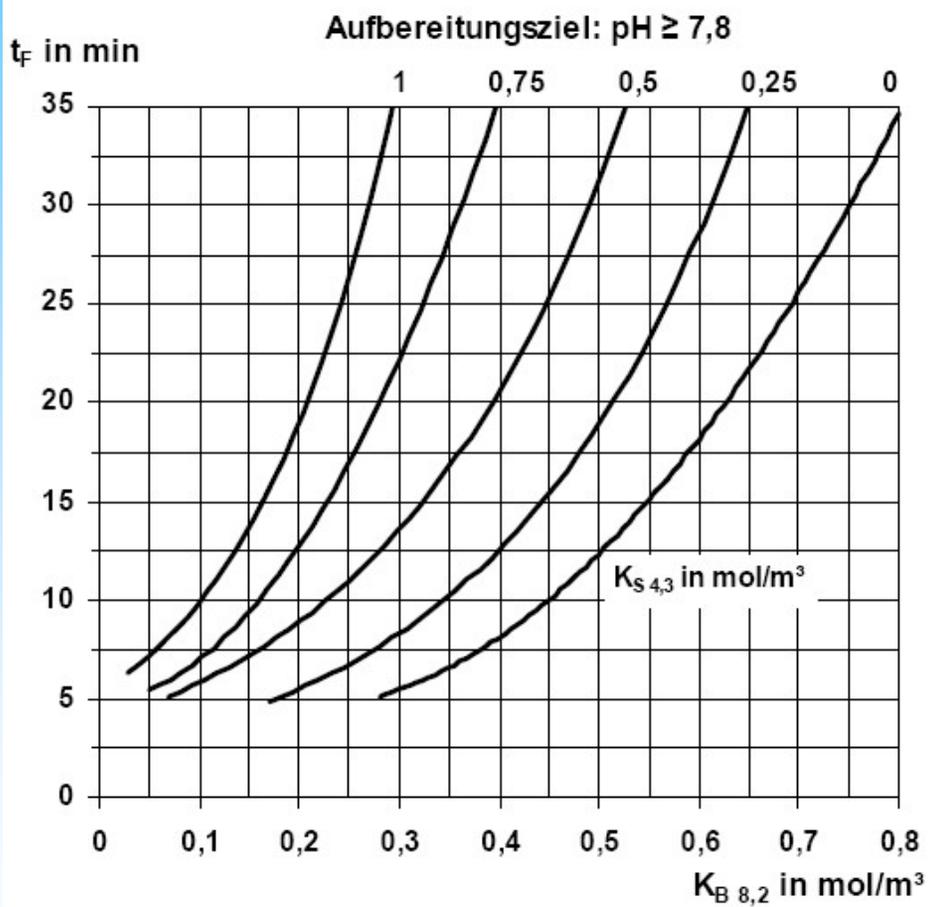
$$c_{\text{Al}} \leq 0,2 \text{ mg/L}$$



oder



# Entsäuerung durch Filtration über Calcit

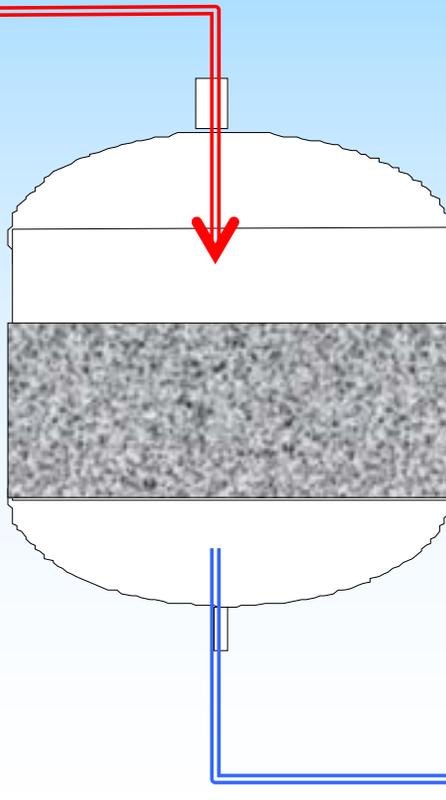


Kontaktzeit ( $t_F$ ) in Abhängigkeit von Basekapazität ( $K_{B,8,2}$ ) und Säurekapazität ( $K_{S,4,3}$ ) für dichtes Calciumcarbonat (Korngruppe 1,0-2,0 mm)  
Temperatur: 10 °C, Aufbereitungsziel: pH  $\geq$  7,8

# Entsäuerung durch Filtration über halbgebrannten Dolomit

$$c_{\text{CO}_2\text{-L}} = c_{\text{CO}_2\text{-0}} \cdot \exp \left[ \frac{A_{\text{CO}_2} \cdot e^{0,05 \cdot \text{Temp}}}{(1 + 2,8 \cdot K_{\text{S4,3}}) \cdot c_{\text{CO}_2\text{-0}}^{0,5} \left( \frac{c_{\text{Ca}}}{c_{\text{Mg}}} \right)^{0,1}} \frac{L}{v_f \cdot d_w} \right]$$

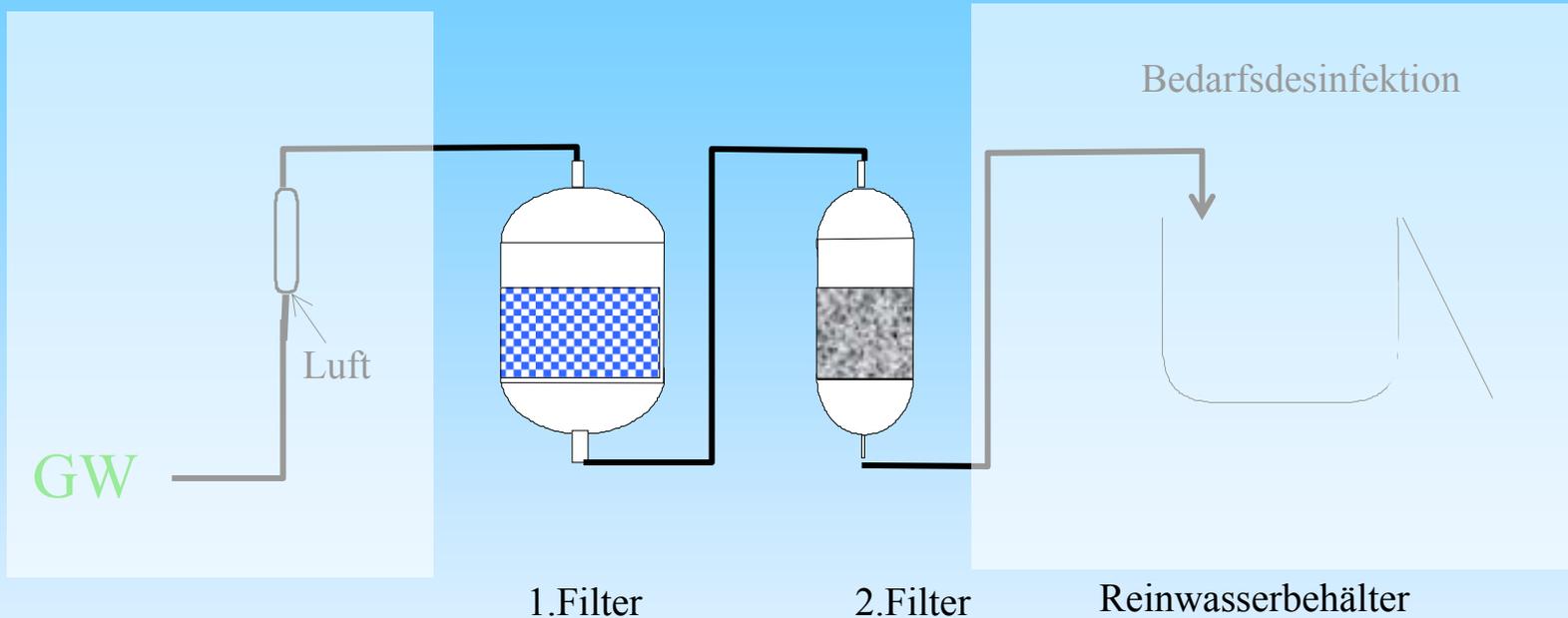
$c_{\text{Fe}} \leq 0,5 \text{ mg/L}$   
 $c_{\text{Mn}} \leq 0,1 \text{ mg/L}$   
 $c_{\text{Al}} \leq 0,2 \text{ mg/L}$

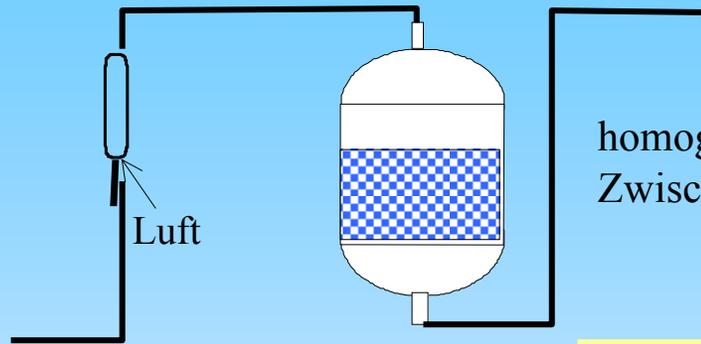


$$v_C = A_{\text{CO}_2} \frac{e^{0,05 \cdot \text{Temp}}}{(1 + 2,8 \cdot K_{\text{S4,3}}) \cdot c_{\text{CO}_2\text{-0}}^{0,5} \cdot \ln \left( \frac{c_{\text{CO}_2\text{-0}}}{c_{\text{CO}_2\text{-L}}} \right) \left( \frac{c_{\text{Ca}}}{c_{\text{Mg}}} \right)^{0,1}} \frac{L}{d_w}$$

$$v_E = \left[ A_{\text{Fe}} \frac{e^{0,04 \cdot \text{Temp}} \ln(0,22 \cdot \text{pH})}{(1 + 2,8 \cdot K_{\text{S4,3}})^{0,3} c_{\text{Fe0}}^{0,25} \cdot \ln \left( \frac{c_{\text{Fe0}}}{c_{\text{FeL}}} \right)} \frac{L}{d_w} \right]^{1,5}$$

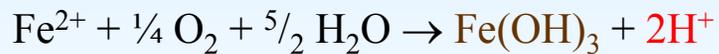
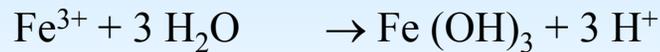
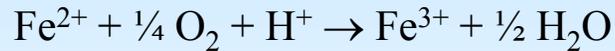
# Enteisenung (und Entmanganung) durch Filtration





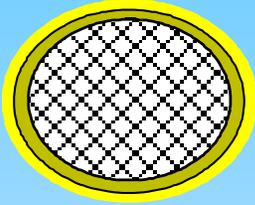
homogene Reaktion im Wasser des Überstaus oder eines Zwischenbehälters

**Autokatalytische Enteisenung** und Entmanganung an der Kornoberfläche

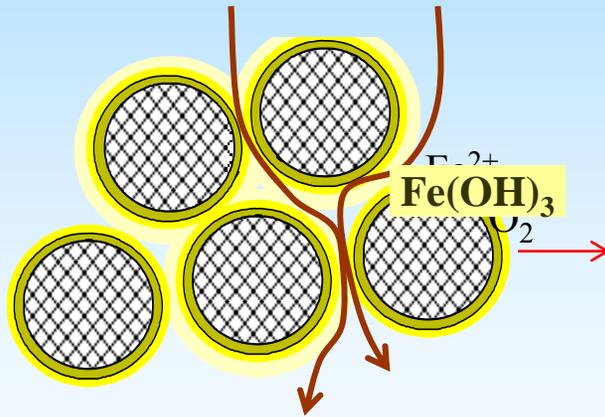


# Enteisenung durch Filtration

## Autokatalytische Enteisenung an der Kornoberfläche

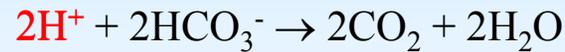
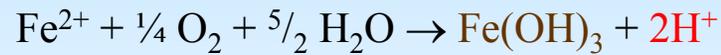


Schnitt durch ein Filtermaterialkorn aus  
Oberfläche die katalytischsteine Schicht aus den  
inertem Material  
Reaktionsprodukten auf, die katalytisch wirkt.

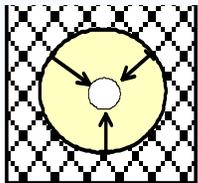


$\text{Fe}^{2+}$  wird an die Hydroxidoberfläche adsorbiert

Reaktion mit Sauerstoff und Produktfällung



pH-Absenkung



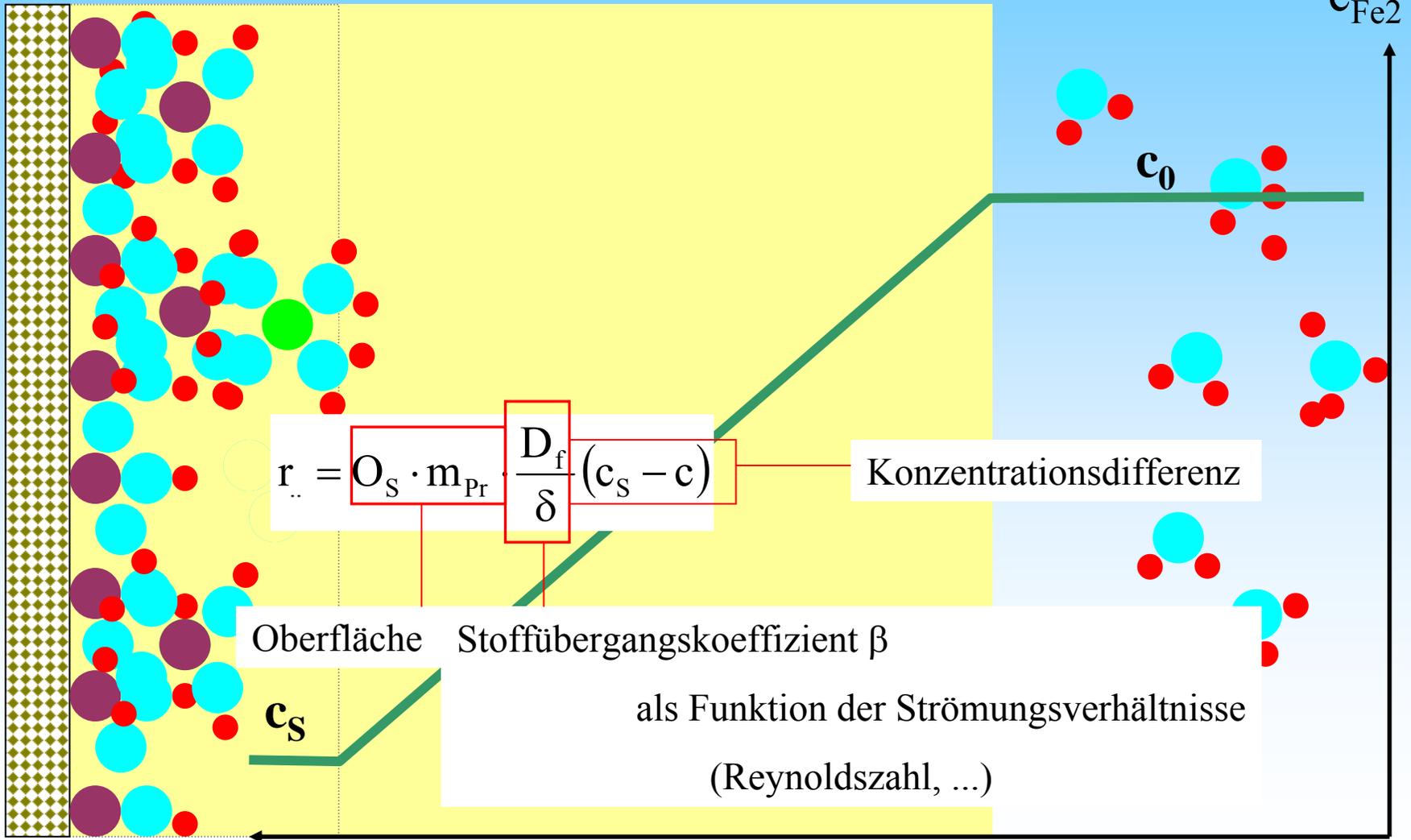
Dabei verengen die Reaktionsprodukte den  
Porenkanalquerschnitt

# Enteisenung durch Filtration

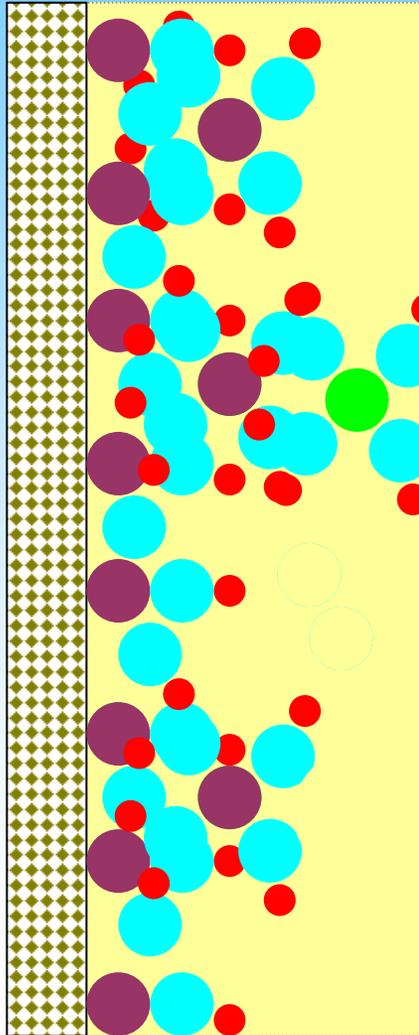
Transportlimitation der Reaktion

Diffusionsschicht, strömungsabhängig (Re)

