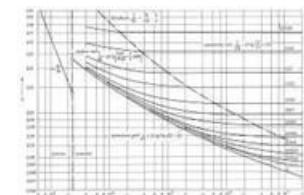
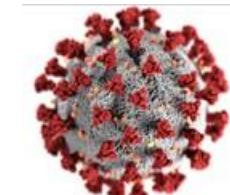
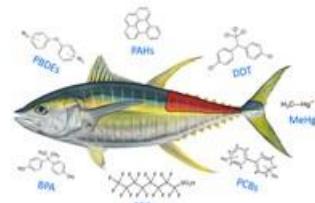
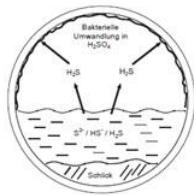
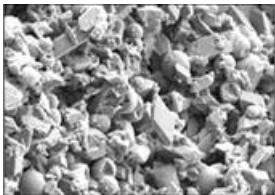


# Bachelor Infrastruktur

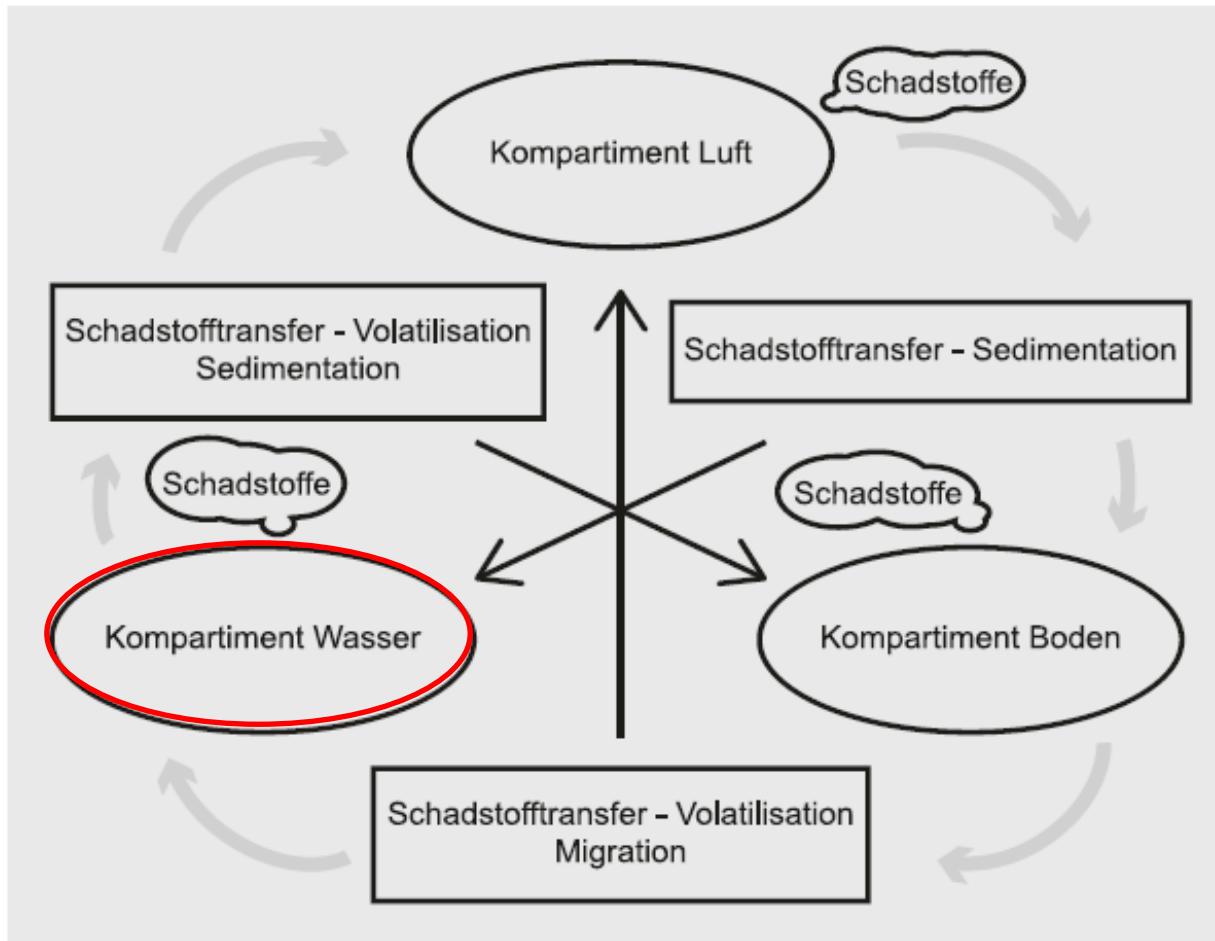
## Vorlesung und Übung: Naturwissenschaftliche Grundlagen 2.5 Umweltchemie, Umweltbiologie, Abwasser

Prof. Dr. Welker, Frankfurt University of Applied Sciences



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

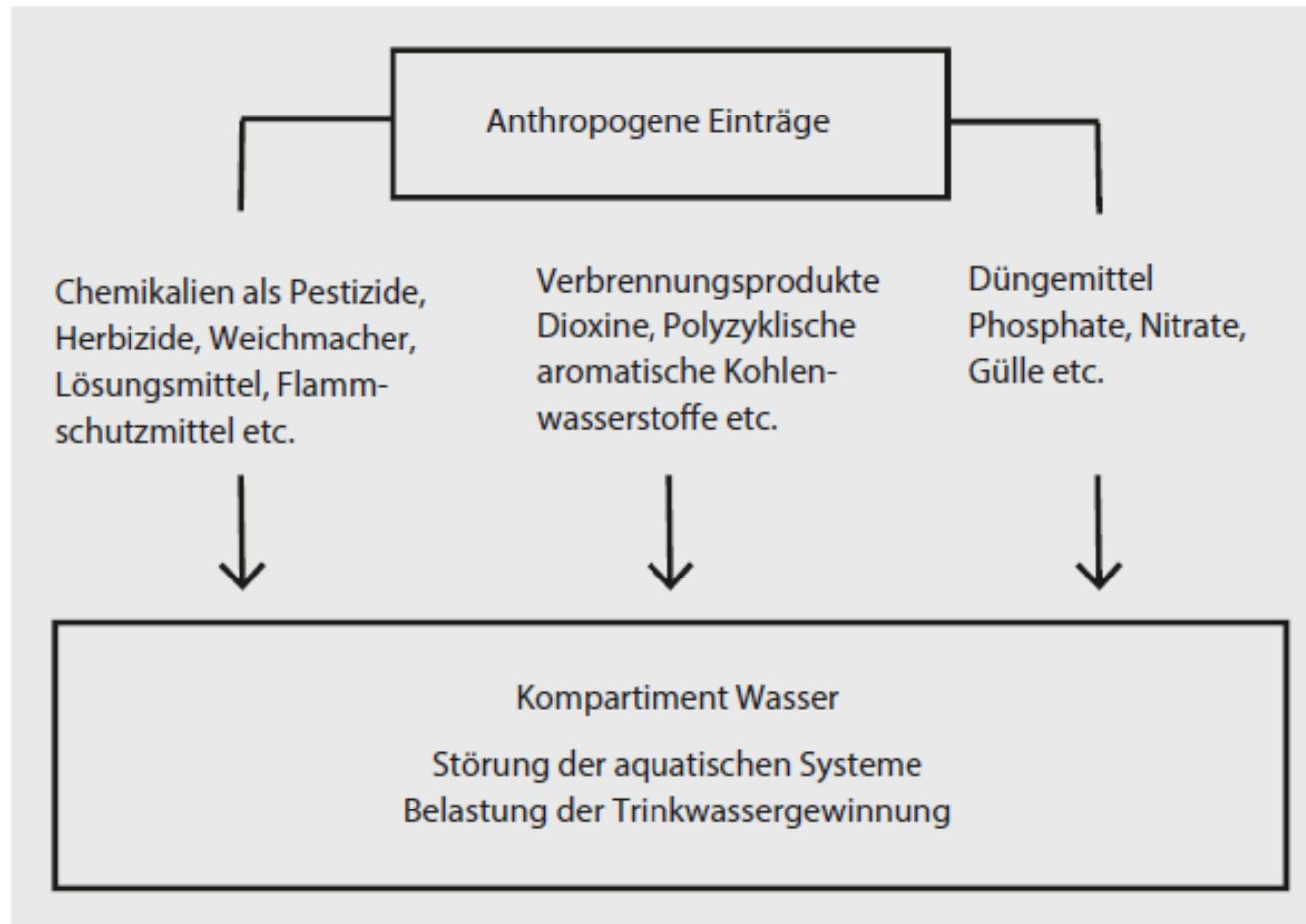
## Umweltchemie, Transferprozesse



■ Abb. 1.8 Transferprozesse für Schadstoffe zwischen den Umweltkompartimenten Boden, Wasser und Luft

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie, anthropogene Stoffeinträge