Lösung



## Kinetik der Oberflächenreaktion



nach Stumm & Morgan (1971)

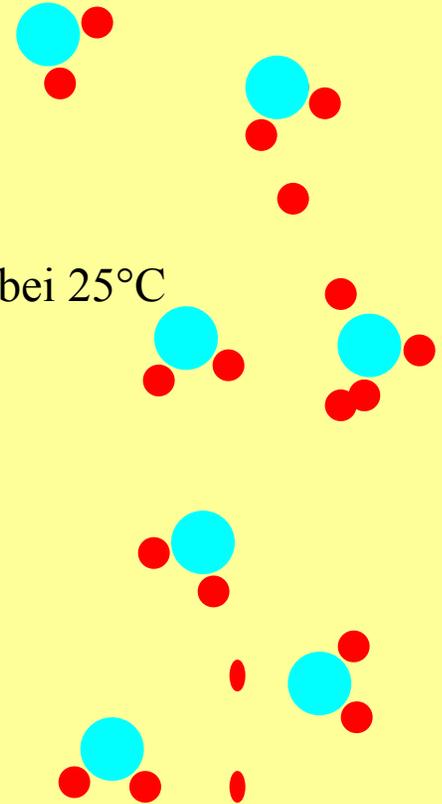
$$\frac{\partial c_{\text{Fe}^{2+}}}{\partial t} = k \cdot c_{\text{OH}}^2 \cdot p\text{O}_2 \cdot c_{\text{Fe}^{2+}}$$

$$k = 1,33 \cdot 10^{12} \cdot \text{L}^2 / (\text{mol}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{s}) \text{ bei } 25^\circ\text{C}$$

allgemein

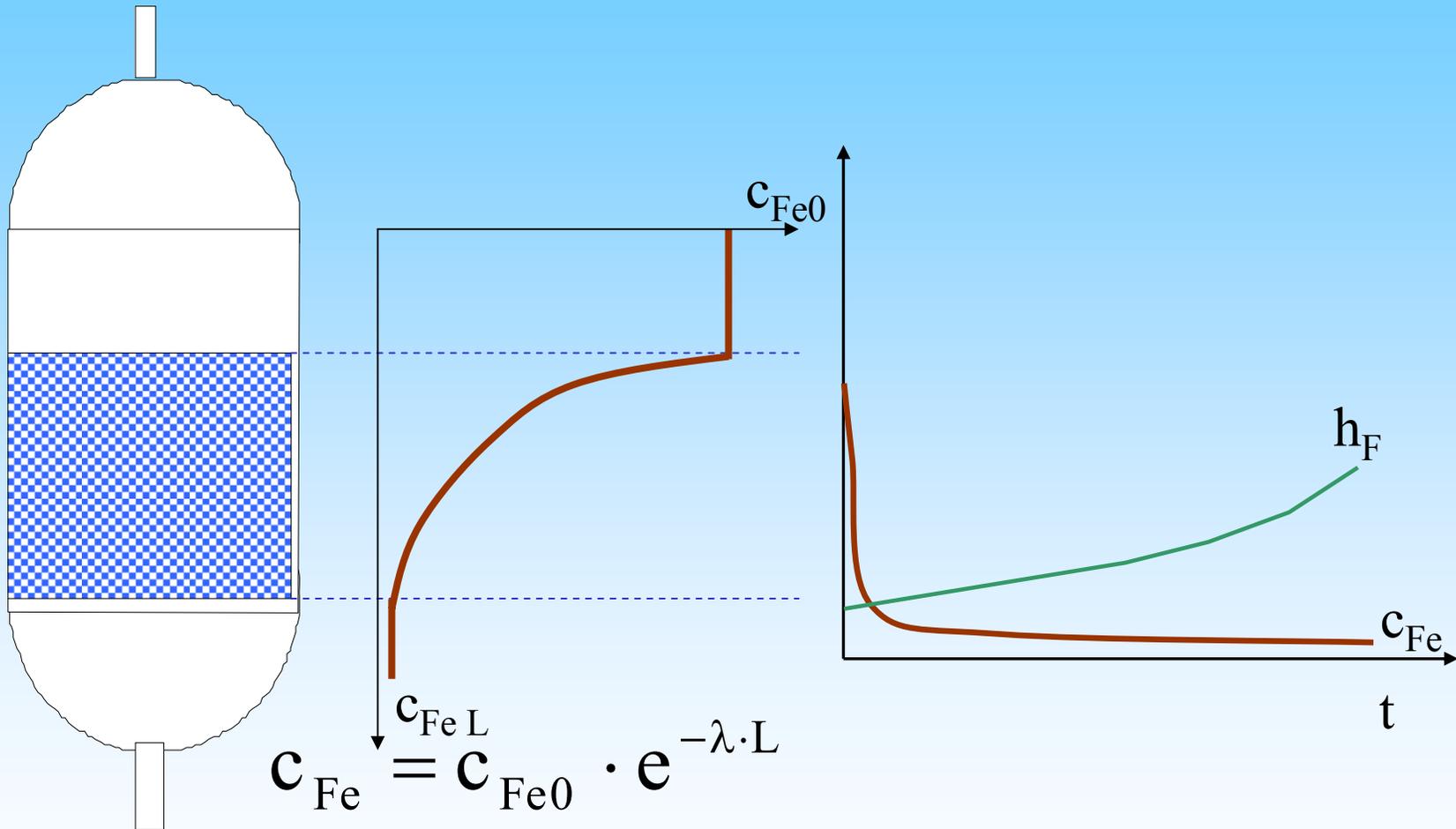
$$r_{\text{O}} = \lambda(\text{pH}, \text{Temp}, \dots) \cdot c_{\text{Fe}}$$

In einem engeren Strömungsbereich bestimmen die Oberfläche und Verweilzeit die Enteisenungsleistung



# Enteisung durch Filtration

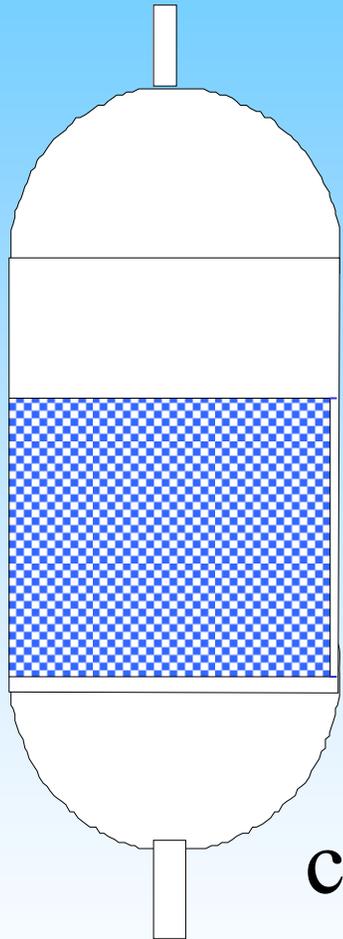
## Filterbemessung



Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt entscheidend von der mit aktivem Eisenhydroxid belegten Kornoberfläche und deren Sorptionskapazität ab.

# Enteisenung durch Filtration

## Filterbemessung



nach Kittner

$$-\lambda = \ln \left( \frac{c_{FeL}}{c_{Fe0}} \right) = f_H \frac{3 \cdot (pH - 6,2) \cdot Temp^{0,8}}{c_{Fe0}^{0,1}} \cdot \frac{L}{d_w \cdot v_E^{0,78}}$$

nach Rathsack

$$-\lambda = \ln \left( \frac{c_{FeL}}{c_{Fe0}} \right) = \frac{k_0 \max \left\{ \begin{array}{l} (pH_0 - 6,2) \\ (0,11 \cdot pH_0 - 0,24) \end{array} \right\}}{\exp \left( \frac{E_A}{RT} + 2,04 \cdot \sqrt{\frac{I}{1 \text{ mol/L}}} \right)} \cdot \frac{L}{d_w \cdot v_f^{0,7}}$$

$$c_{Fe} = c_{Fe0} \cdot e^{-\lambda \cdot L}$$

## Filterbemessung

Für die Enteisenung und Entmanganung wurden die Arbeitsblätter W223-1 bis 3 des DVGW Regelwerkes herausgegeben (/R3254/).

- Darin sind die Enteisenungs- und Entmanganungstypen definiert und
- für die Bemessung wird eine differenzierte Fallunterscheidung vorgeschlagen.
- Die Bemessung erfolgt für  $Fe_L=0,02$  mg/L bzw.  $Mn_L=0,02$  unter dem Trinkwassergrenzwert um biologische Nachreaktionen im Netz zu vermeiden.

# Entmanganung durch Filtration (autokatalytische Entmanganung)

Im Anschluss an die Enteisenung beginnt die **Entmanganung**.

Ohne Zugabe von Oxidations- oder Fällmitteln verläuft diese ähnlich der Enteisenung autokatalytisch an der Oberfläche des Filtermaterials.

Die Adsorption von Mangan an der Oberfläche steht in Konkurrenz zu anderen Kationen, vor allem Ammonium, Eisen(II) und Härtebildnern.

Deshalb läuft meist zwischen Enteisenung und Entmanganung noch bevorzugt die Ammoniumoxidation ab.

Die chemikalienlose Entmanganungsfiltration nach BOHM (/R0319/) ist ein zu 80...95 % auf mikrobiologischer Förderung basierendes Wasseraufbereitungsverfahren zur Entfernung von Mangan(II) aus reduzierten, organisch schwach belasteten Grundwässern durch Filtration nach offener oder geschlossener Belüftung über körniges, auch alkalisches Filtermaterial ohne vorherige Chemikaliendosierung.

$$v_{\text{Mn}} = \eta \left[ \frac{k_{\text{Mn}}}{\exp\left(\frac{5280}{T}\right)} \frac{n_p \cdot B \cdot (\text{pH} - 5,6) \cdot c_{\text{HCO}_3}^{0,2} \cdot \left(12,5 \frac{\text{mmol}}{\text{L}} - c_{\text{Ca}} - c_{\text{Mg}}\right)^{0,3}}{\ln\left(\frac{c_{\text{Mn}0}}{c_{\text{MnL}}}\right)} \frac{L}{d_w} \right]^{1,6}$$

konkurrierende Adsorption

## Autokatalytische Enteisenung - Filterbemessung -

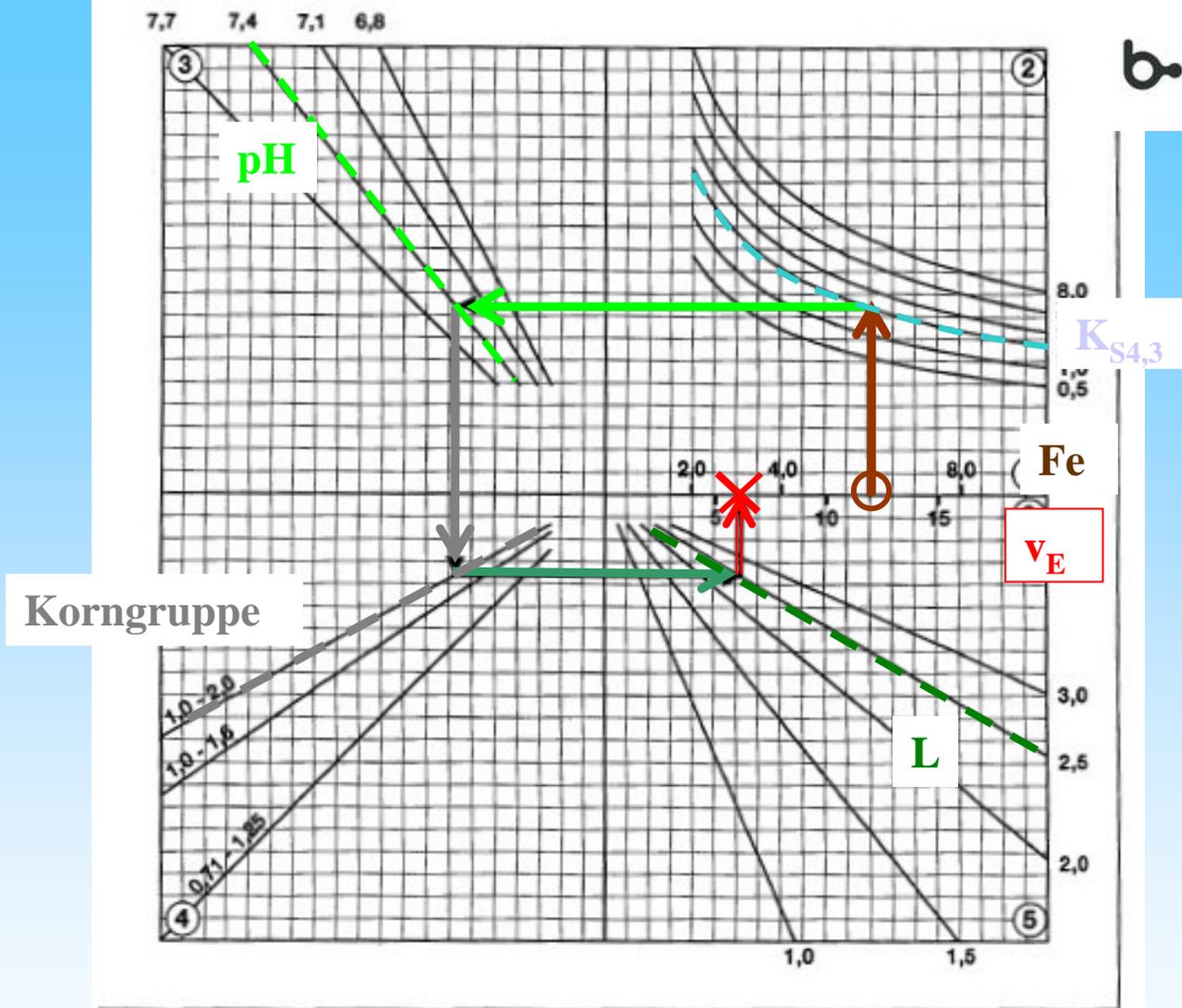
		Eisen(II) inert	Mn(II) inert	Eisen(II) basisch	Mn(II) basisch
$c_0$	mg/L	$0,5 \leq c_{Fe0} \leq 10$	$0,1 \leq c_{Mn0} \leq 2$	$0,5 \leq c_{Fe0} \leq 10$	$0,1 \leq c_{Mn0} \leq 2$
		Fe(II) $\geq 60\%$		Fe(II) $\geq 80\%$	
$c_L$	mg/L	0,02	0,01	0,02	0,01
$K_{S4,3}$	mmol/L	$0,5 \leq K_{S4,3} \leq 8$	$0,5 \leq K_{S4,3} \leq 8$	$0,2 \leq K_{S4,3} \leq 2,0$	$\geq 0,5$ *)
pH <sub>0</sub>	l	$\geq 6,8$ **)	$\geq 6,8$	$5 \leq pH < 6,8$	$> 6,6$ *)
Korngruppen	mm	0,71/1,25; 1,0/1,6; 1,0/2,0		0,5/1,2; 0,5/2,5	
$d_w$	mm	1,0; 1,3; 1,5		0,85; 1,5	
$v_f$	m/h	$\leq 20$	$\leq 20$	$\leq 20$	$\leq 20$
$c_{NH4}$	mg/L	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
$c_{CH4}$	mg/L	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$

# Grundwasseraufbereitung

## **Autokatalytische Enteisenung** - Filterbemessung -

In den Arbeitsblättern W223-1 bis 3 des DVGW Regelwerkes wird die zulässige Filtergeschwindigkeit über Nomogramme ermittelt.

Dabei ist die Ablesegenauigkeit gering.