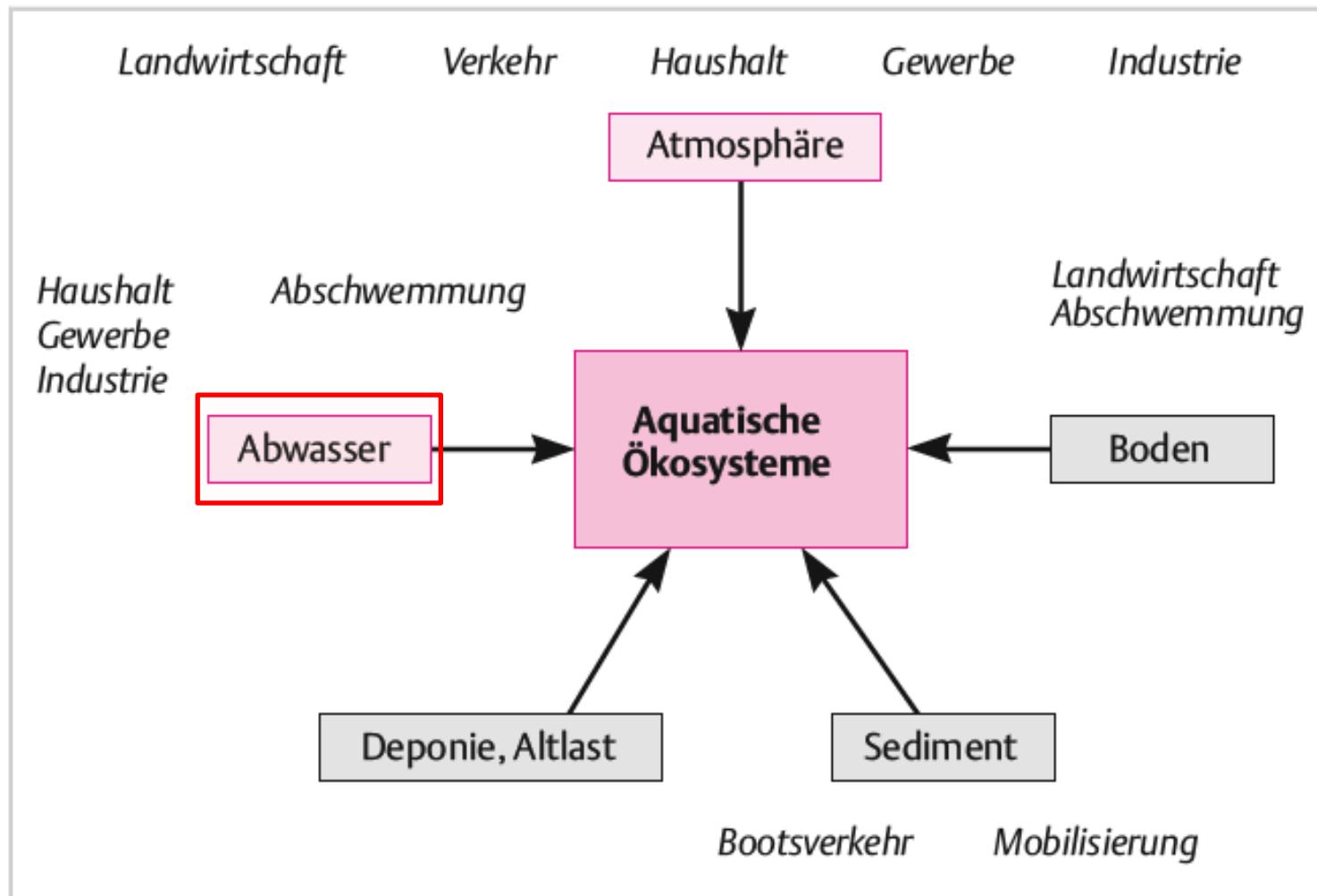


**Abwasser-Systeme**  
**Trinkwasser-Systeme**

■ Abb. 1.12 Wassergefährdende Stoffe – eine Auswahl

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie





# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### **Abwasser: Schwerpunkt häusliches Abwasser**

besteht aus **häusliches Schmutzwasser** und **Niederschlagswasser**

- **Aufkommen Stoffe**
- **Zielkompartimente** und **Zielorganismen**
- **Vorgaben** (Verordnungen und Regeln der Technik (a.a.R.T.))
- **Maßnahmen zur Reinigung** (Prozesse, Techniken...)

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

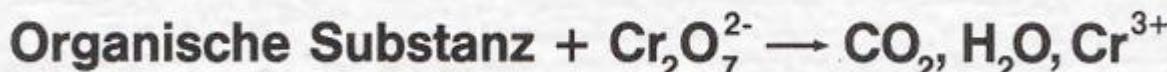
### CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf)

- organische Kohlenstoffverbindungen (Zehrstoffe: Sauerstoff)  
→ **Übermaß** im Gewässer führt zu **Sauerstoffmangel**
- Sauerstoffmenge [mg O<sub>2</sub>/l] zur chemische Oxidation von **allen organischen Verbindungen**
- Labormethode mit starken Oxidationsmitteln (Kaliumdichromat)
- Verbrauch Kaliumdichromat wird quantitativ erfasst

Kaliumdichromat (gelb) oxidiert Alkohol und wird dabei selbst reduziert zum Chromat (grün)

### Redoxreaktion:

Organische Verbindungen werden durch Kaliumdichromat oxidiert zu CO<sub>2</sub> und Wasser, Cr (VII) wird dabei verbraucht und reduziert zu Cr (III)



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

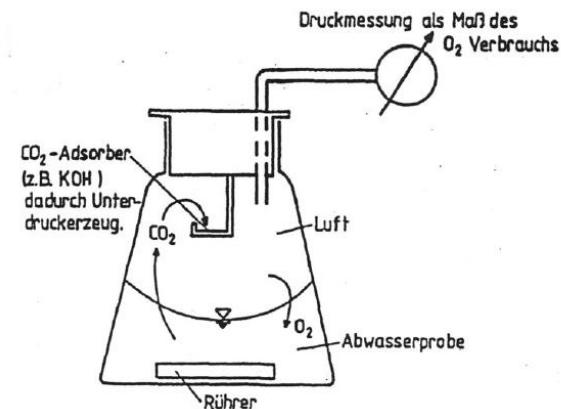
## Umweltchemie - Abwasser

- **BSB<sub>5</sub> (Biologischer Sauerstoffbedarf)**

- Zucker
- Fette
- Proteine

→ **Übermaß** im Gewässer führt zu  
**Sauerstoffmangel**

- **Sauerstoffmenge** [mg O<sub>2</sub>/l] zur  
**biologischen Oxidation** von allen  
**organischen Verbindungen** in 5 Tagen
- aufwändige Labormethode



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Aufkommen Stoffe häusliches Abwasser:

- **Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor)**

- **Proteine und Harnstoff** sowie **Ammonium**
- Übermaß an **Ammonium**  $\text{NH}_4^+$  führt zu **fischtoxischem Ammoniak**  $\text{NH}_3$



- **ortho und poly-Phosphate**
- Übermaß führt zu **Eutrophierung** (übermäßig Algenwachstum)



[Spiegel online]

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

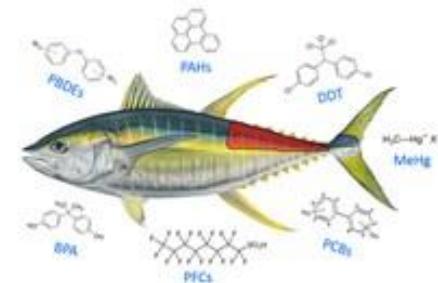
### ▪ Personal Care Products

- Tenside
- Duftstoffe (Moschus...)
- Mikroplastik
- Mückenschutzmittel (DEET)



### ▪ Arzneimittel

- Hormone (Ethinyestradiol...)
- Analgetika (Diclofenac, Ibuprofen...)
- Antiepileptika (Carbamazepin..)
- Antibiotika...

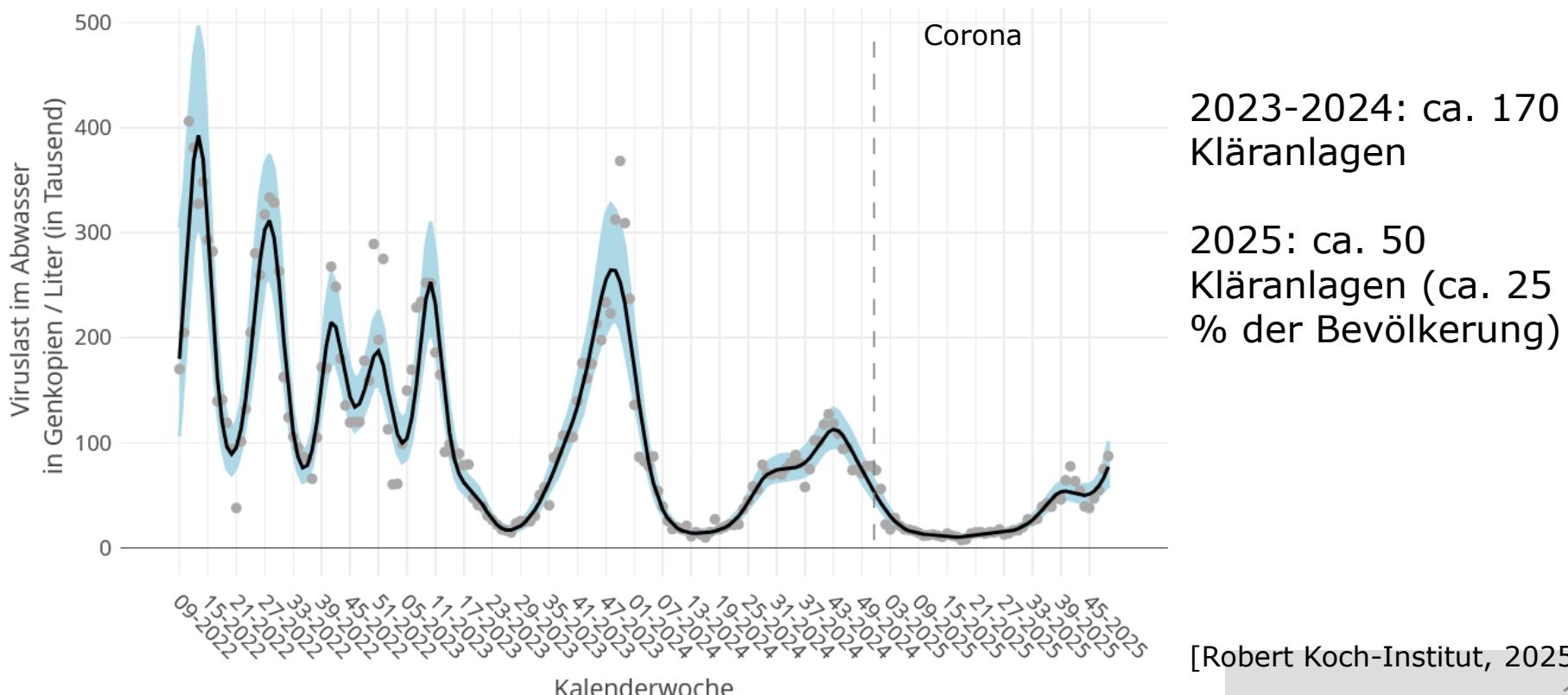


# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### ■ Keime

- Corona, Influenza, RSV, Polio...
- **Abwassermanagement** für die epidemiologische Lagebewertung (AMELAG)....)



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

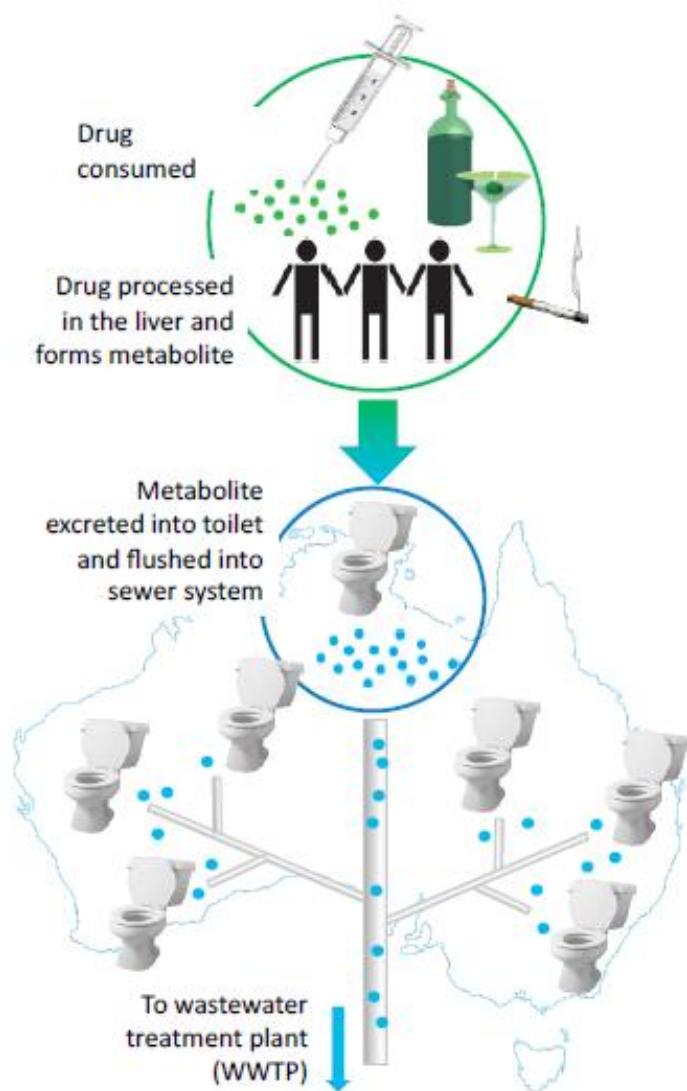
## Umweltchemie - Abwasser

- **andere**

- Alkohol
- Süßstoffe
- Nicotin
- Coffein....

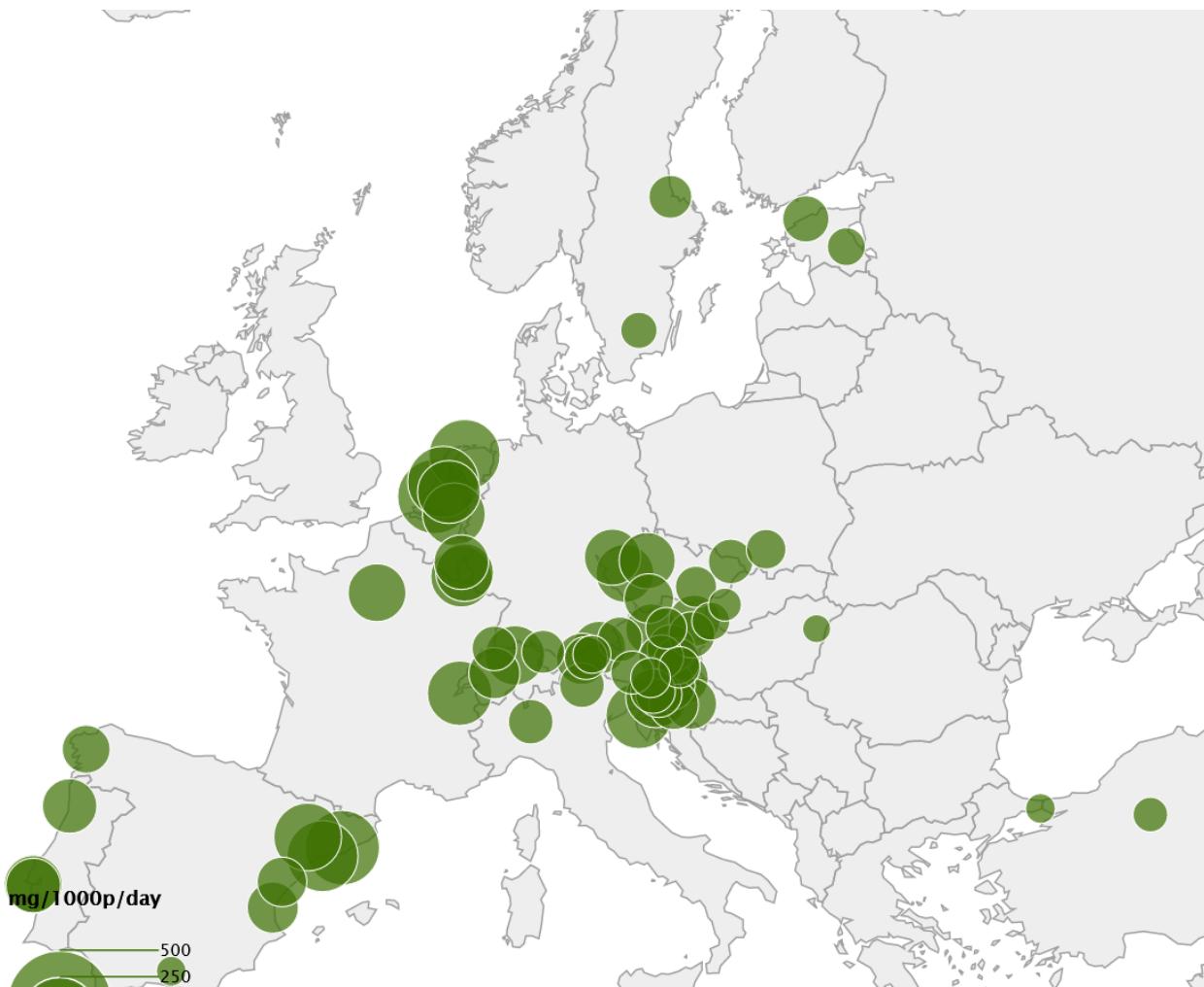
- **Drogen**

- THC-COOH
- MDMA
- METH
- Cocain...