Korngruppe

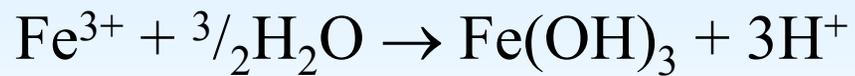
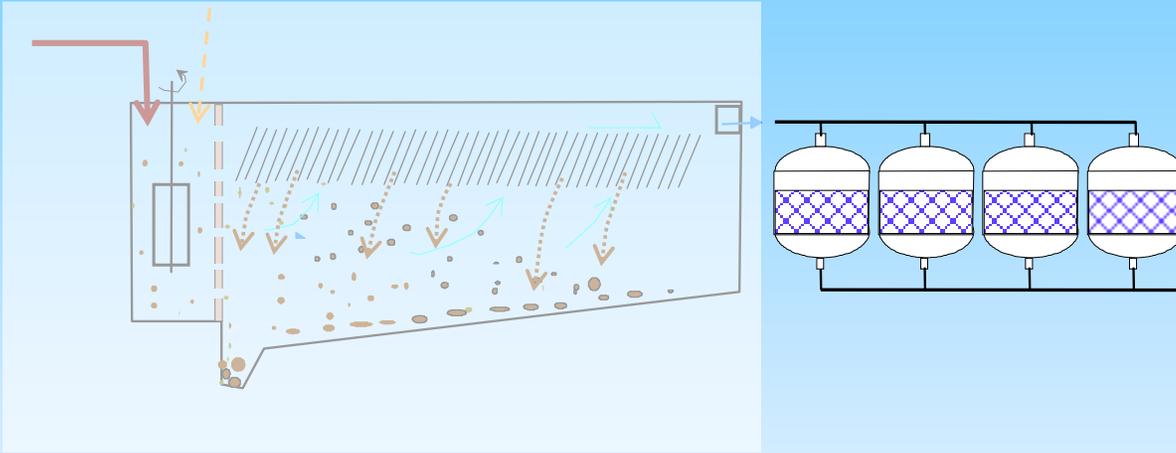
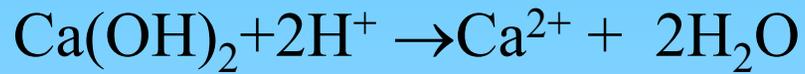
- ① Eisenkonzentration Filterzulauf in  $\text{g/m}^3$
- ② Säurekapazität Filterzulauf in  $\text{mol/m}^3$
- ③ pH-Wert Filterzulauf
- ④ Korngruppe in mm
- ⑤ Filterschichthöhe in m
- ⑥ Filtergeschwindigkeit in  $\text{m/h}$

Beispiel:	
$\delta(\text{Fe})_0$	= $6,0 \text{ g/m}^3$
$\delta(\text{Fe}^{2+})_0$	= $5,5 \text{ g/m}^3 > 60\% \delta(\text{Fe})_0$
$K_{S4,30}$	= $2,0 \text{ mol/m}^3$
$\text{pH}_0$	= $7,4$
Korngruppe	= $1,0 - 2,0 \text{ mm}$
$l$	= $2,5 \text{ m}$
<u><math>v = 6,3 \text{ m/h}</math></u>	

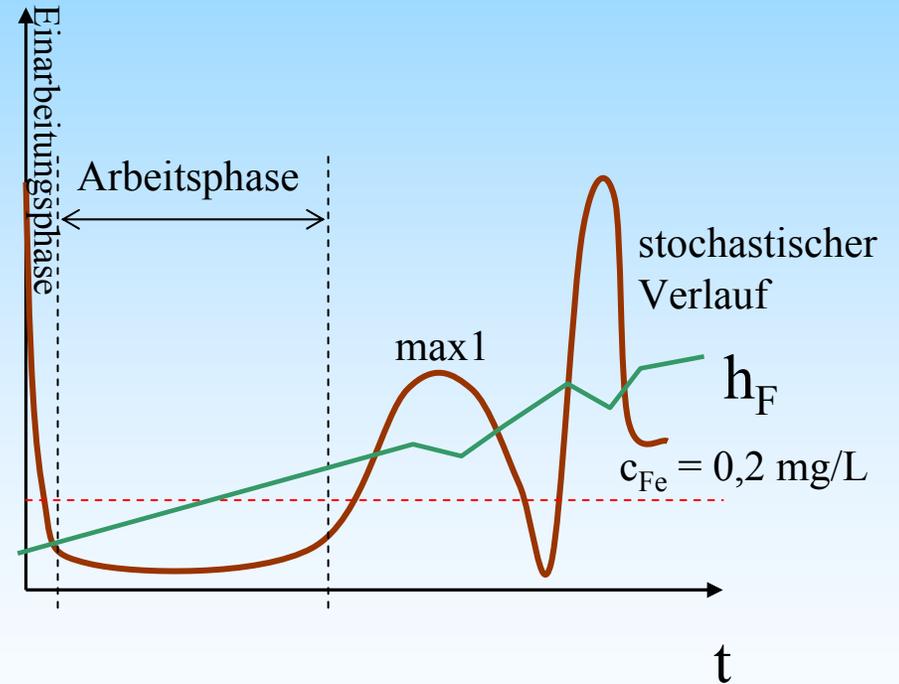
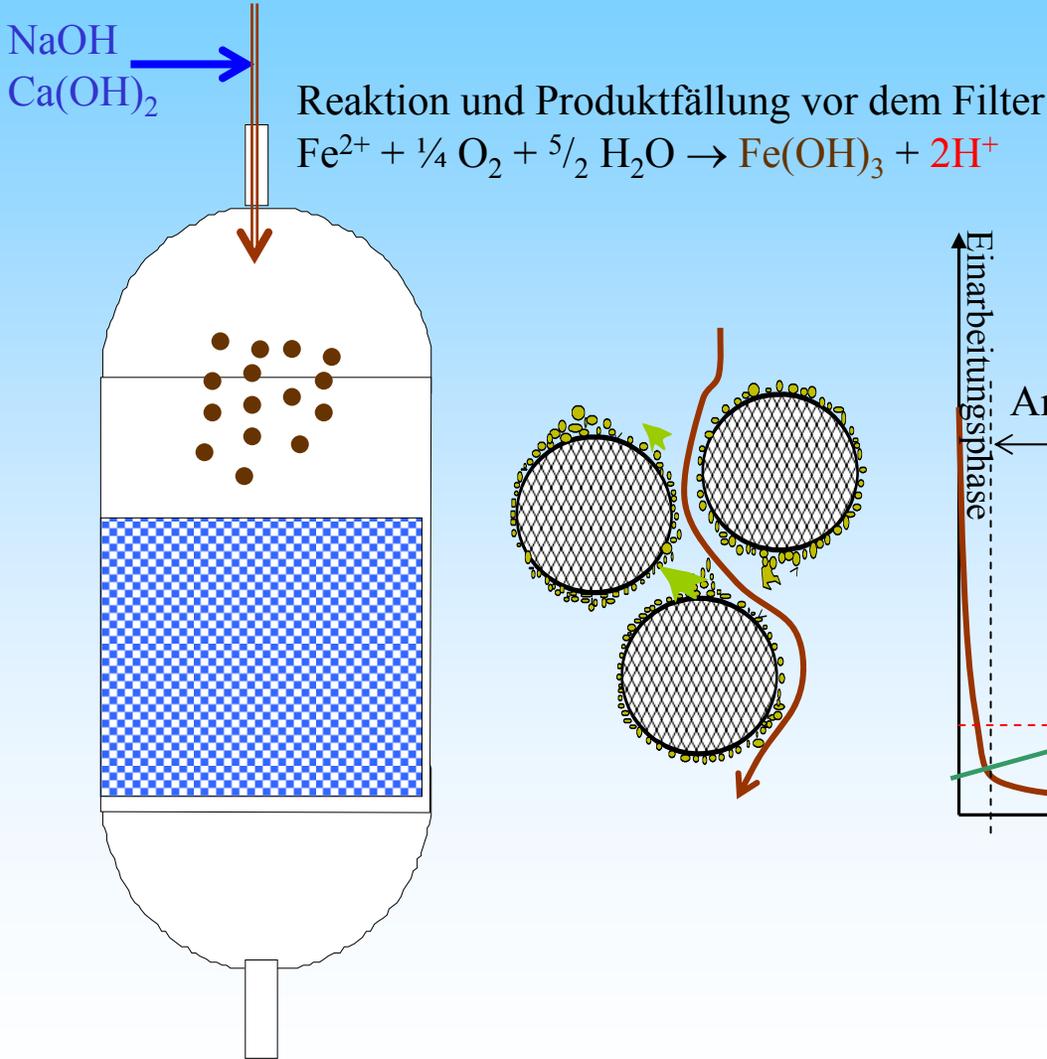
## Autokatalytische Enteisenung - Filterbemessung -

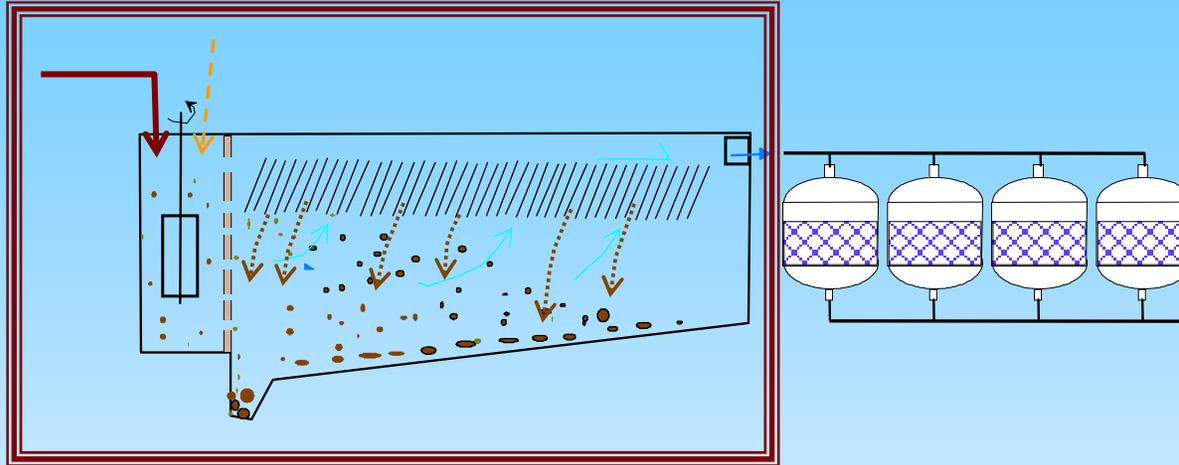
$$v_E = \left[ \frac{2460 \max \left\{ \begin{array}{l} (\text{pH}_0 - 6,2) \\ (0,11 \cdot \text{pH}_0 - 0,24) \end{array} \right\}}{\exp \left( \frac{E_A}{RT} + 2,04 \cdot \sqrt{\frac{I}{1 \text{ mol/L}}} \right) \cdot \ln \left( \frac{c_{\text{Fe0}}}{c_{\text{FeL}}} \right)} \cdot \frac{L}{d_w} \right]^{1,43}$$

$$v_E = 0,88 \left[ \frac{3 \cdot (\text{pH} - 6,2) \cdot \text{Temp}^{0,8}}{c_{\text{Fe0}}^{0,1} \cdot \ln \left( \frac{c_{\text{Fe0}}}{c_{\text{FeL}}} \right)} \cdot \frac{L}{d_w} \right]^{1,28}$$



# Eisen(III)filtration

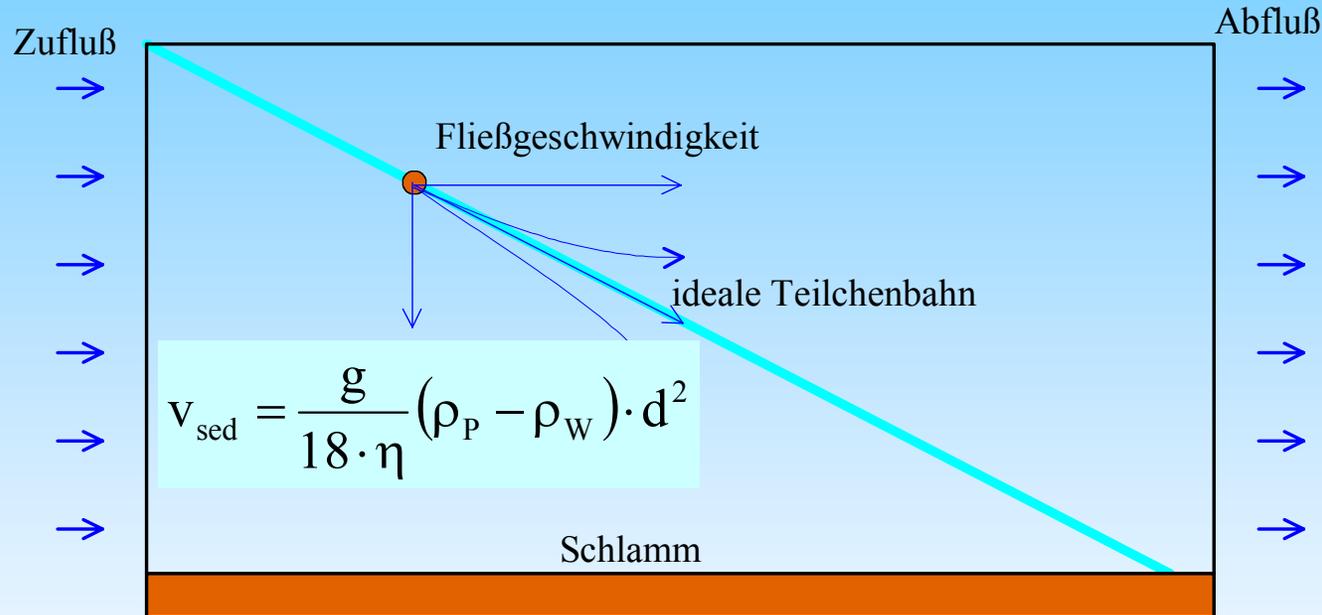




Auch für die Eisen(III)Filtration wurden Bemessungsformeln (WAPRO 1.54/03) entwickelt, die sich jedoch nicht besonders bewährt haben. Die Vorbereitung dieser Anlagen sollte über Versuche erfolgen.

- Laborversuche zur Optimierung der Chemikalienkombination
- kleintechnische Versuche zur Bemessung der Anlage
- großtechnische Optimierung der Betriebsparameter

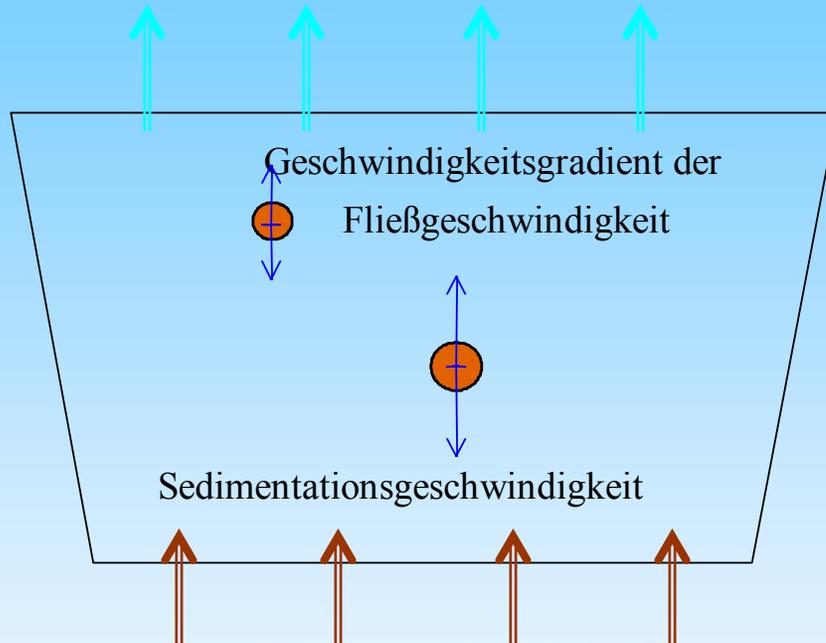
Unter Sedimentation versteht man das Absetzen suspendierter Feststoffe unter dem Einfluss der Schwerkraft. Die einzelnen Teilchen setzen sich dabei entsprechend ihrer Dichte, Größe und Gestalt ab (DVGW W 217).



$$v_t = \frac{Q}{F} < v_{\text{sed}}$$

Das Teilchen erreicht den Beckenboden nur, wenn seine Sedimentationsgeschwindigkeit  $v_{\text{sed}}$  größer ist als die sogenannte Oberflächenbeschickung  $v_t$ , dem Quotienten aus Beckenoberfläche  $F$  und dem Durchsatz  $Q$  durch das Sedimentationsbecken