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



Relative geographical distribution of **cannabis metabolite (THC-COOH)** as detected in European cities, **2023 (daily mean)**

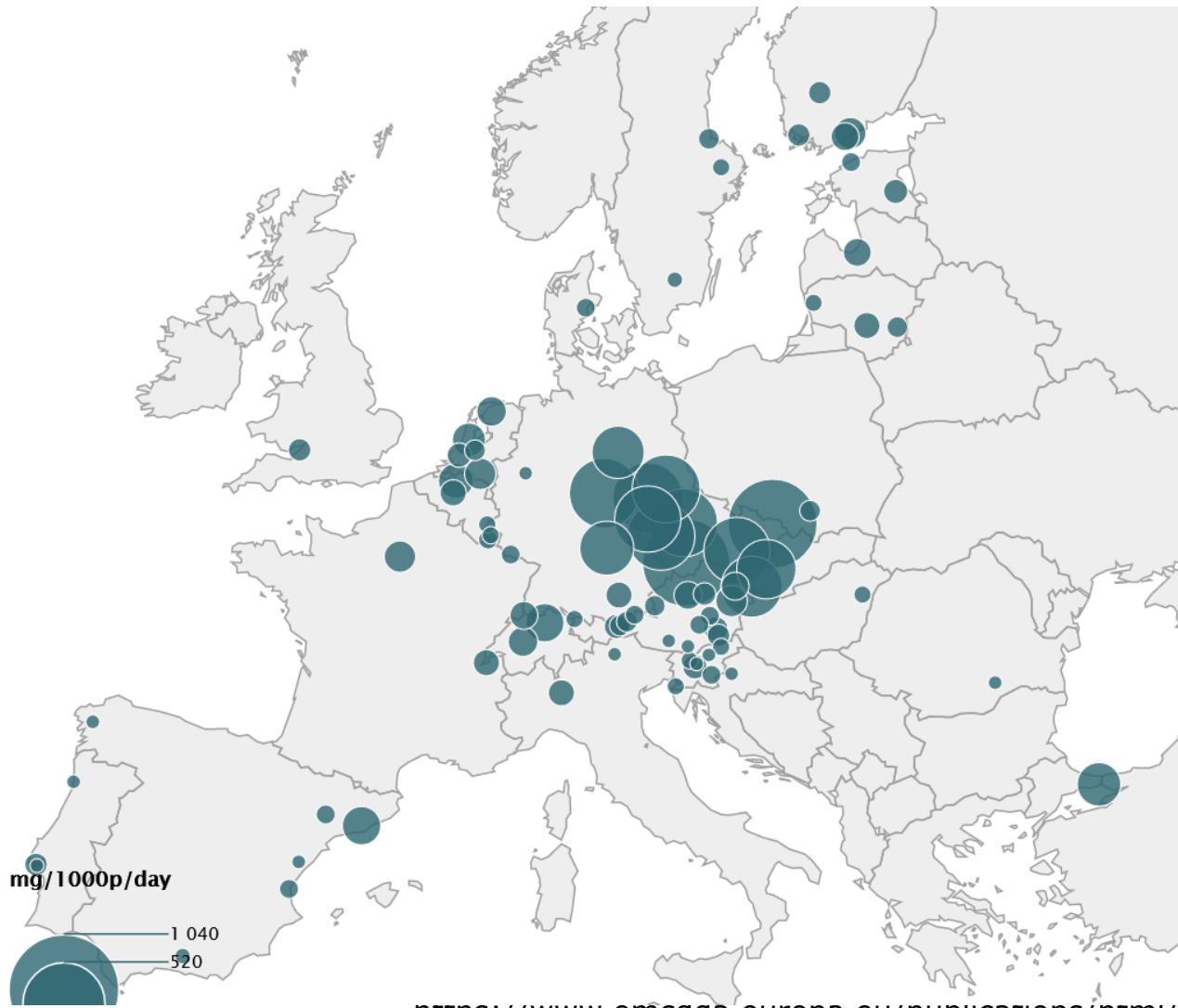
8 % der Erwachsenen konsumiert Cannabis

**Wochenendspitze**

[https://www.emcdda.europa.eu/publications/html/pods/waste-water-analysis\\_en](https://www.emcdda.europa.eu/publications/html/pods/waste-water-analysis_en)

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



relative geographical distribution of **methylamphetamine** metabolite as detected in European cities, **2023 (daily mean)**

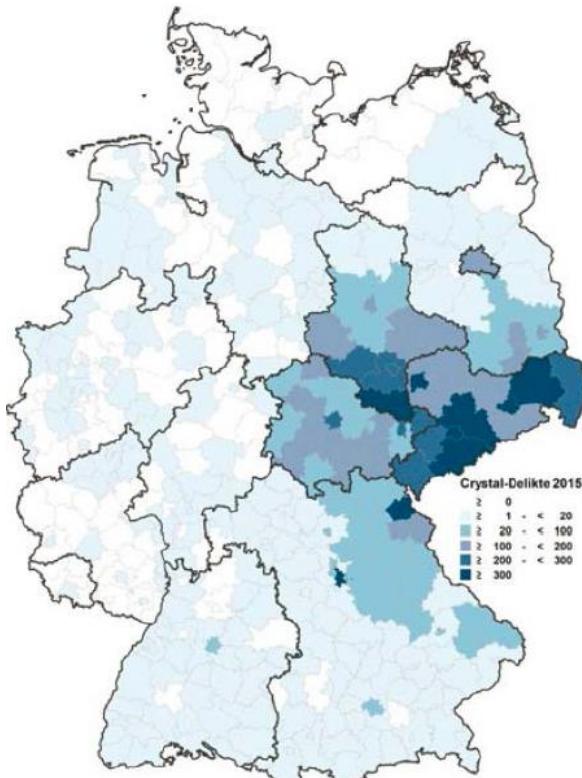
Schwerpunkte in Tschechien, Slowakei, Ostdeutschland

**keine Wochenendsspitze!**

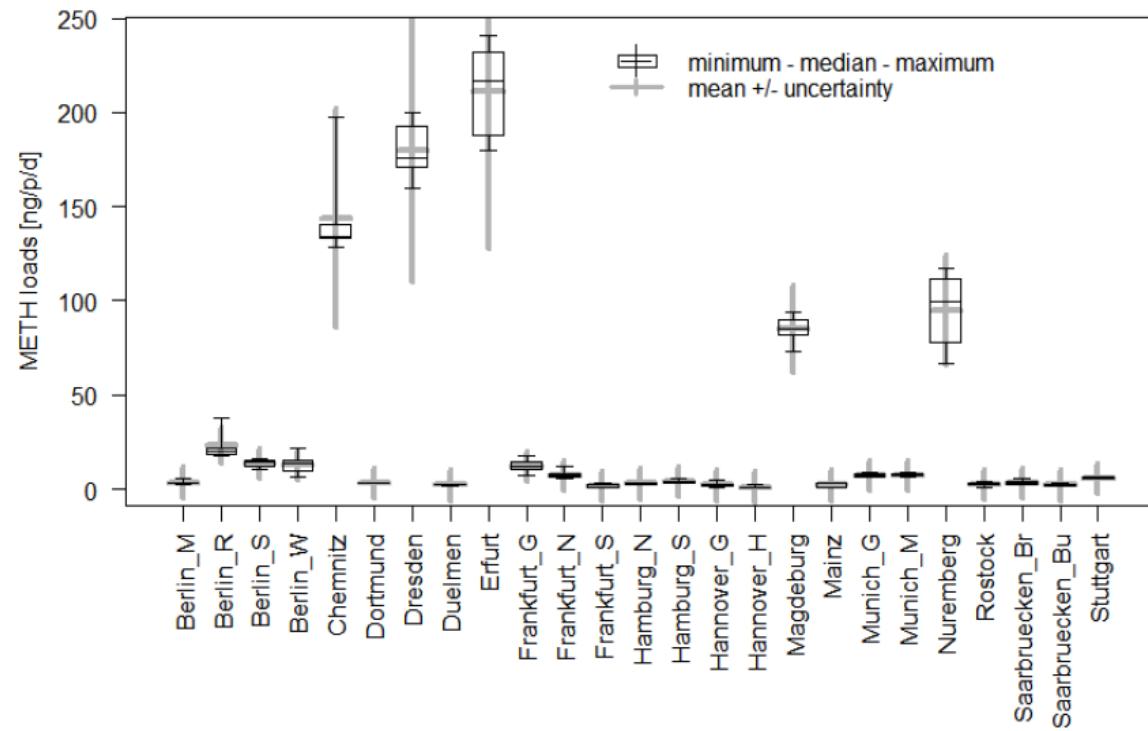
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Chrystal Meth in süd-/östlichen Bundesländern



Bundeslagebericht Rauschgift 2015



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser:

- **Dachabfluss** (Ziegel, Metall (Cu, Zn), Bitumen (Mecoprop), Gründach (PFAS)....)
- **Verkehrsflächenabfluss** (Straßen, Parkplätze....)
- Abflüsse von **Sonderflächen** (Bahn, Flughäfen, Industrie....)
- **Organische Verbindungen**
  - CSB, BSB aus Vegetation
- **Nährstoffe**
  - N und P aus Vegetation, Dünger und tierische Exkrementen