# Sedimentation



# Bemessung der Oberflächenwasseraufbereitung



Flockung

Aktivkohlebehandlung

Oxidation und Desinfektion

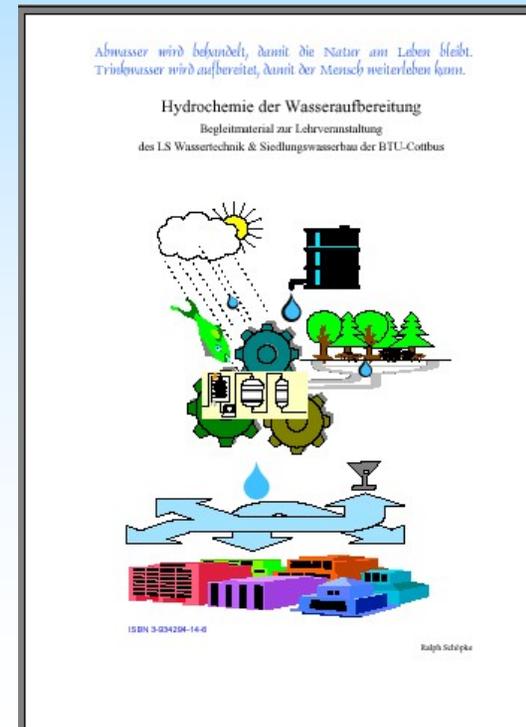
Oxidationsverfahren

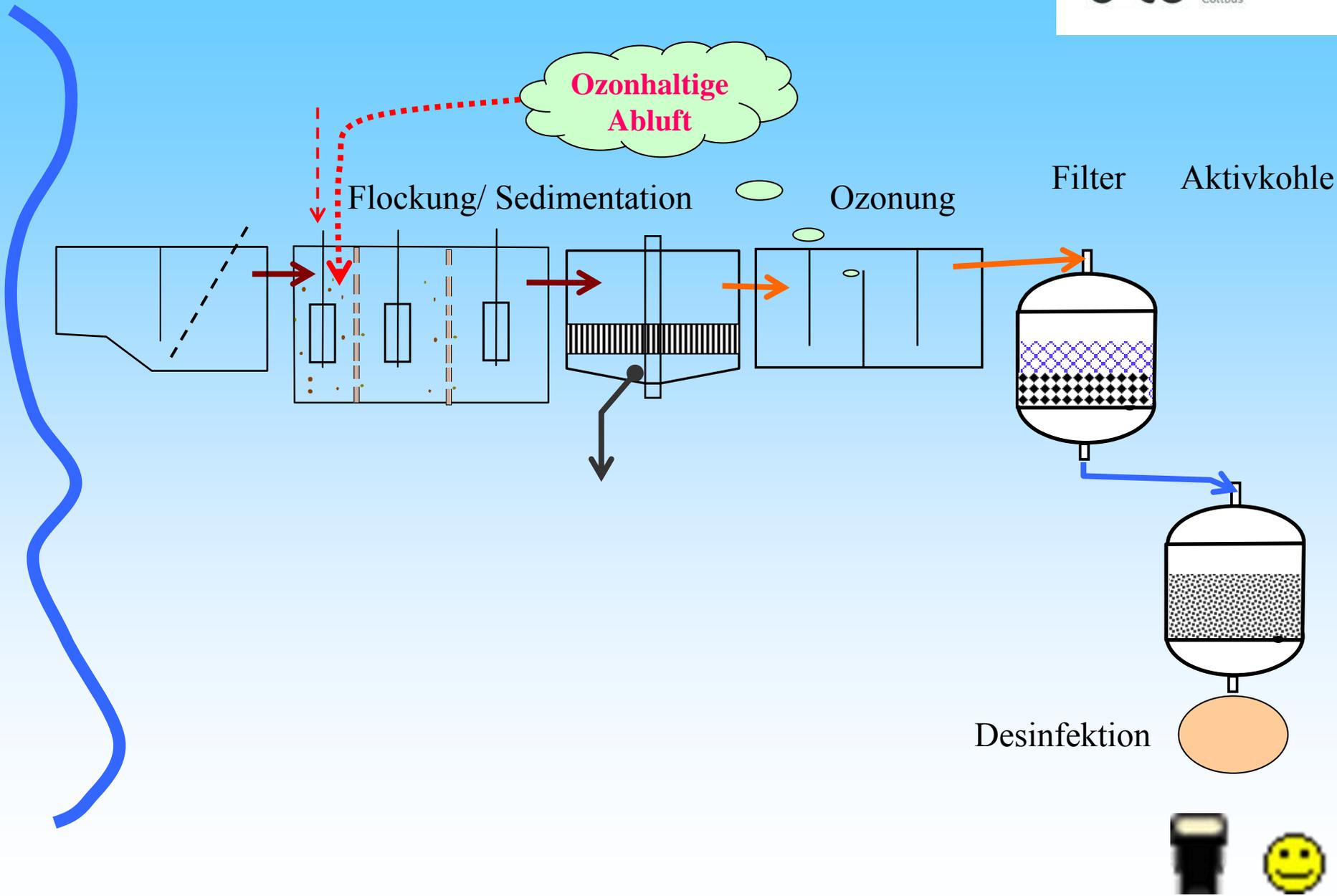
Desinfektionswirkung

UV-Desinfektion

Membranverfahren

<http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/de/wassertechnik-und-siedlungswasserbau/lehre/skripte/vorlesungen.html>





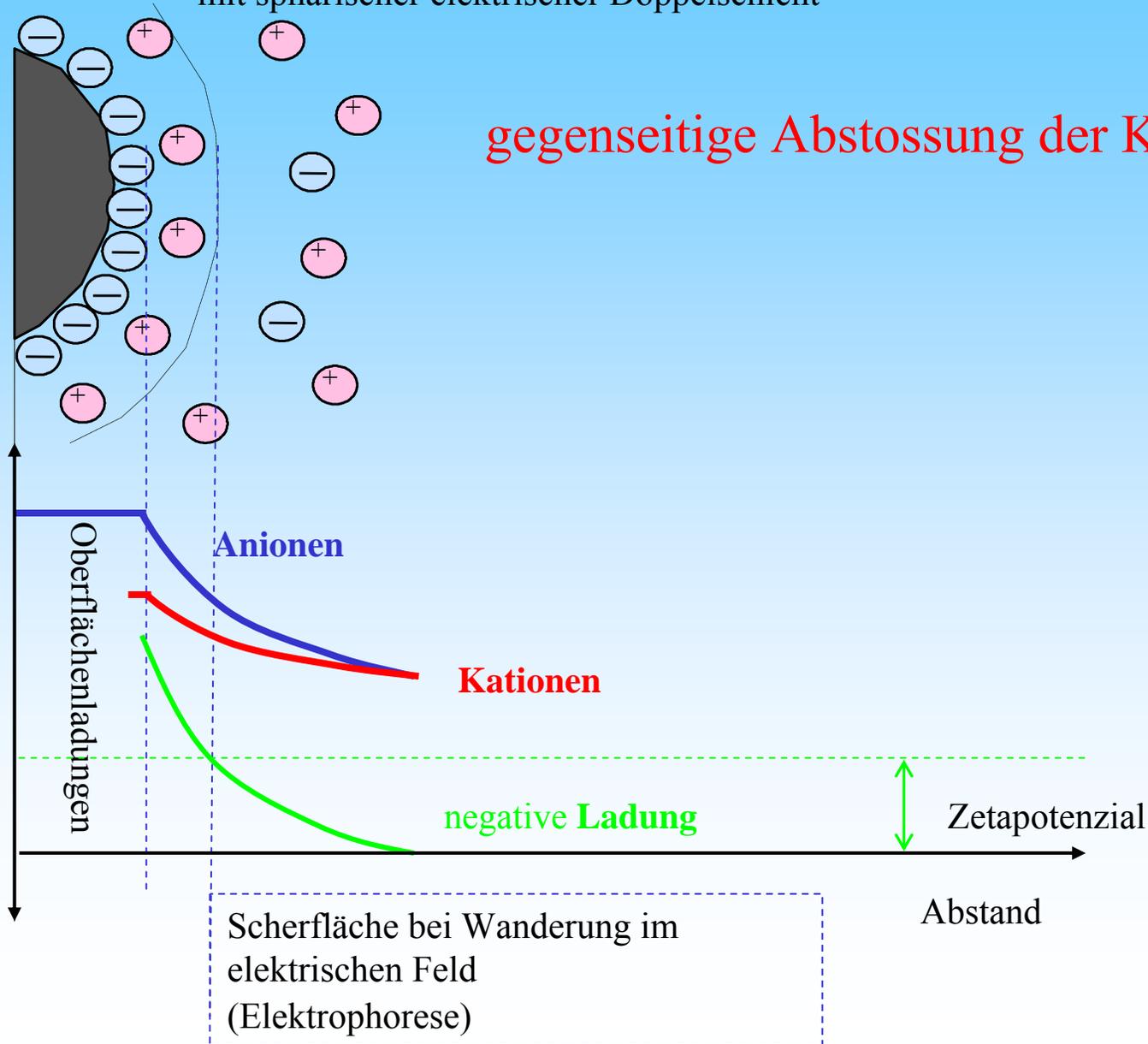
Dieser Wasserbehandlungsprozess ist dadurch gekennzeichnet, daß in seinem Verlauf aus dem

- zugesetzten Flockungsmittel und Verschmutzungsstoffen des Wassers
  - Partikel entstehen, die eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Flockenform aufweisen und sich auf Grund ihres
  - guten Absetzvermögens verhältnismäßig schnell als Schlamm abtrennen lassen (Sedimentationsflockung).
- (/R0086/)

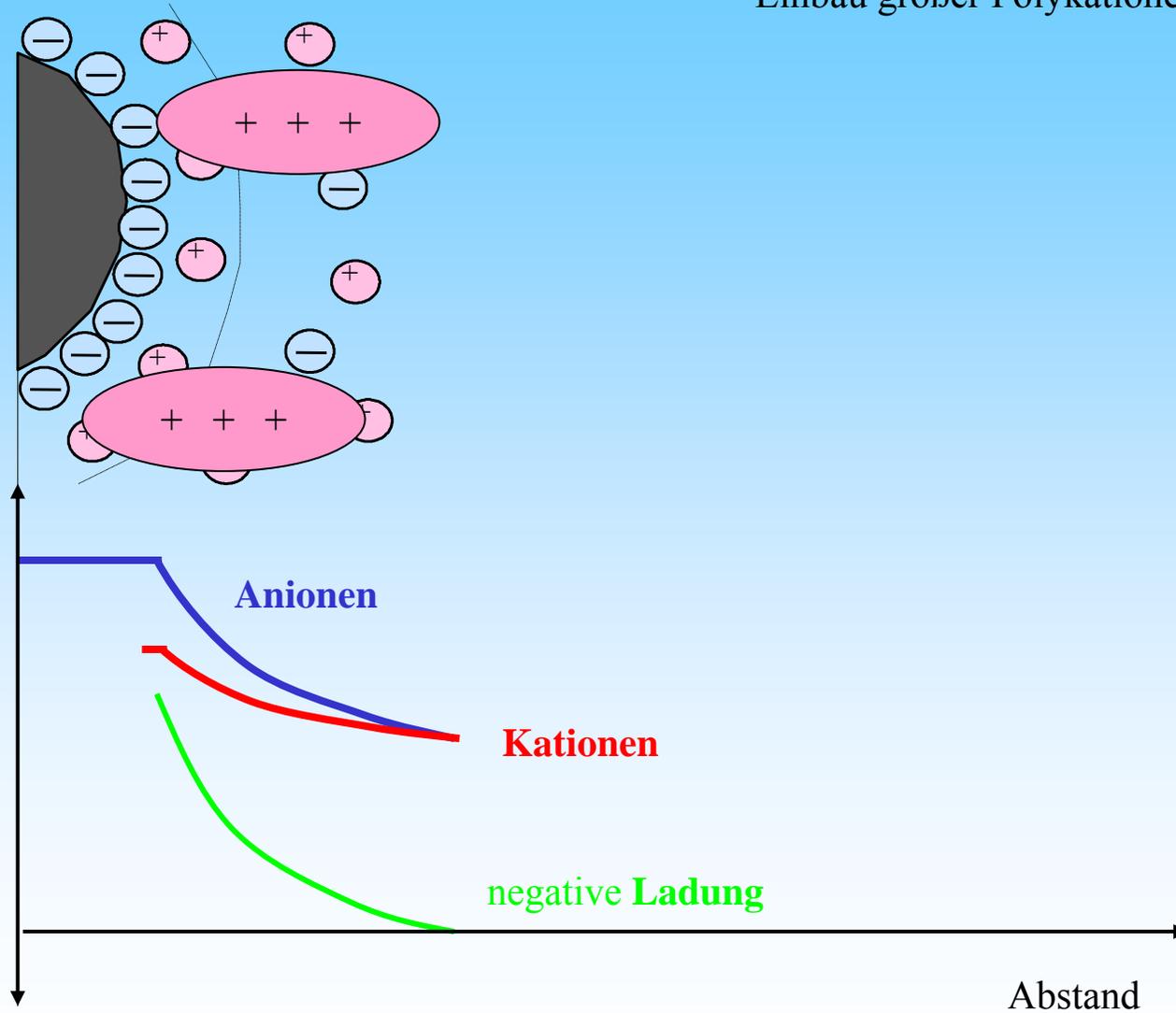
- kolloide organische und anorganische Verbindungen
- grobdisperse, aber wegen ihrer Kleinheit nur sehr langsam sedimentierende Teilchen
- Elimination echt gelöster Substanzen durch Sorption an der Flocke

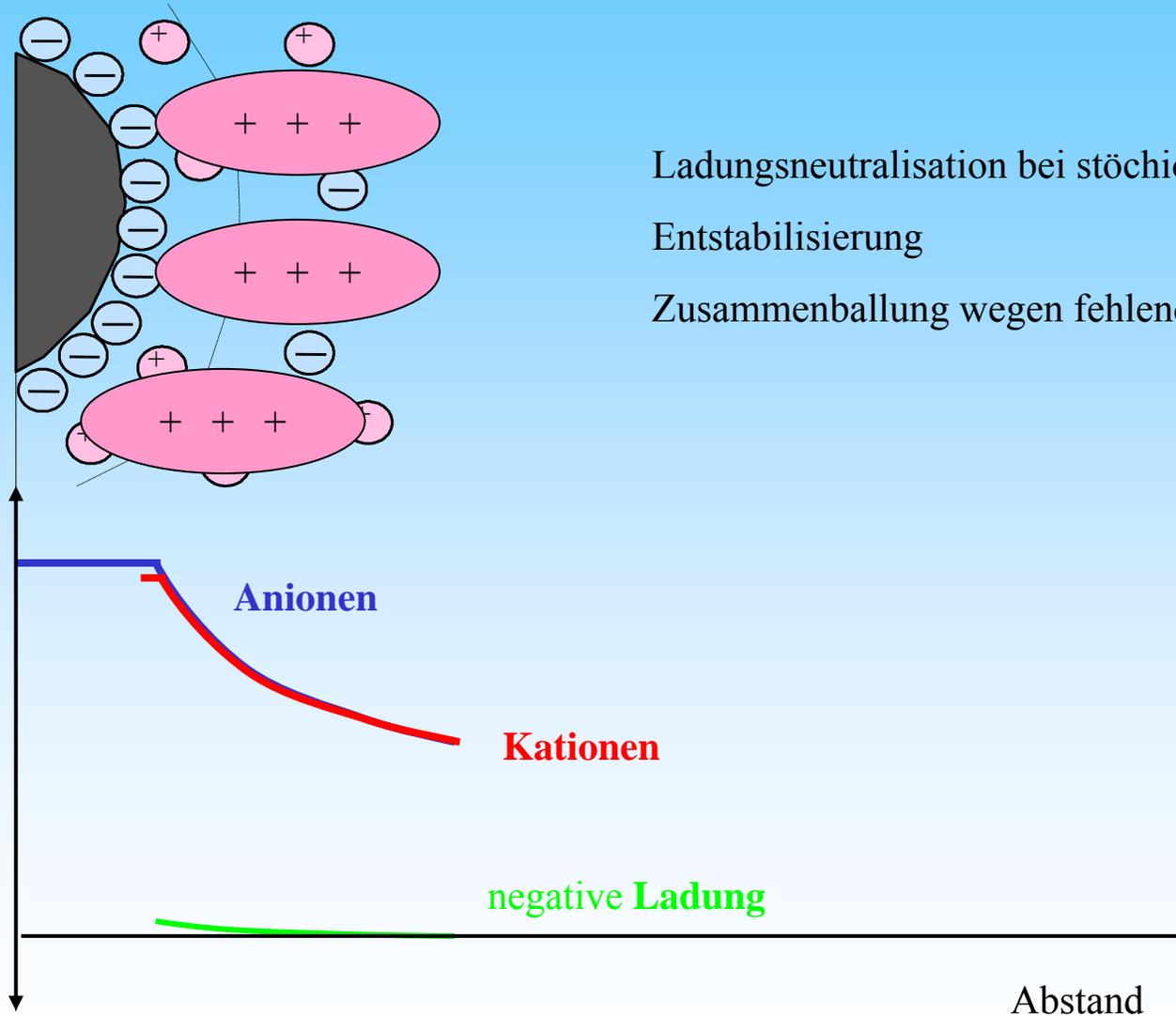
Kolloidpartikel mit sphärischer elektrischer Doppelschicht