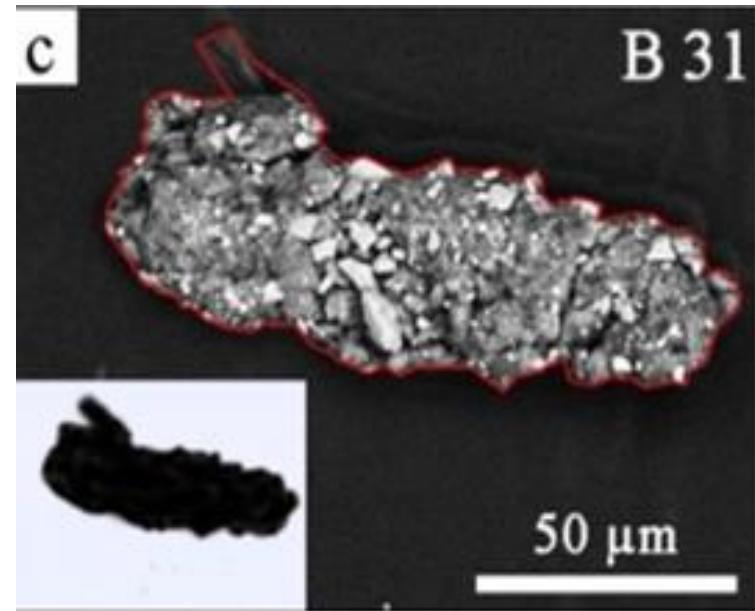


[Burckhardt, 2008]



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



[Sommer et al., 2008]

hohe **Feststofffrachten** im Februar/März nach **Wintersalzung**

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



**MKW-Belastung**  
**(Mineralölkohlenwasserstoffe):**  
Parkplatz und Niederschlagswasser



[Lambert, 2010; Dierkes, 2023]

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

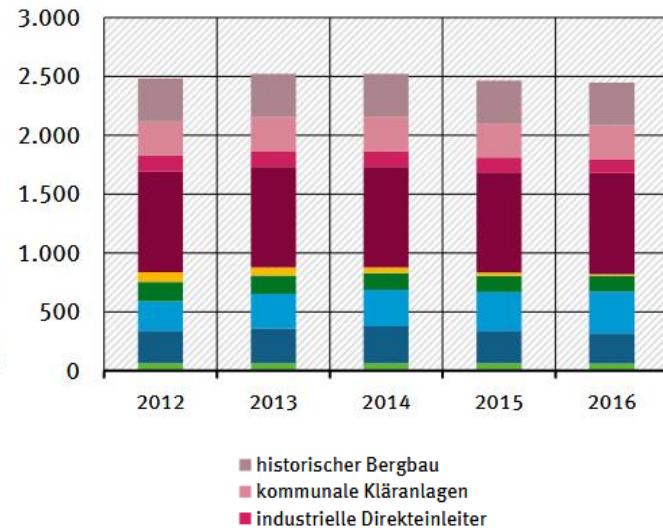
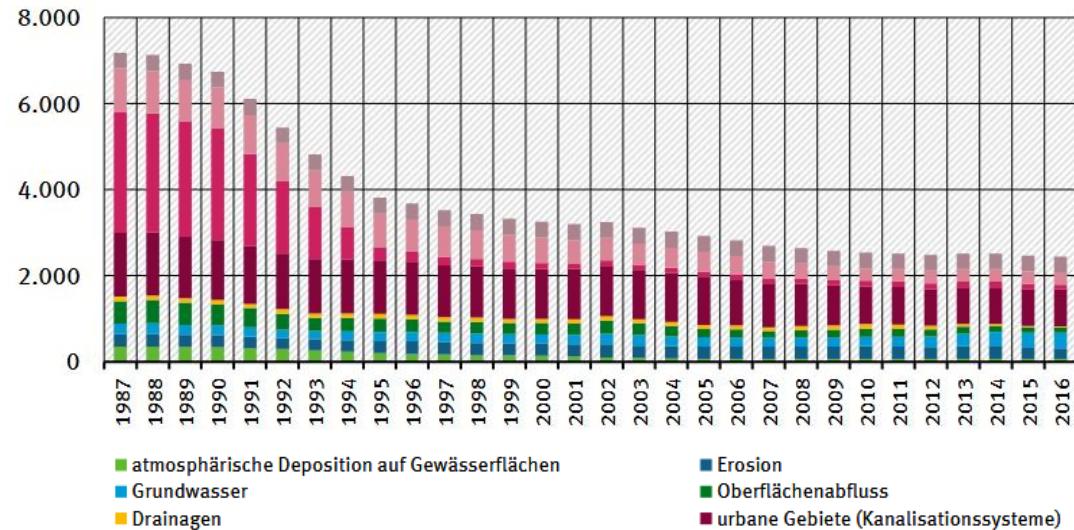


### Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser:

- **Schwermetalle** (Zink, Kupfer, Blei..)
- **Fahrzeuge:** Auswuchtgewichte, Bremsen, Kupplung, Reifen, Katalysator

#### Einträge der Schwermetalle Zink, Kupfer und Chrom aus Punktquellen und diffusen Quellen in die Oberflächengewässer in Deutschland

Zink-Einträge in Tonnen/Jahr



Daten als 5-jährige gleitende Mittel (bspw. 1987 entspricht Mittel der Jahre 1983-1987 und das Jahr 1988 dem Mittel der Jahre 1984-1988); Werte gerundet

Quelle: Umweltbundesamt 2020

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser :

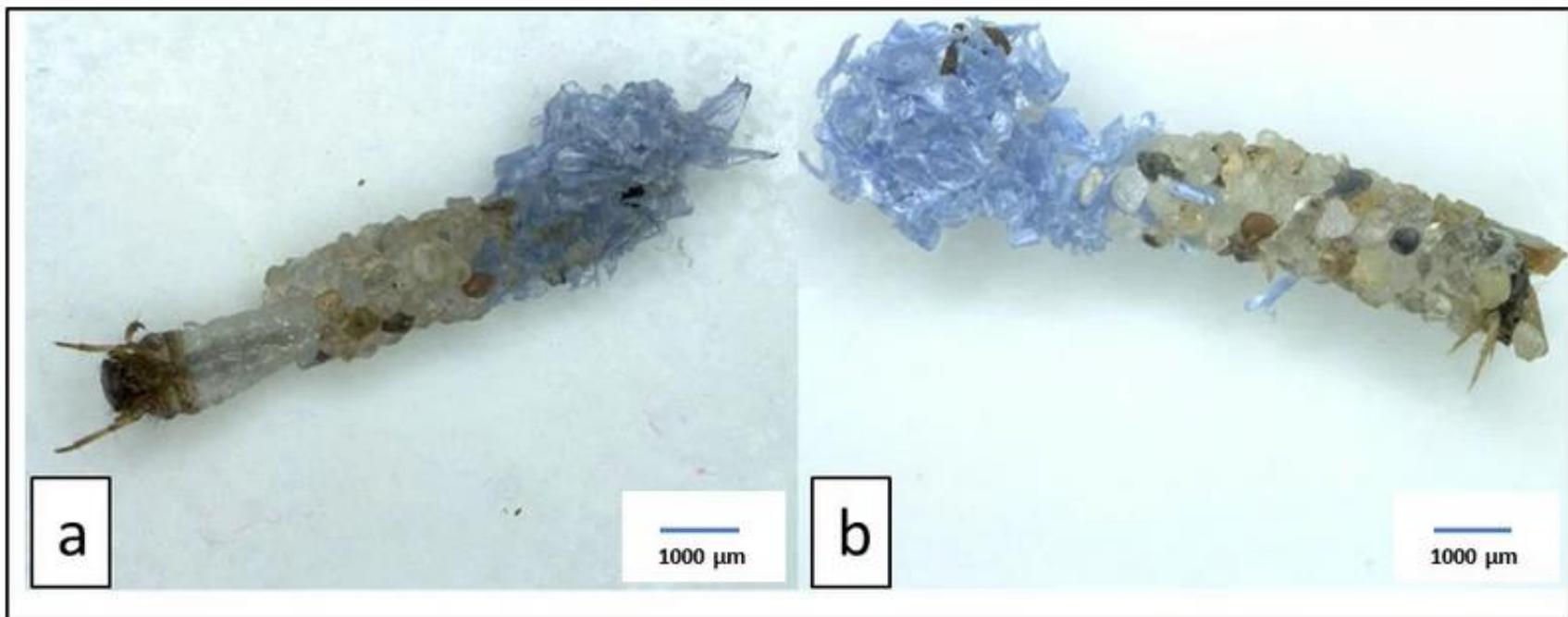
- **Mikroplastik** und Reifeninhaltstoffe (Chalon: Ursache für Lachssterben)