gegenseitige Abstossung der Kolloidpartikel



Einbau großer Polykationen

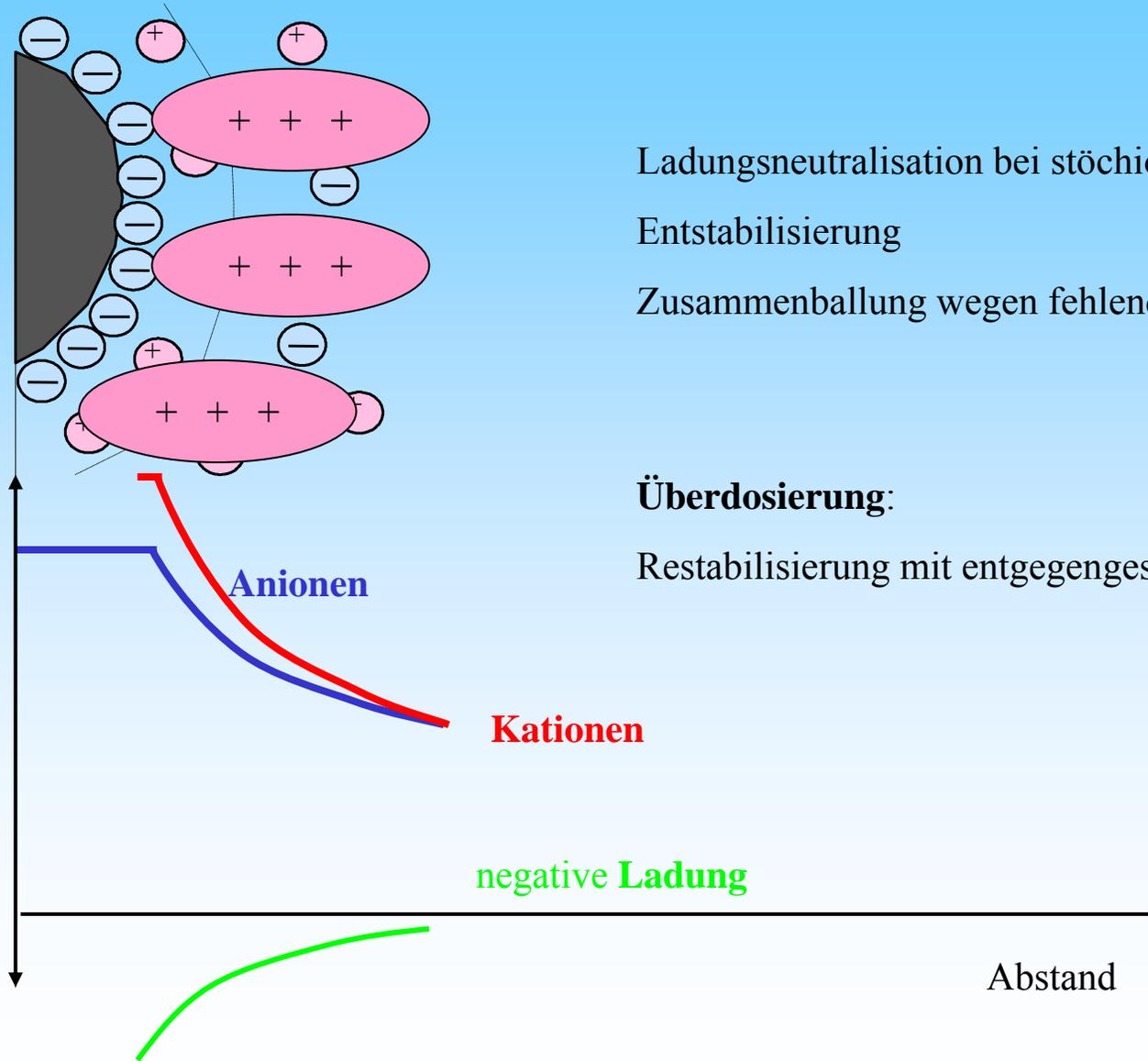




Ladungsneutralisation bei stöchiometrischer Zugabe

Entstabilisierung

Zusammenballung wegen fehlender Abstossung



Ladungsneutralisation bei stöchiometrischer Zugabe  
 Entstabilisierung  
 Zusammenballung wegen fehlender Abstossung

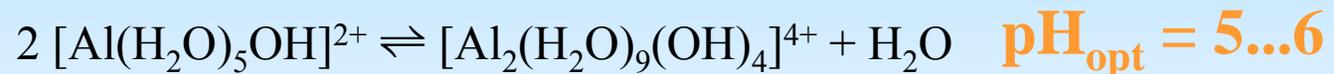
**Überdosierung:**  
 Restabilisierung mit entgegengesetzter Aufladung

### Hydrolyse von Aluminiumionen:



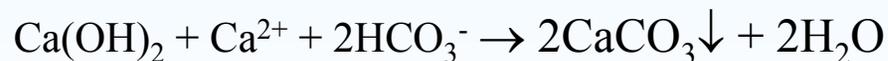
Eisen(III)salze  
hydrolysieren analog

mehrkernige Komplexe => grosse Polykationen ...



Polykationen wachsen unter Protonenabgabe zu neutralen Mikrofloccen heran.

### Flockung mit Kalk:



**pH<sub>opt</sub> > 8**

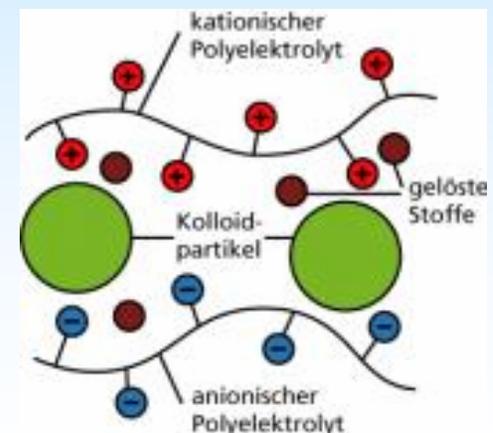
Polykationen wachsen unter Protonenabgabe zu neutralen Mikroflochten heran.

## Einschlußflockung

Bei einem Überschuss von Flockungsmittel werden die Schmutzstoffe im Hydroxidniederschlag eingeschlossen.

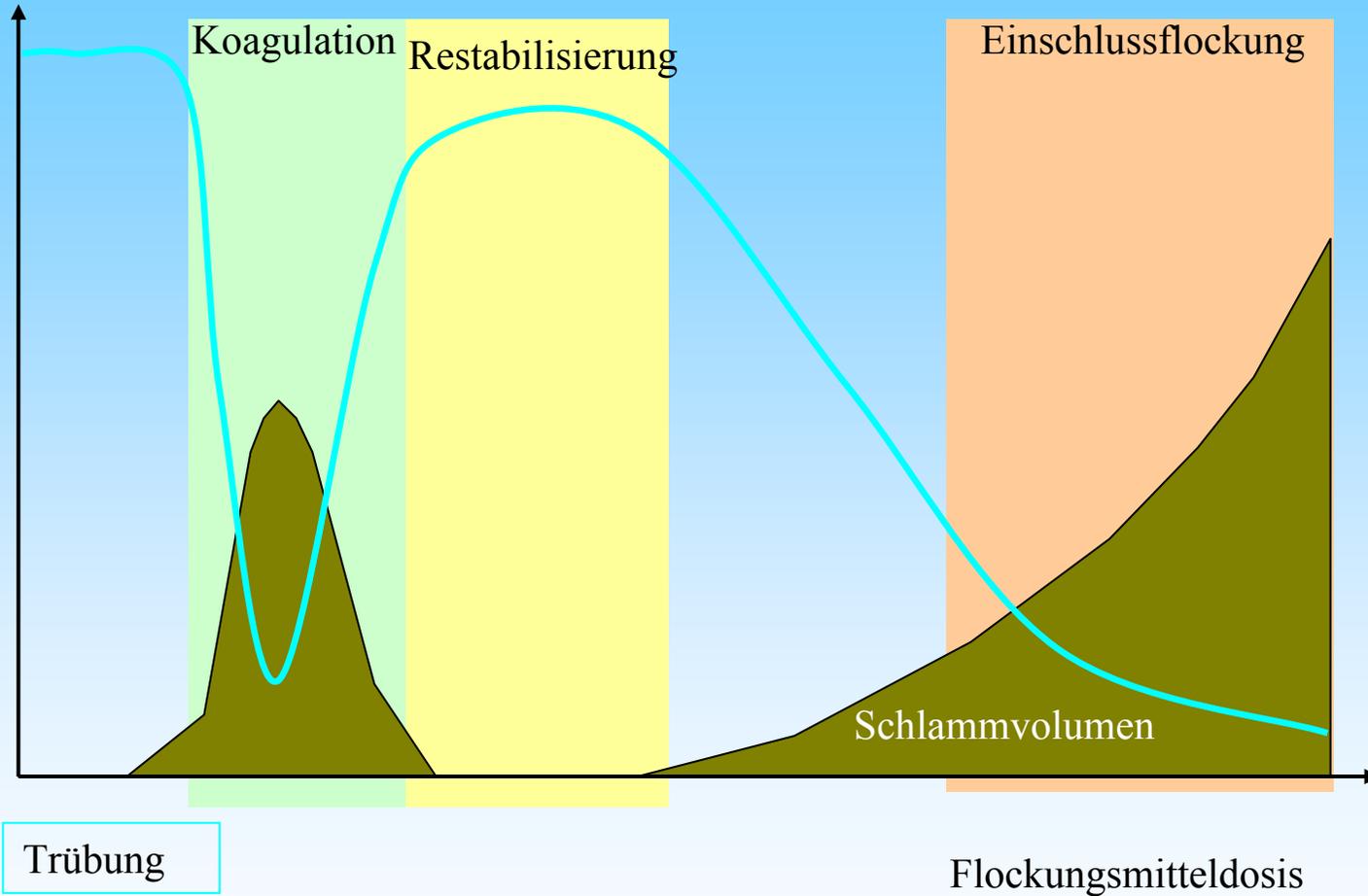
## Flockulation

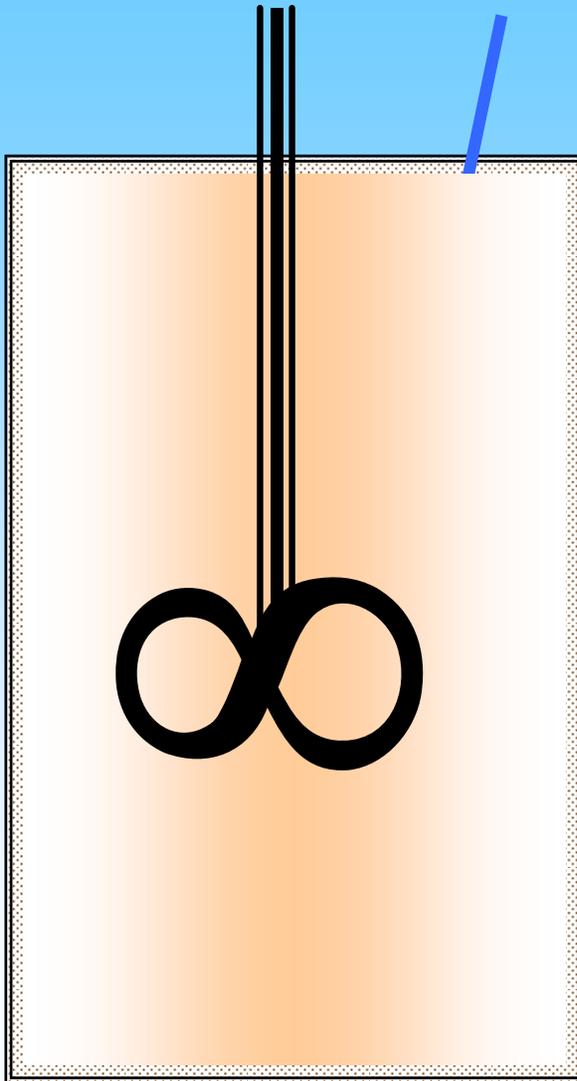
Das Flockungsmittel bildet langgestreckte Moleküle, die einzelne Kolloide miteinander vernetzen und so zu großvolumigen Flocken führen. Eine Überdosierung führt zur Restabilisierung. Geeignet sind als Flockungsmittel vor allem synthetische Produkte.



# Flockung

Trübung, Schlammvolumen

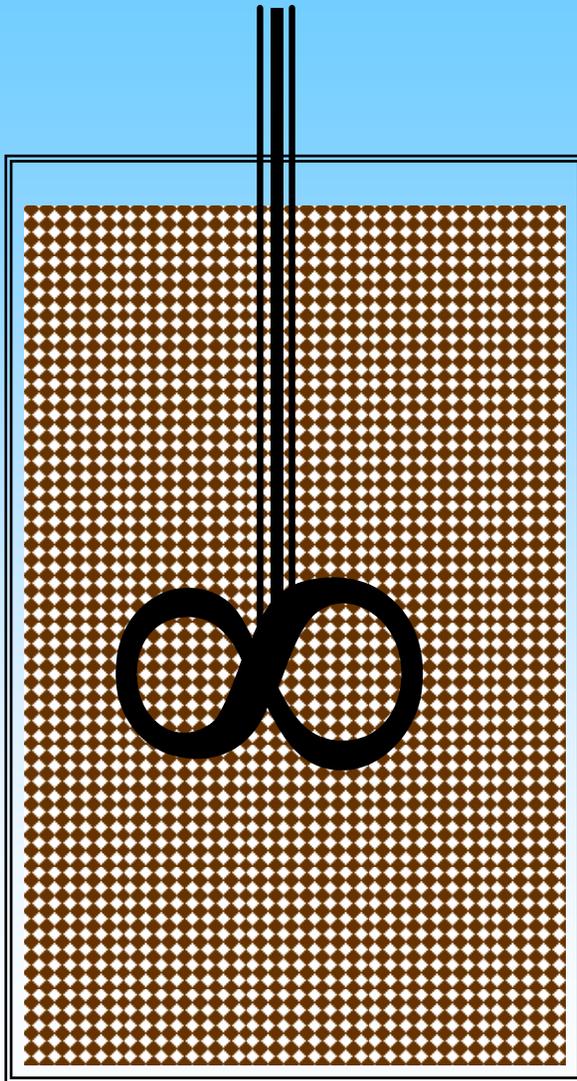




**Vermischung,**  
schnell und intensiv

**Hydrolyse,**  
sofort nach der Vermischung

Schlammvolumen



## **Vermischung,**

schnell und intensiv

## **Hydrolyse,**

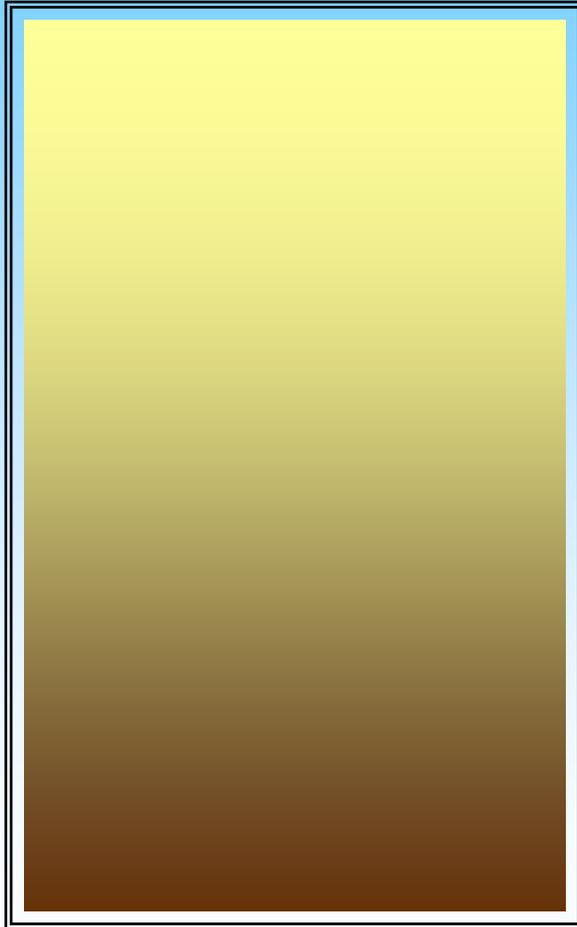
sofort nach der Vermischung

**Perikinetische Phase,** Brownsche  
Molekularbewegung, bis  $1\mu\text{m}$

## **Orthokinetische Phase,**

ab  $1\mu\text{m}$  Flockengröße  
Teilchenkollisionen nur noch durch  
Rühren.

Scherkräfte bewirken Flockenbildung  
und Zerschlagung.



## **Vermischung,**

schnell und intensiv

## **Hydrolyse,**

sofort nach der Vermischung

**Perikinetische Phase,** Brownsche Molekularbewegung, bis  $1\mu\text{m}$

## **Orthokinetische Phase,**

ab  $1\mu\text{m}$  Flockengröße  
Teilchenkollisionen nur noch durch Rühren.

Scherkräfte bewirken Flockenbildung und Zerschlagung.