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser



Verwendung **Mikroplastik** von Gewässerlarven (caddis fly larva) als Alternative zu Sand (eingeschränkter Schutz und Bioakkumulation)

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

Beobachtung Westküste USA: **Akute Toxizität** an Lachsen nach Einleitung **Straßenabflüsse** („urban runoff mortality syndrom“)

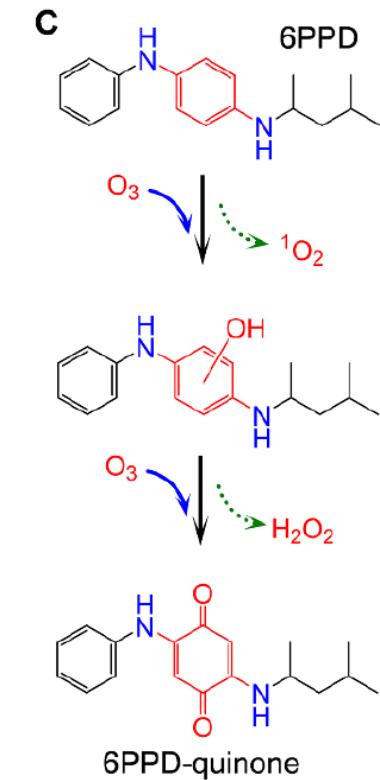


[Hürlimann et al., 2011]

Identifikation **Ursache**: Transformationsprodukt eines **Antioxidationsmittels** in Reifen (0,2-4 %): **6PPD-quinon**

**LC50 (letale concentration):** 0,8 +/- 0,16 µg/l versus < 0,3 - 19 µg/l Aufkommen in Straßenabflüssen

→ **Minimierung Emissionen Reifenabrieb wichtig!**



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser:

- **Pestizide/ Biozide**
  - Algizide Fassaden
  - Wurzelschutz  
Dachbahnen
- **Nikotin**
- **Streusalz**



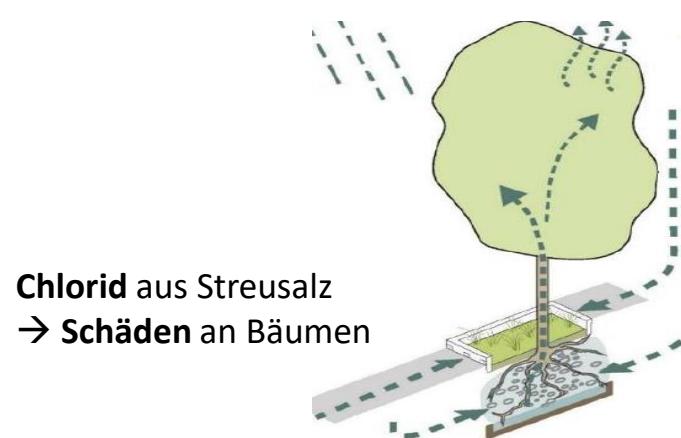
[Wicke et al. 2021]



Algenbewuchs durch Spritzwasser (© OST)



[Burkhardt, 2024]



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Zielkompartiment

#### Schmutzwasser/Niederschlagswasser

- Oberflächengewässer (Abwassereinleitungen)
- Boden/Grundwasser (Versickerung Regenabflüsse)



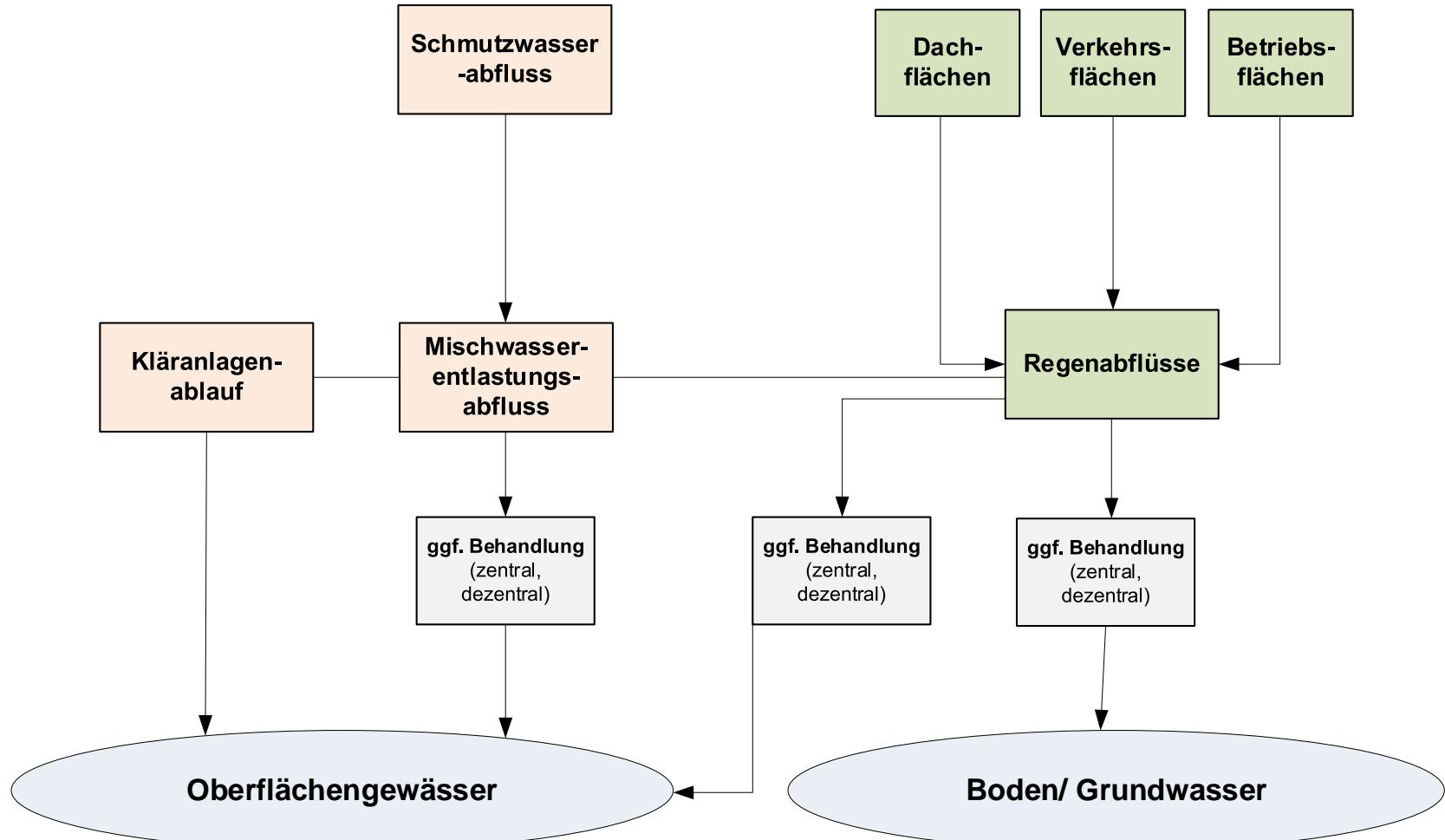
### Zielorganismen:

- **Mensch** (nur mittelbar, regional und bei besonderen Nutzungen (Badenutzung))
- **Lebensgemeinschaften in Naturräumen**
  - **Oberflächengewässer**: aquatische Organismen wie Fische, Makrophyten, Makrozoobenthos
  - **urbane Räume** (Pflanzen: Bäume versus Streusalze)



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



### Vorgaben Abwasser und Niederschlagswasser

#### ▪ **Kommunales Abwasser:**

[Dierkes, 2023]

- emissionsbezogen **Abwasser-VO** mit Mindestanforderungen für **CSB, BSB, N (NH4) und P** je nach Größenklasse
- immissionsbezogen ggf. weitergehende Anforderungen
- **2024:** neue Kommunal-Abwasser-Richtlinie der EU → neue Reinigungsstufe für **Arzneimittel und weitere Stoffe wird kommen!**)

#### ▪ **Niederschlagswasser**

- **keine** bundesweiten Vorgaben (Anhang Abwasser-VO in Planung)
- Anwendung **technisches Regelwerk** (Arbeitsblätter der DWA-A102 und DIN) -> im wesentlichen Entfernung von **feinen Feststoffen (AFS63)**



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Wasserchemie (Schwerpunkt Reinigung Schmutzwasser, Niederschlagswasser)

- **Feststoffrückhalt**

- Sedimentation
- Filtration



[Dierkes, 2023]

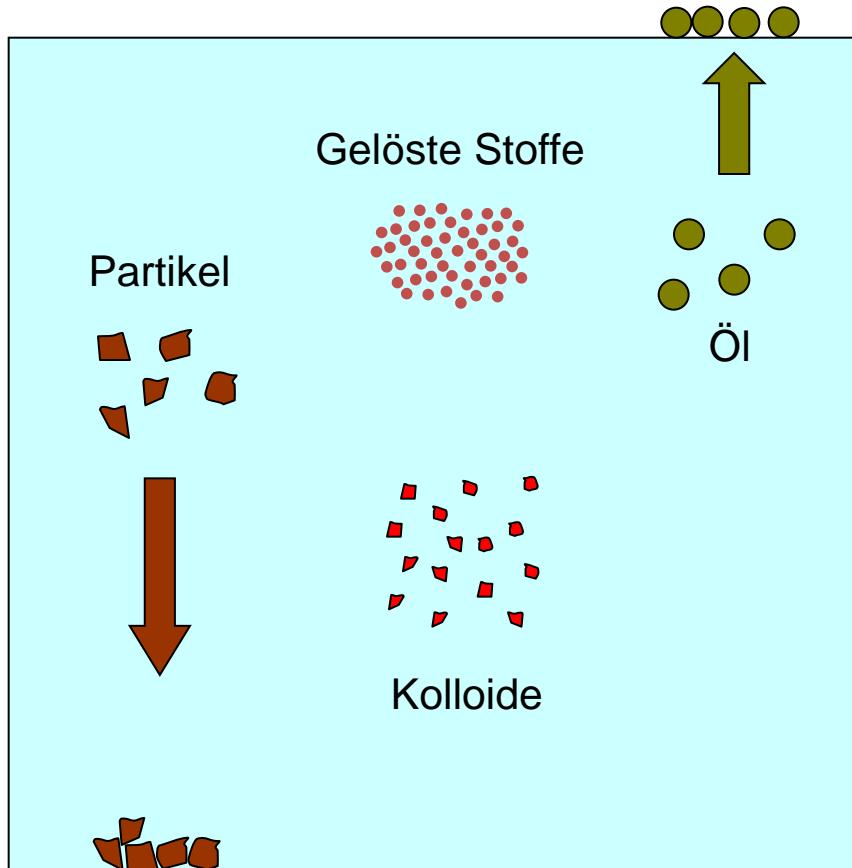
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Chemie, Inhaltstoffe Wasser

**Schwimm-  
stoffe**

**Schweb-  
stoffe**

**Sink-  
stoffe**



**Partikel, Öl**  
(Suspension, Emulsion):  
→ MKW,  
Schwermetalle, PAK

**Kolloidale Lösung:**  
1 – 100 nm, leichte  
Trübung, kein Absetzen  
→ Trübung

**Echte Lösung:**  
< 1 nm, klar  
→ PSM, Chlorid

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Regenwasserbehandlung

- **Feststoffrückhalt**
    - **Sedimentation**
      - **Dichtetrennung** (Schwimmen und Sinken)
- **Absetzbecken mit Tauchwand**

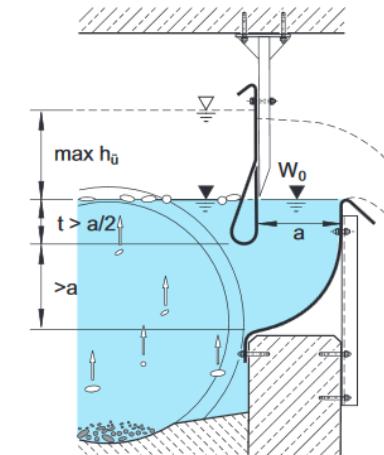
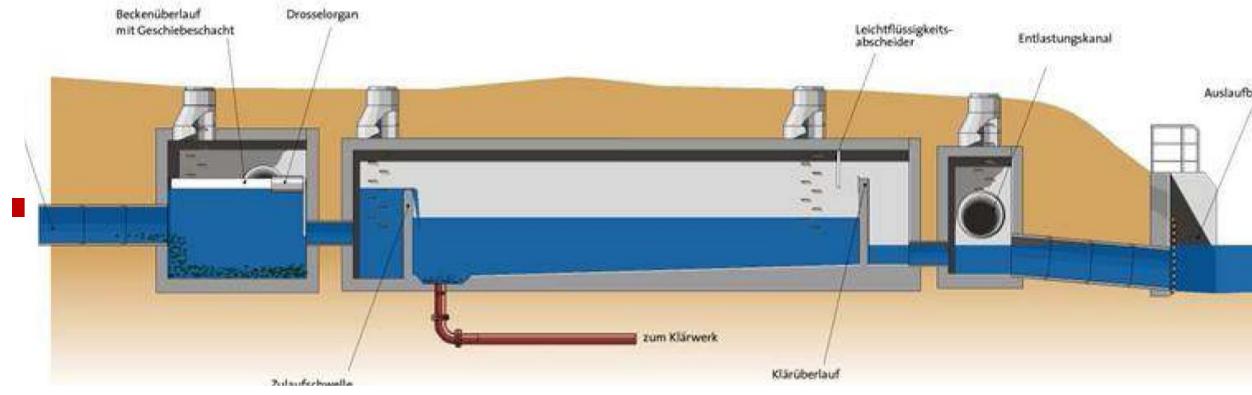


Bild 1: Anordnung auf der Schwelle

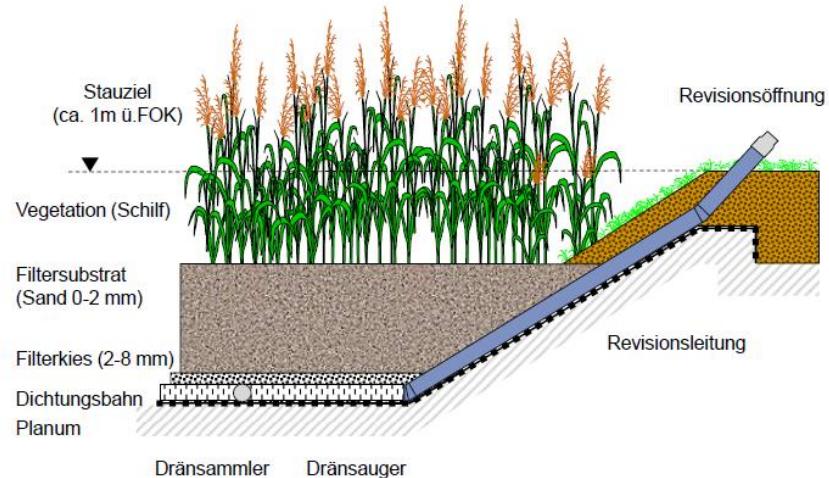
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Regenwasserbehandlung

### Feststoffrückhalt

- **Filtration** (auch Schadstoffe Reifenabrieb und Hormone)
- Siebung, Filtration, Adsorption, Absorption...

→ **Flächen- und Raumfilter**



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Regenwasserbehandlung



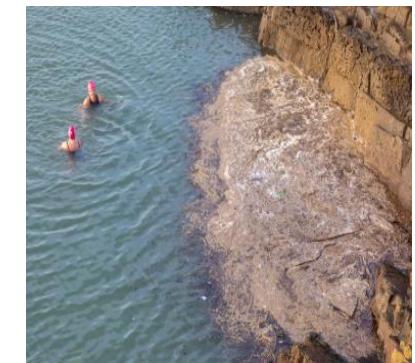


# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

- **Biochemischer Abbau Stoffe in Schmutzwasser durch Mikroorganismen**

- **Kohlenstoff-Abbau (CSB, BSB...)**
- Biologische Elimination von **Stickstoffverbindungen (Ammonium  $\text{NH}_4^+$ , Nitrat  $\text{NO}_3^-$ ...)**
- Biologische **Phosphorelimination (org. P, o-P...)**



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

Ziel: Reduktion von sauerstoffzehrenden  
**Kohlenstoffparametern** (BSB, CSB)