## **Sedimentation**

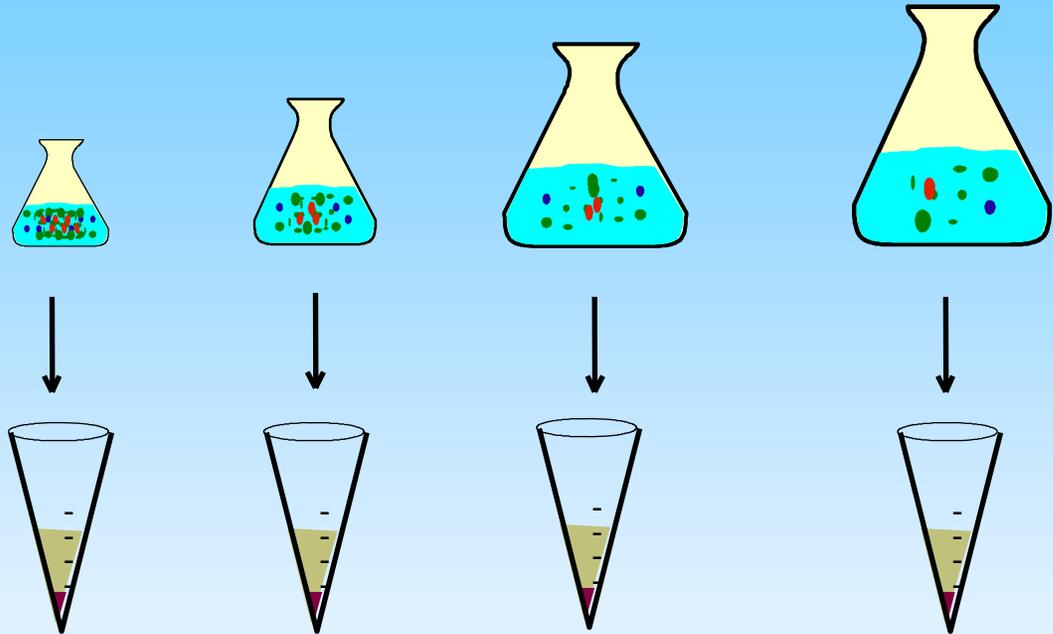
# Flockung

Bemessung

Für die Bemessung und Optimierung von Flockungsanlagen müssen in der Regel aufwendige Versuche durchgeführt werden.  
(s. Arbeitsblatt DVGW W218)

Laborversuche

Optimierung der  
Flockungschemikalien



Reinwasserbeschaffenheit  
und Schlammengen

## Pilotanlagen

Optimierung der Anlagen unter Praxisbedingungen

Optimierung des Energieeintrages durch Rührer, Einbauten, ...

Schlammgewinnung für die Bemessung der Schlammbehandlung

# Flockung

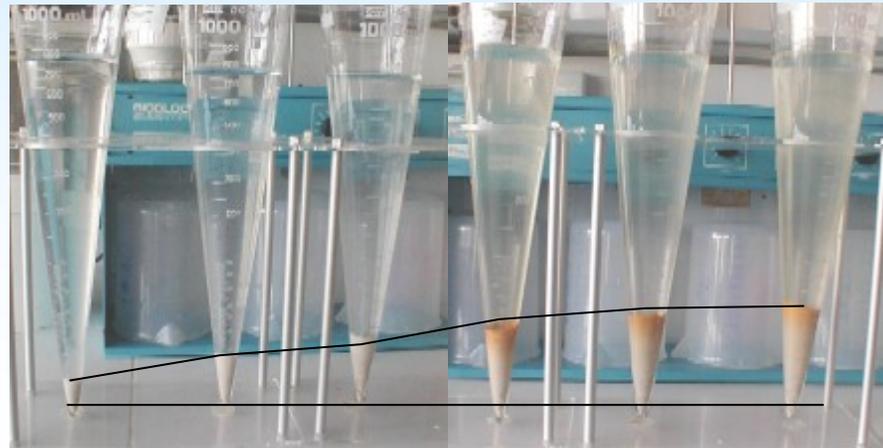
Flockungsmitteldosierung

Schnell- und Langsamrührphase

Sedimentation, Probenahme

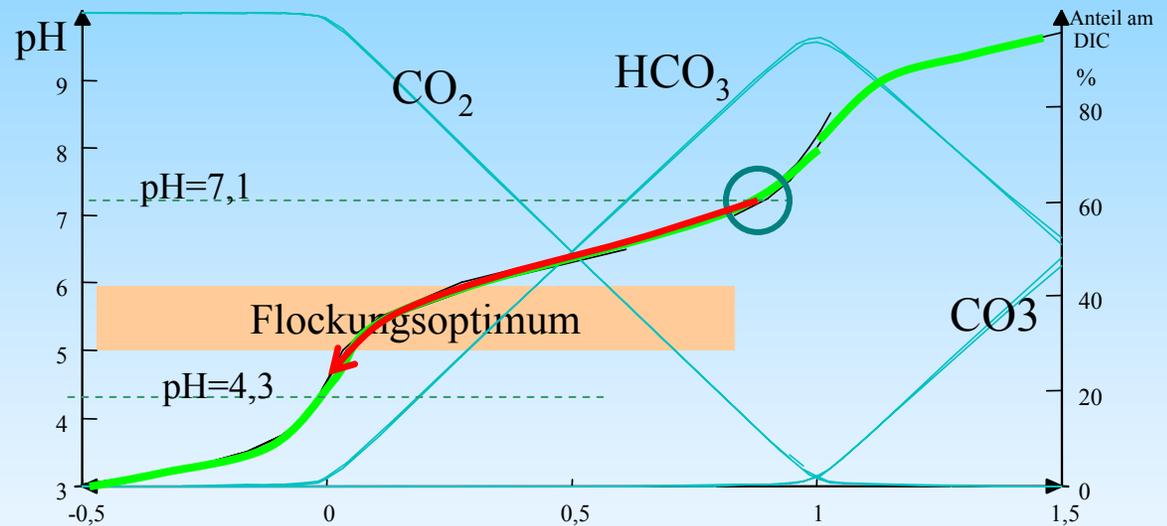
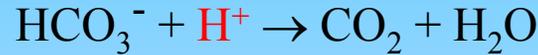
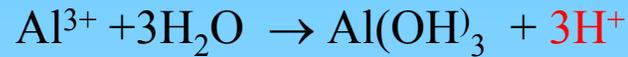


Sedimentation im Imhofftrichter  
zur Schlammvolumenbestimmung



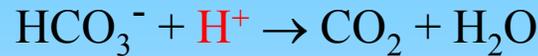
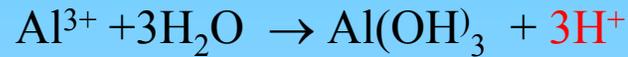
Parameter		Spree
Bez	Einheit	
Temperatur	°C	0...25
pH	1	6,5...8,5
Ltf	µS/cm	650
K <sub>S4,3</sub>	mmol/l	1..1,5
K <sub>B8,2</sub>	mmol/l	0..0,2
GH	°dH	16
Ca <sup>++</sup>	mg/l	90
Mg <sup>++</sup>	mg/l	14
KH	°dH	2,8...4,2
CO <sub>2</sub>	mg/l	0..10
O <sub>2</sub>	mg/l	6..10
Fe-G	mg/l	2
Fe <sup>2+</sup>	mg/l	< 1
Mn <sup>2+</sup>	mg/l	< 0,6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	< 2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	< 20
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	mg/l	120
Cl <sup>-</sup>	mg/l	40
Oxidierbarkeit	mg/l	5

Frage: Wieviel Aluminium darf man zugeben bei pH > 4,3



Parameter		Spree
Bez	Einheit	
Temperatur	°C	0...25
pH	1	6,5...8,5
Ltf	µS/cm	650
K <sub>S4,3</sub>	mmol/l	1..1,5
K <sub>B8,2</sub>	mmol/l	0..0,2
GH	°dH	16
Ca <sup>++</sup>	mg/l	90
Mg <sup>++</sup>	mg/l	14
KH	°dH	2,8...4,2
CO <sub>2</sub>	mg/l	0..10
O <sub>2</sub>	mg/l	6..10
Fe-G	mg/l	2
Fe <sup>2+</sup>	mg/l	< 1
Mn <sup>2+</sup>	mg/l	< 0,6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	< 2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	< 20
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	mg/l	120
Cl <sup>-</sup>	mg/l	40
Oxidierbarkeit	mg/l	5

Frage: Wieviel Aluminium darf man zugeben bei pH > 4,3



$$-\frac{c_{\text{Al}}}{1} = \frac{c_{\text{H}^+}}{3} = -\frac{c_{\text{HCO}_3^-}}{3}$$

$$c_{\text{Al}} = \frac{c_{\text{HCO}_3^-}}{3} \text{ [mmol / L]}$$

$$c_{\text{Al}} = \frac{c_{\text{HCO}_3^-}}{3} 27 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} \text{ [mg / L]}$$

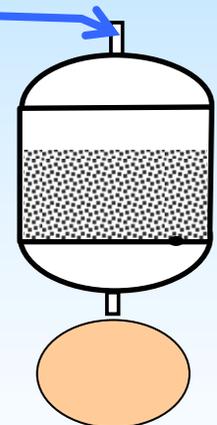
$$c_{\text{Al}} = \frac{1 \text{ mmol / L}}{3} 27 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} = 9 \text{ mg / L}$$

## Einsatz der Aktivkohle zur Entfernung von

- Geruchs und Geschmacksstoffe
- Reduzierende Stoffe
- Keimfördernde Stoffe
- Haloformbildende Stoffe
- Stoffgruppen, die über Summenparameter definiert sind, insbesondere DOCI
- Stoffe mit Schadwirkungen auf den Organismus
- Entchlorung

Aktivkohle

Desinfektion



## Sorptionsprozesse

Adsorption im engeren Sinne bezeichnet die Anreicherung von Stoffen an der Oberfläche von Flüssigkeiten und vor allem von Festkörpern.

Sie erfolgt durch Wechselwirkung der aktiven Zentren mit Atomen, Molekülen oder Ionen einer benachbarten flüssigen oder gasförmigen Phase (KÜMMEL & WORCH 1990, /R0660/).

Das ist **A**bsorbieren



Das war **A**dsorbieren



## Sorptionsisothermen

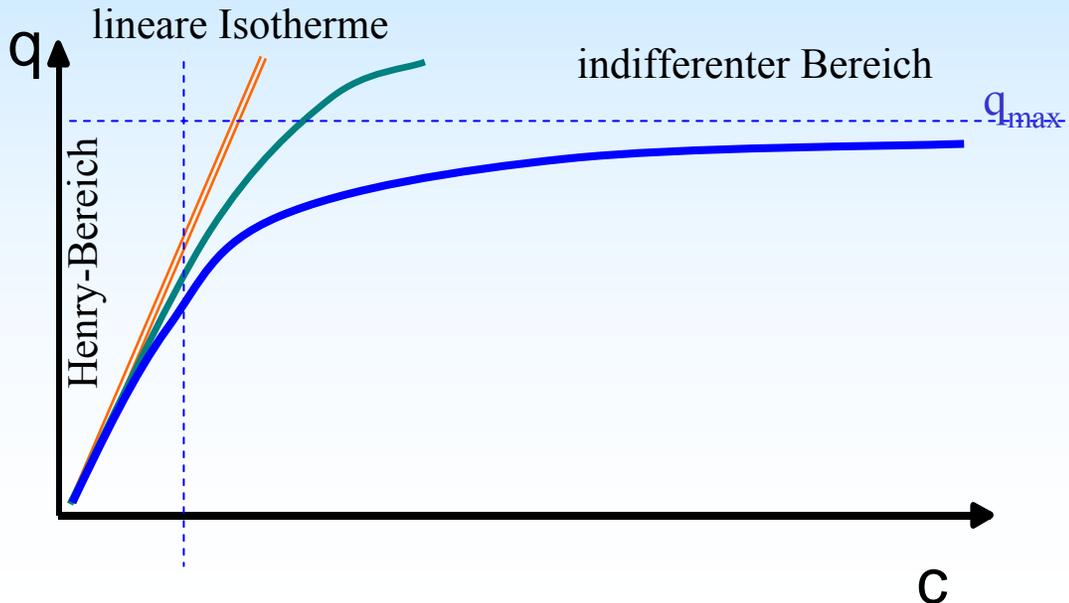
Nernstsches Verteilungsgesetz

$$K_d = \frac{c_1}{c_2}$$

$$q = K_d \cdot c_1$$

mit  $c$  = Lösungskonzentration [mol/L, mmol/L]  
 $q$  = Konzentration des Adsorbates [mol/kg, mmol/kg]

empirische FREUNDLICH-Isothermengleichung  $q = K_F \cdot c^n$



LANGMUIR-Isotherme

Erweiterung nach BUTTLER/OCKRENT für konkurrierende Stoffe

$$q_A = q_{max} \frac{b_A \cdot c_A}{1 + b_A \cdot c_A + b_B \cdot c_B}$$

## Sorptionsisothermen

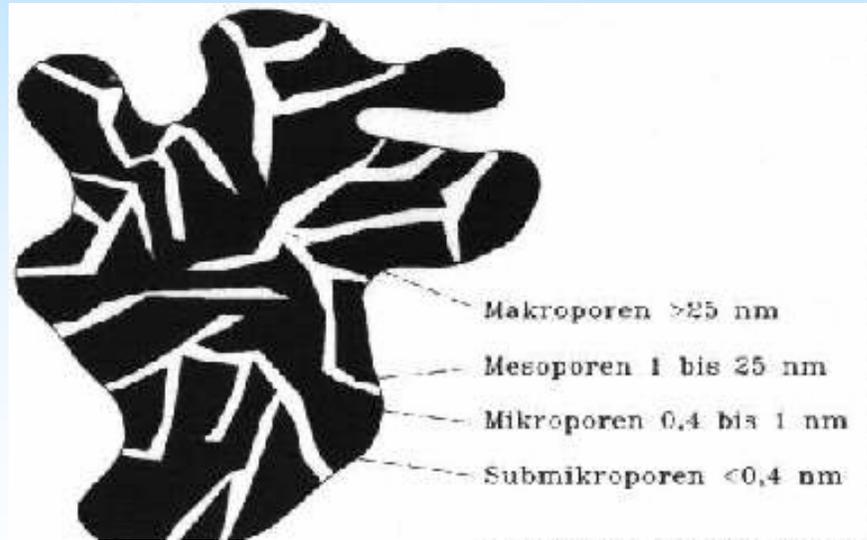
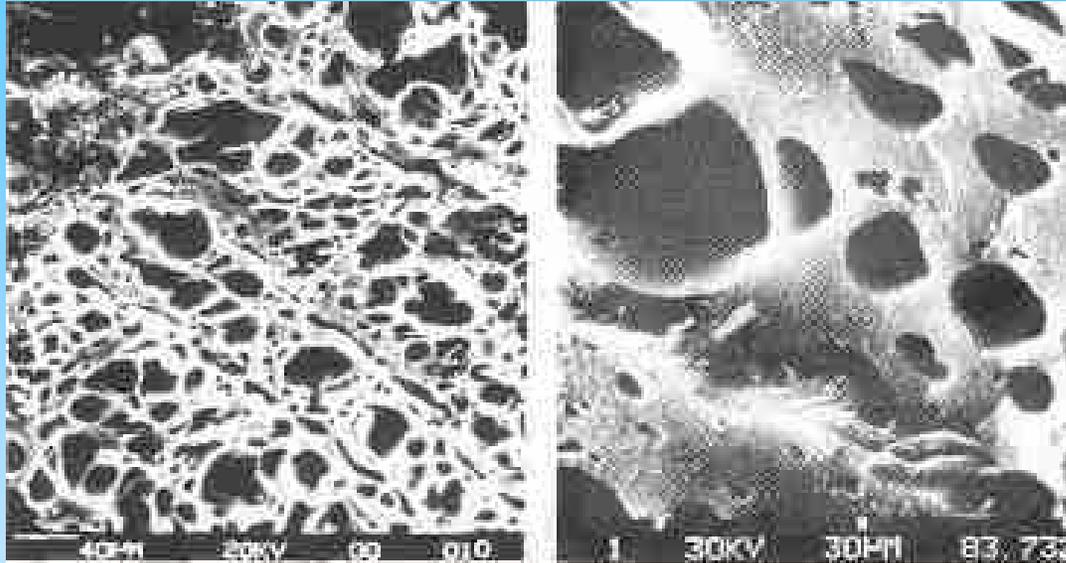
LANGMUIR-Isotherme:

- ideale Sorptionsoberflächen.
- Koeffizient  $b$  entspricht der Gleichgewichtskonstanten (freie Adsorptionseenthalpie)

Die realen Sorptionsoberflächen weichen meist so stark von dieser Idealvorstellung ab.

## Herstellung:

- aus verschiedenen kohlenstoffhaltigen Naturprodukten (Holz, Torf, Koks, Braunkohlen, organische Abfallprodukte)
  - durch thermische Behandlung:
  - Dabei laufen die zu einer Verkokung führenden Pyrolysereaktionen und die eigentlichen Aktivierungsreaktionen nebeneinander zwischen 850 - 950 °C ab.
  - Bei der Aktivierung wird selektiv Kohlenstoff unter Ausbildung von Poren und Klüften entfernt.
- 
- Die **beladene Aktivkohle** wird thermisch mit **Wasserdampf regeneriert**, wobei die adsorbierten Stoffe desorbiert oder mit einem Teil der Kohle oxidiert werden.



Rasterelektronenmikroskopische Bilder von Aktivkohle (Lurgi GmbH)

## Kenngößen

- mittlerer Korndurchmesser, Korngrößenverteilung
- Partikeldichte
- Bettdichte (abgetropft)
- Porenvolumen (Schüttung, Korn)
- BET-Oberfläche
- Jodzahl [mg/g]
- Phenolaufnahme [Masse-%]

hohe Adsorptionskapazität der Aktivkohle

sehr große innere Oberfläche um 1000 m<sup>2</sup>/g (BET)

hauptsächlich unpolare bzw. lipophile Spurenstoffe adsorbiert.

Porenradiusverteilung bestimmt Zugänglichkeit für Wasserinhaltsstoffe

Maximum der Porenradienverteilung 0,2 und 0,8 nm

Makromolekulare Huminstoffe o.ä. können mitunter in Konkurrenz zu Mikroverunreinigungen treten oder durch Blockieren der Mikroporen die Aufbereitungsleistung der Aktivkohle beeinträchtigen

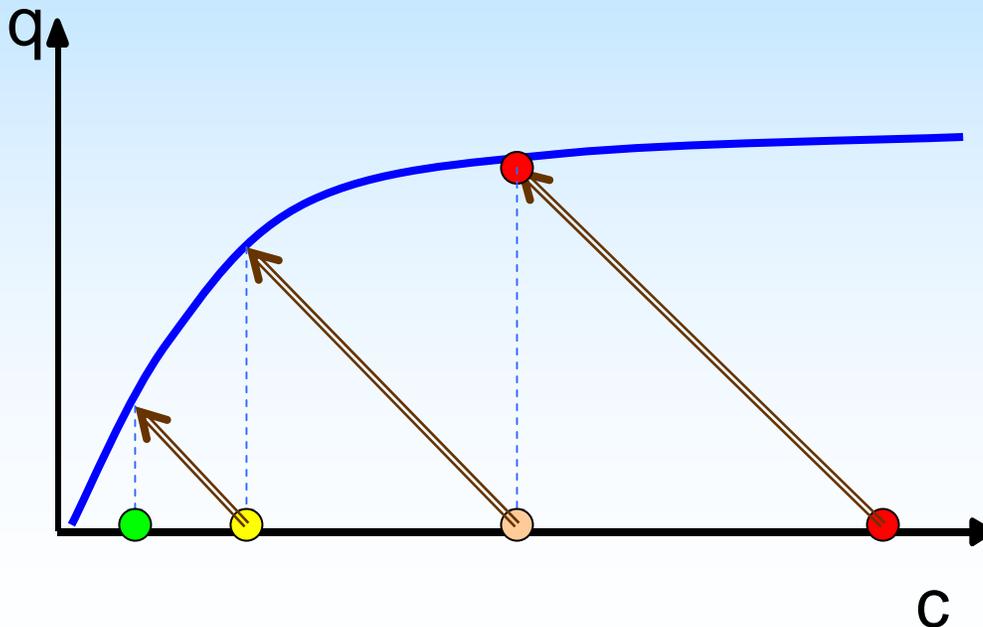
- pulverförmiges Adsorbens
- im Kontakt mit der zu reinigenden Lösung
- nach vorgegebener Einwirkzeit
- von der flüssigen Phase abtrennen

Massenbilanz

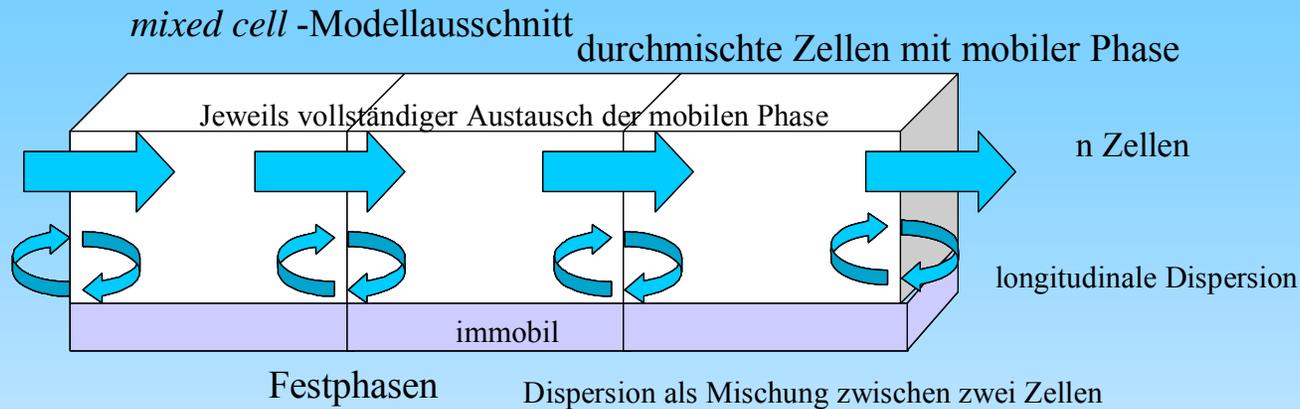
vorher

nachher

$$V \cdot c_0 + m \cdot q_0 = V \cdot c_1 + m \cdot q_1$$



$$q_1(c) = \frac{V}{m} \cdot (c_0 - c_1)$$



## ➤ Adsorptionsgleichgewicht

- Mischisothermen

## ➤ Adsorptionskinetik

- Filmdiffusion

o Korngrößenverteilung, Kornform

=>

$d_w$

o Porenvolumen der Schüttung

$n_p$

o Filtergeschwindigkeit

$v_f$

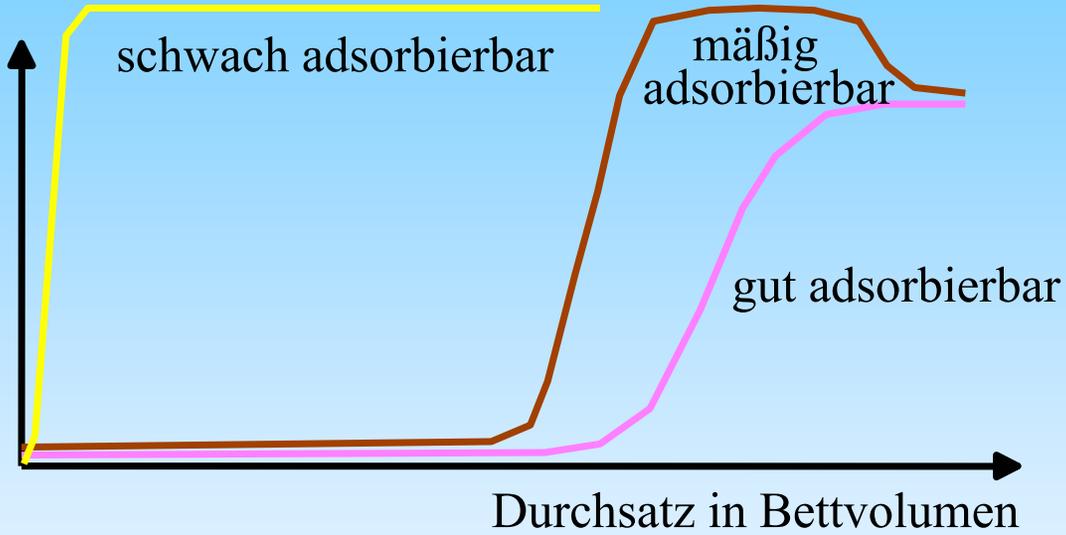
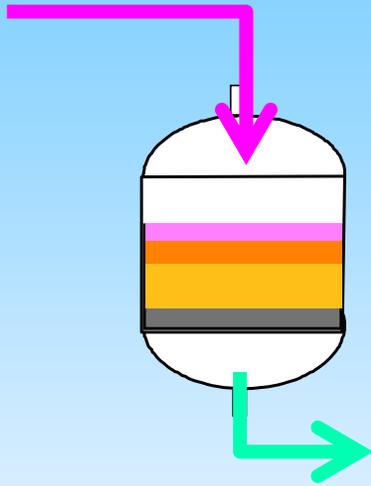
o Diffusionskoeffizienten in der Flüssigphase

- Korndiffusion

o Porenradienverteilung

o Diffusionskoeffizienten im Korn

## ➤ Bilanz- und Transportansatz



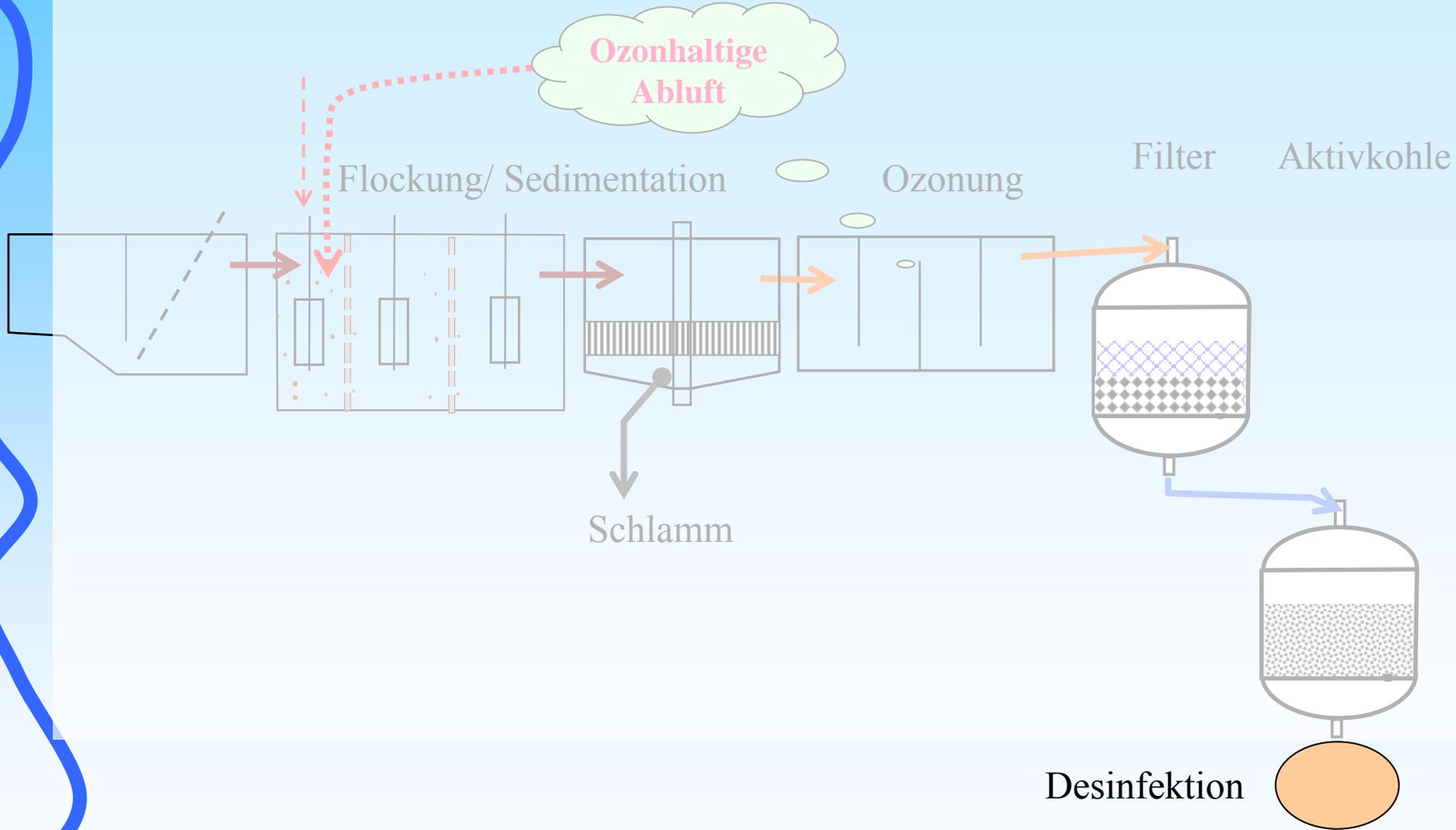
## Regenerierung beladener Kornkohle

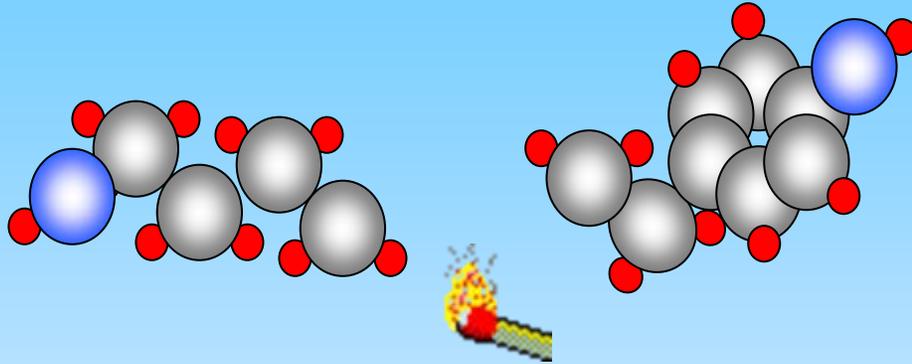
In vielen Fällen wird die Wirtschaftlichkeit eines Adsorptionsverfahrens davon bestimmt, inwieweit es gelingt, die Adsorptionskapazität nach der Beladung durch ein geeignetes Desorptions- oder Reaktivierungsverfahren weitestgehend wiederherzustellen.

Die Reaktivierung erschöpfter Aktivkohle erfolgt durch thermische Behandlung. Unabhängig von den dabei eingesetzten Ofenanlagen, z.B. Drehrohr-, Mehretagen- oder Wirbelschichtöfen, werden bei der Reaktivierung folgende Prozessphasen durchfahren:

- Trocknung
- Desorption der flüchtigen Verbindungen sowie Pyrolyse der nichtflüchtigen adsorbierten Verbindungen
- Wasserdampfvergasung von Pyrolysekoks.

Die eigentliche Reaktivierung wird bei etwa 750... 850°C bei Sauerstoffabschluss durchgeführt.



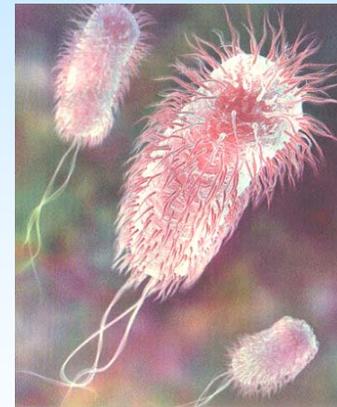


starke chemische Oxidationsmittel

Ozon, Chlor, ...

Oxidation zu  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

biologisch abbaubar,  
gut flockbar,  
adsorbierbar an Aktivkohle



desinfizierende Wirkung

## Chlorung

- einfachstes und gebräuchlichstes Desinfektionsverfahren mit Depotwirkung
- Dosierung als Gas oder Hypochloritlösung
  - Desinfektionsnebenprodukte

$\text{Cl}_2$  – Gas

$\text{NaOCl}$  - Lösung

## Chlordioxid

- keine Desinfektionsnebenprodukte
  - bei hohem Zehrungspotential nicht einsetzbar

$\text{ClO}_2$  – Gas

## Ozonung

- stärkstes Oxidationsmittel in der Wassertechnik
  - keine Depotwirkung
  - aufwendig in Anlagentechnik und Energiebedarf



Reaktion	Gleichung	$U_H^0$ [V]
Ozon	$O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	<b>2,07</b>
Wasserstoffperoxid	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	1,78
Kaliumpermanganat (neutral)	$KMnO_4 + 4H^+ + 3e^- \rightleftharpoons MnO_2 + 2H_2O$	1,68
Kaliumpermanganat (sauer)	$KMnO_4 + 8H^+ + 5e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1,51
<b>Chlor</b>	$Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Cl^-$	<b>1,36</b>
Unterbromige Säure	$HOBr + H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O + Br^-$	1,33
Sauerstoff	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	1,23
Chlordioxid (Gas)	$ClO_2 + e^- \rightleftharpoons ClO_2^-$	1,15
<b>Brom</b>	$Br_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Br^-$	1,07
Chlordioxid	$ClO_2(aq) + 2H_2O + 5e^- \rightleftharpoons Cl^- + 4OH^-$	0,95
Hypochlorid	$ClO^- + H_2O + 2e^- \rightleftharpoons Cl^- + 2OH^-$	
Hypobromid	$BrO^- + H_2O + 2e^- \rightleftharpoons Br^- + 2OH^-$	0,76
Eisen (III) / Eisen (II)	$Fe^{3+} + e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0,77
Wasserstoffelektrode	$H^+ + e^- \rightleftharpoons 0,5 H_2$	0,00

Bildung von Desinfektionsnebenprodukten, sog. **Haloforme**



## Mikrobiologische Parameter

Lfd. Nr.	PARAMETER	GRENZWERT (Anzahl/100 ml)
1	<b>Escherichia coli (E. coli)</b>	<b>0</b>
2	<b>Enterokokken</b>	<b>0</b>
3	<b>Coliforme Bakterien</b>	<b>0</b>

Leitkeimsystem

pathogene Protozoen, die durch die konventionelle Wasseraufbereitung **nicht vollständig eliminiert** werden

Resistenzen gegen Desinfektion

**Legionellen** (Legionärskrankheit), in **Warmwassersystemen** (<60°C)

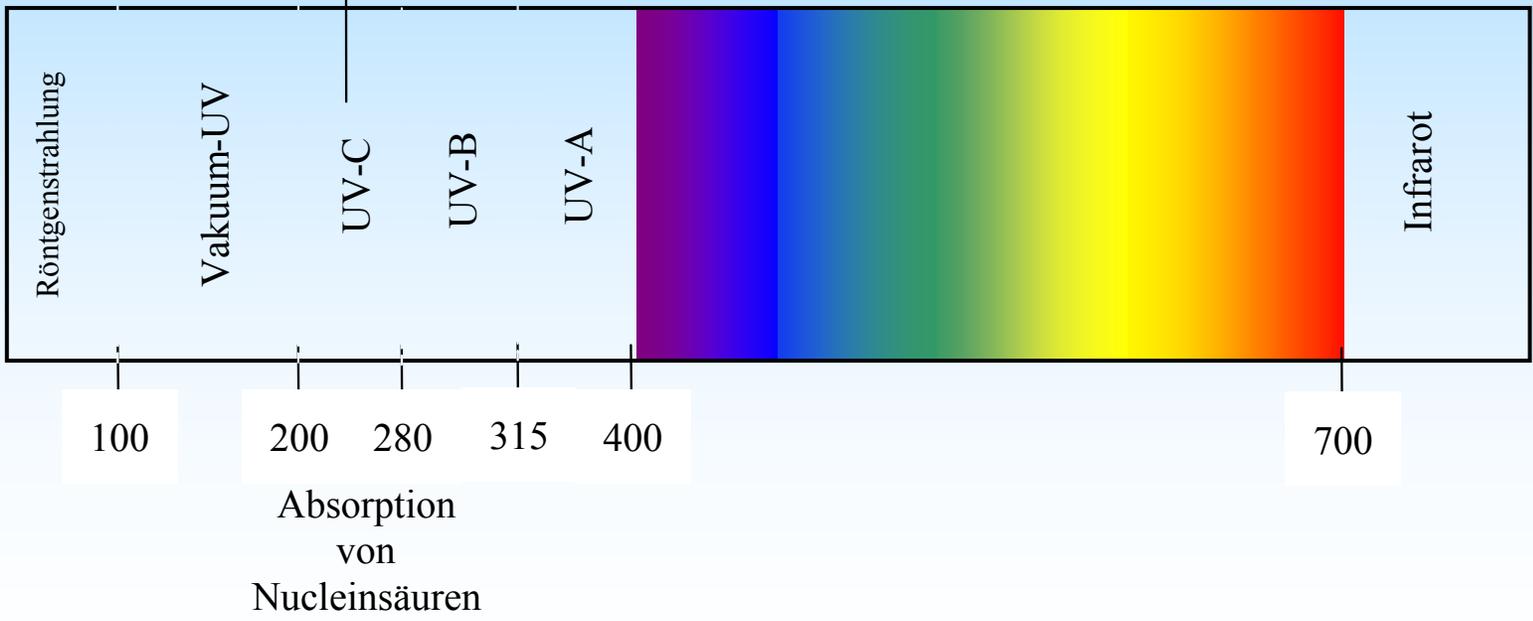
**Mehrfachresistenzen** pathogener Mikroben gegen Antibiotika

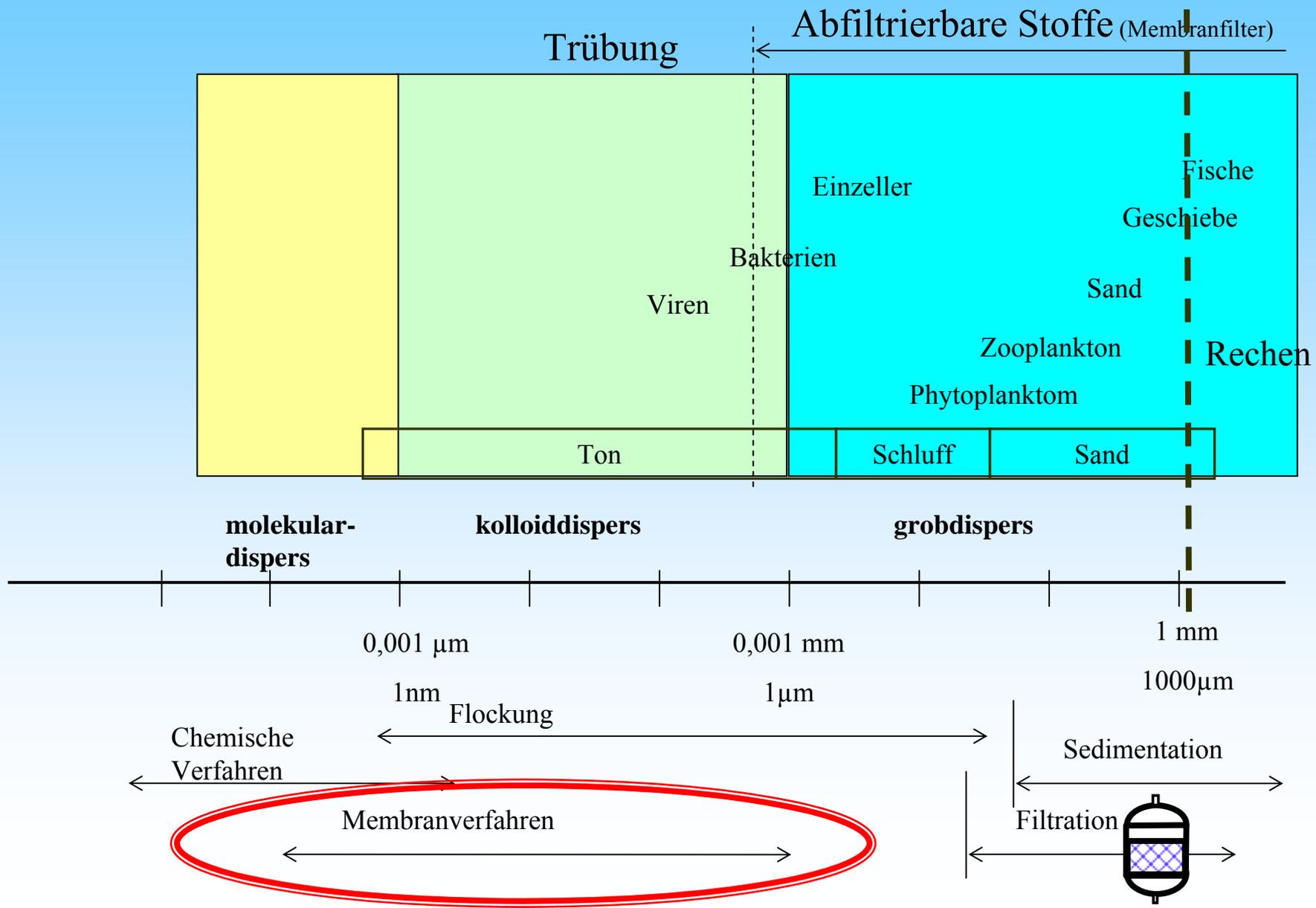
## Quecksilberniederdrucklampe in Schutzrohr (Quarz)

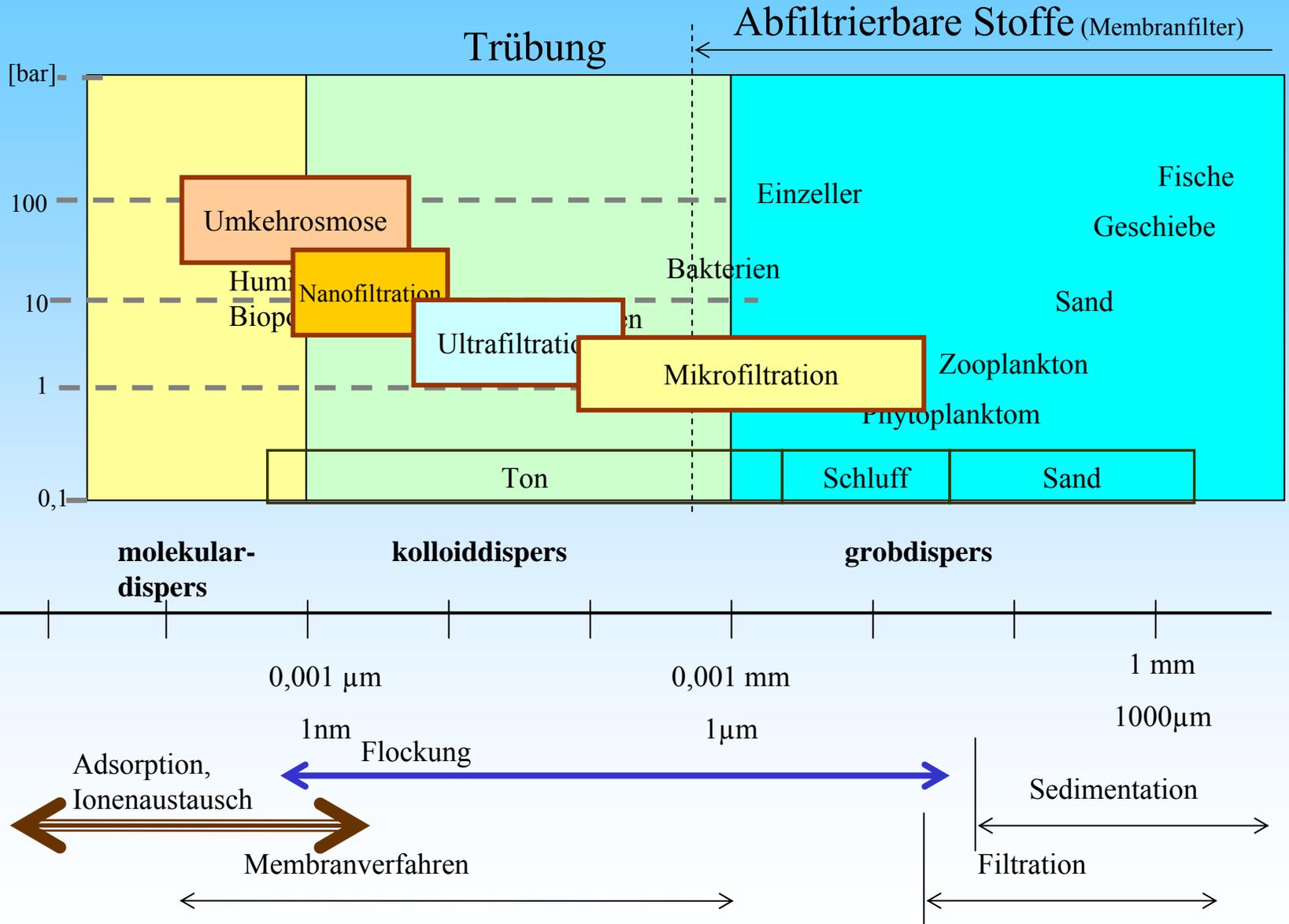


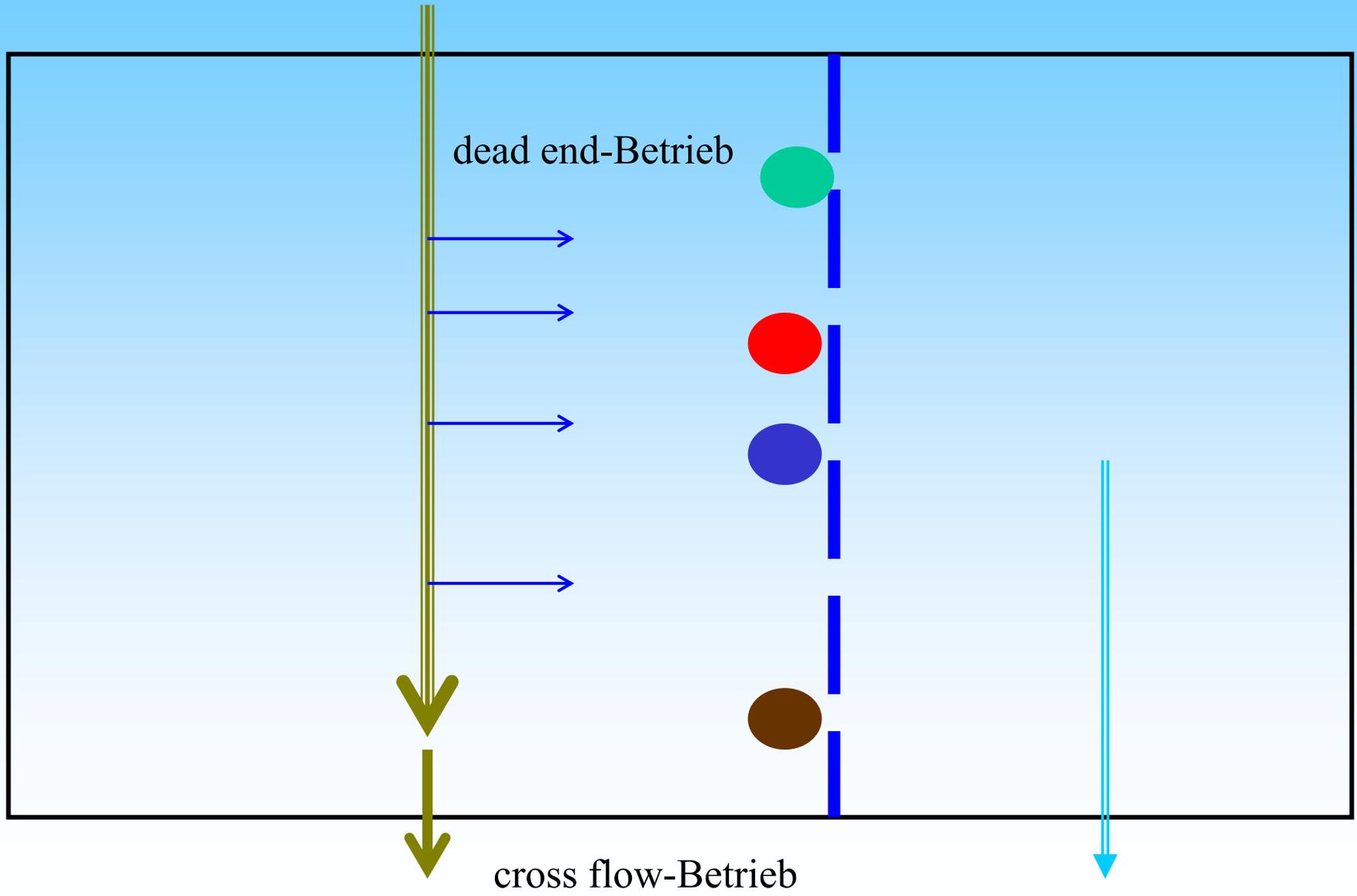
- Beeinträchtigung durch:
  - o Sedimentpartikel
  - o Belagbildner
  - o Farbgebende Stoffe

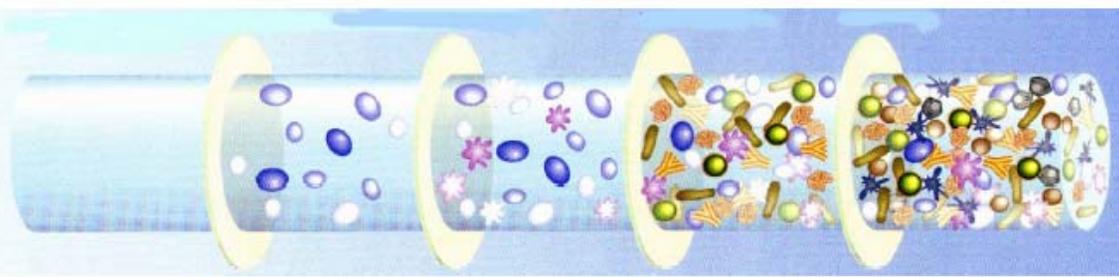
254nm Hg-Linie des Niederdruckstrahlers











RO

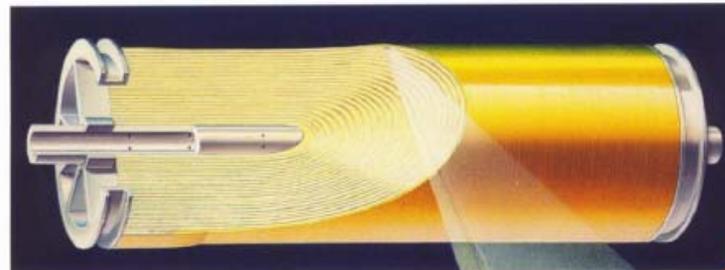
NF

UF

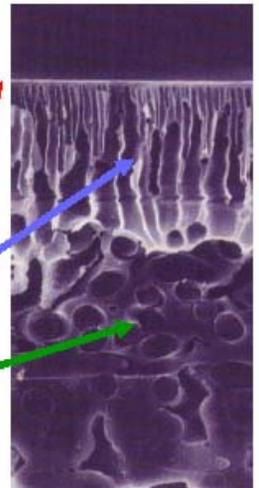
MF

-  Suspensierte Teilchen
-  Bakterien
-  Öl-Emulsionen
-  Makro-Moleküle
-  Kolloide
-  Viren
-  Proteine
-  Nieder-Molekulare Moleküle
-  Ionen

Prozess	Druck
MF	bis 3 bar
UF	3 - 6 bar
NF	10 - 60 bar
RO	20 - 140 bar



Ultra-dünne Membrane  
 Polysulfon-Schicht  
 Trägerschicht



REM - Foto

Auf Wiedersehen im Masterstudiengang

Aqua vita est !

Lehrstuhl Wassertechnik & Siedlungswasserbau

an der

BTU Cottbus



# Grundlagen der Hydrochemie

<http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/de/wassertechnik-und-siedlungswasserbau/lehre/skripte/vorlesungen.html>