Grund:  
**Sauerstoffmangel** im Gewässer verringern



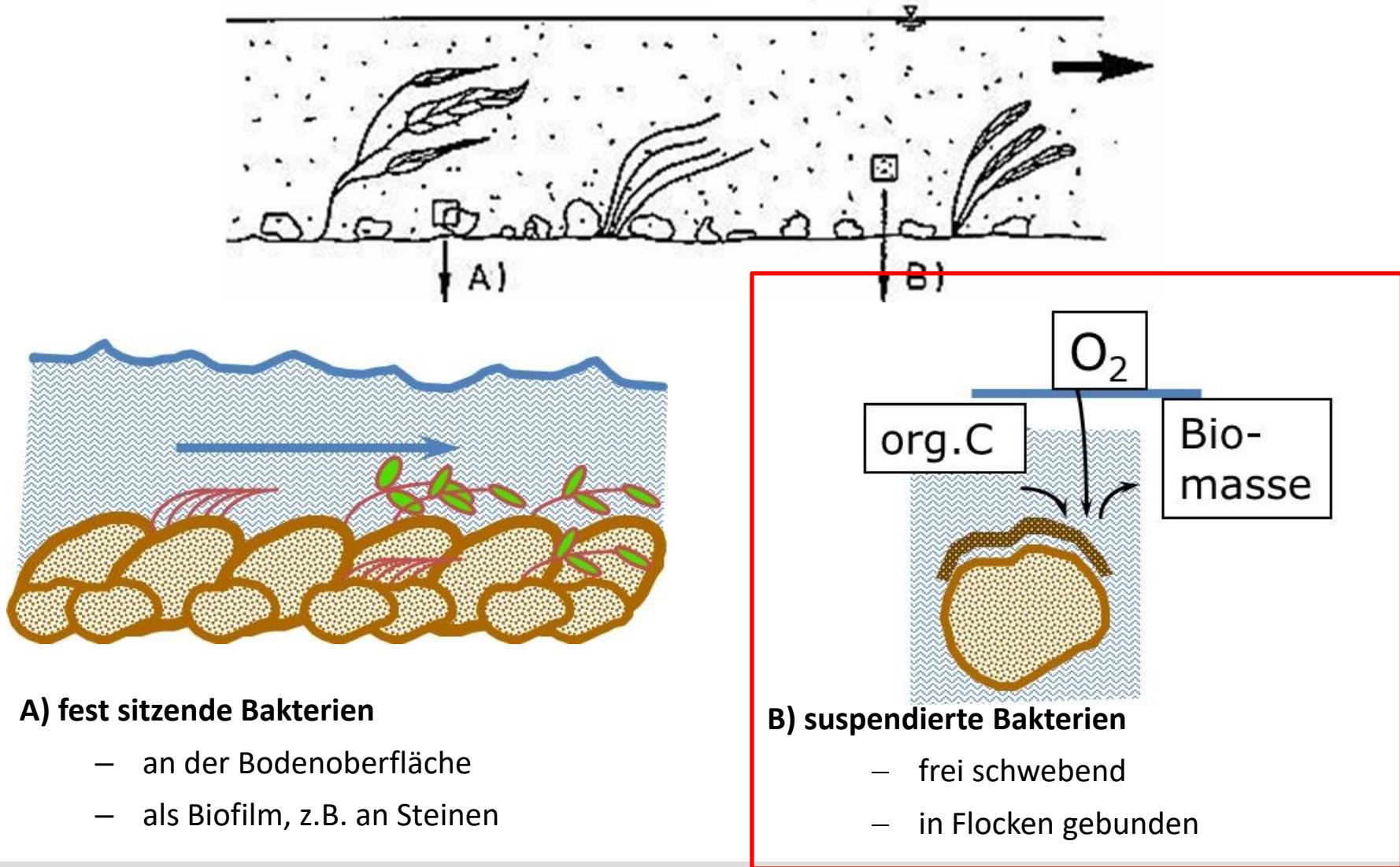
Ziel: Reduktion von **Nährstoffen** (Stickstoff, Phosphor)

Grund:  
**Potenzial akute Wirkung Ammonium/ Ammoniak**  
**Eutrophierung** (Phosphor) des Gewässers vermeiden



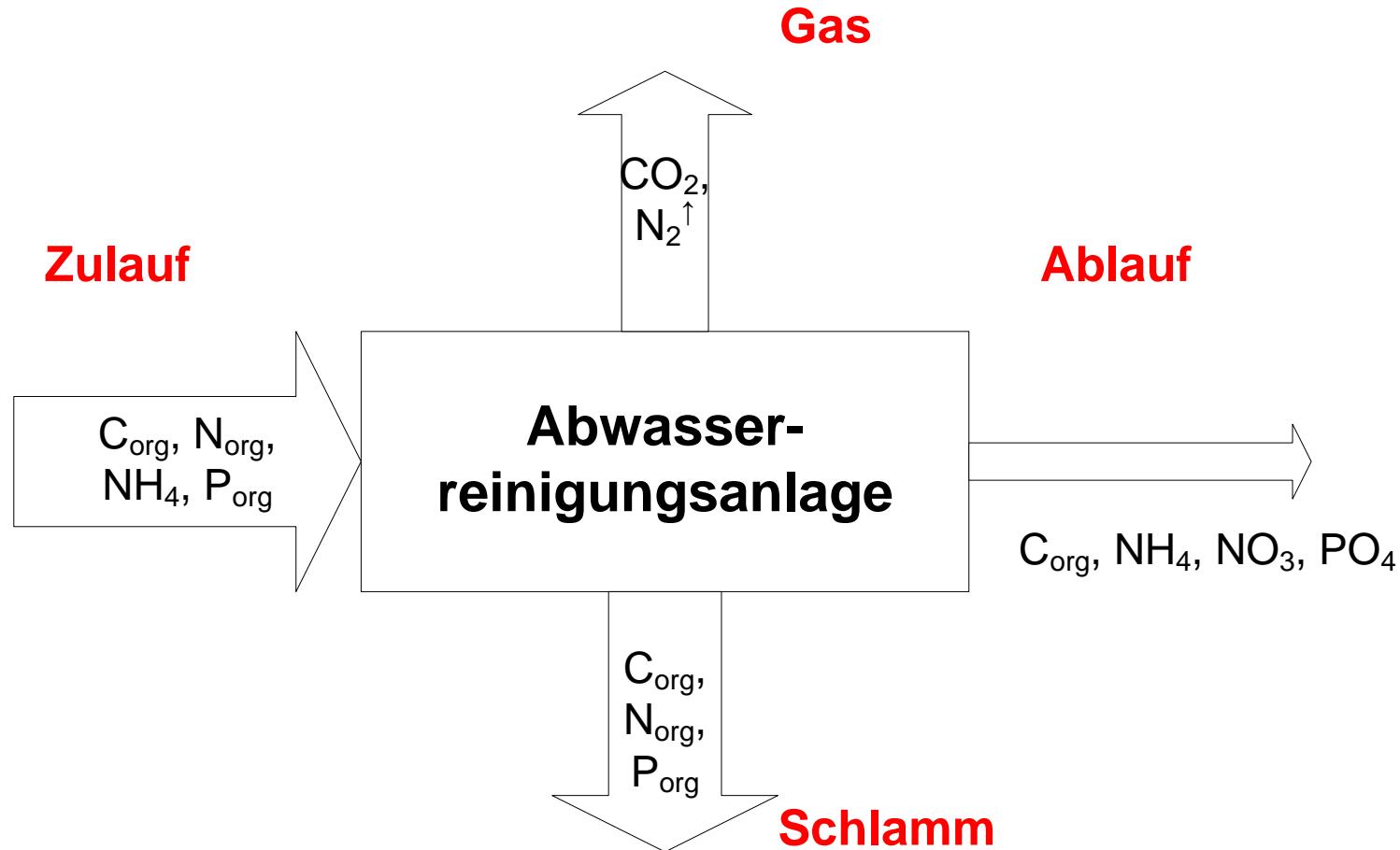
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

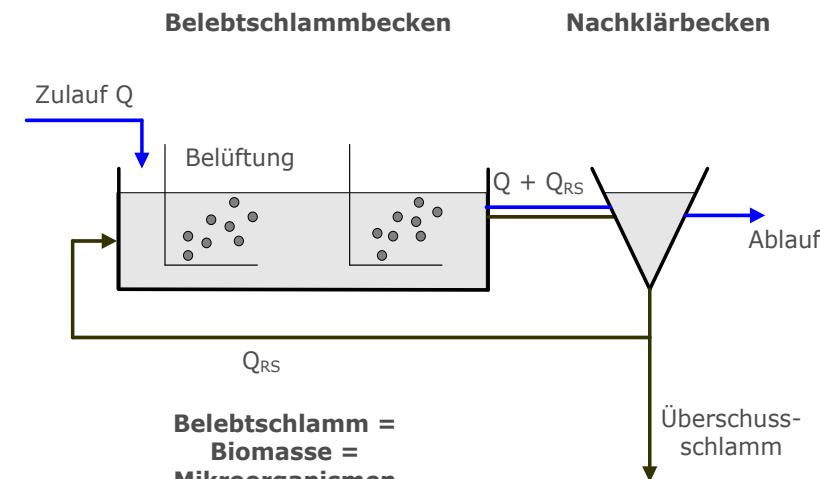


# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

- **Belebtschlammverfahren:**  
Selbstreinigungsvorgänge Natur (frei schwebende Flocken) kopiert
- Intensivierung natürlicher Prozesse:  
Steigerung **Organismendichte** und Optimierung **Milieubedingungen**
- **Aufkonzentration** von Bakterien → Reinigungszeit im Vergleich Gewässer um ein Vielfaches **verkürzt** → Flächenbedarf kleiner
- **Nachklärbecken** werden die Bakterien "gesammelt" und als **Rücklaufschlamm** wieder zurückgeführt

→ **Belebtschlammverfahren:** weltweit wichtigstes Verfahren



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

Type of bacteria	Reaction	C-source	e <sup>-</sup> -donor (substrate getting oxidized)	e <sup>-</sup> -acceptor (substance getting reduced)	Products
aerobic heterotrophic	aerobic oxidation	organic comp.	organic comp.	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
aerobic autotrophic	nitrification	CO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
anoxic heterotrophic	denitrification	organic comp.	organic comp.	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie

- **Stoffwechsel von Mikroorganismen**

- Klassifizierung der **Lebewesen** und **Viren**
- **Ernährungstypen**
- **aerober** und **anaerober** Abbau
- **Wachstumskinetik** (Monod)



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Grundbausteine

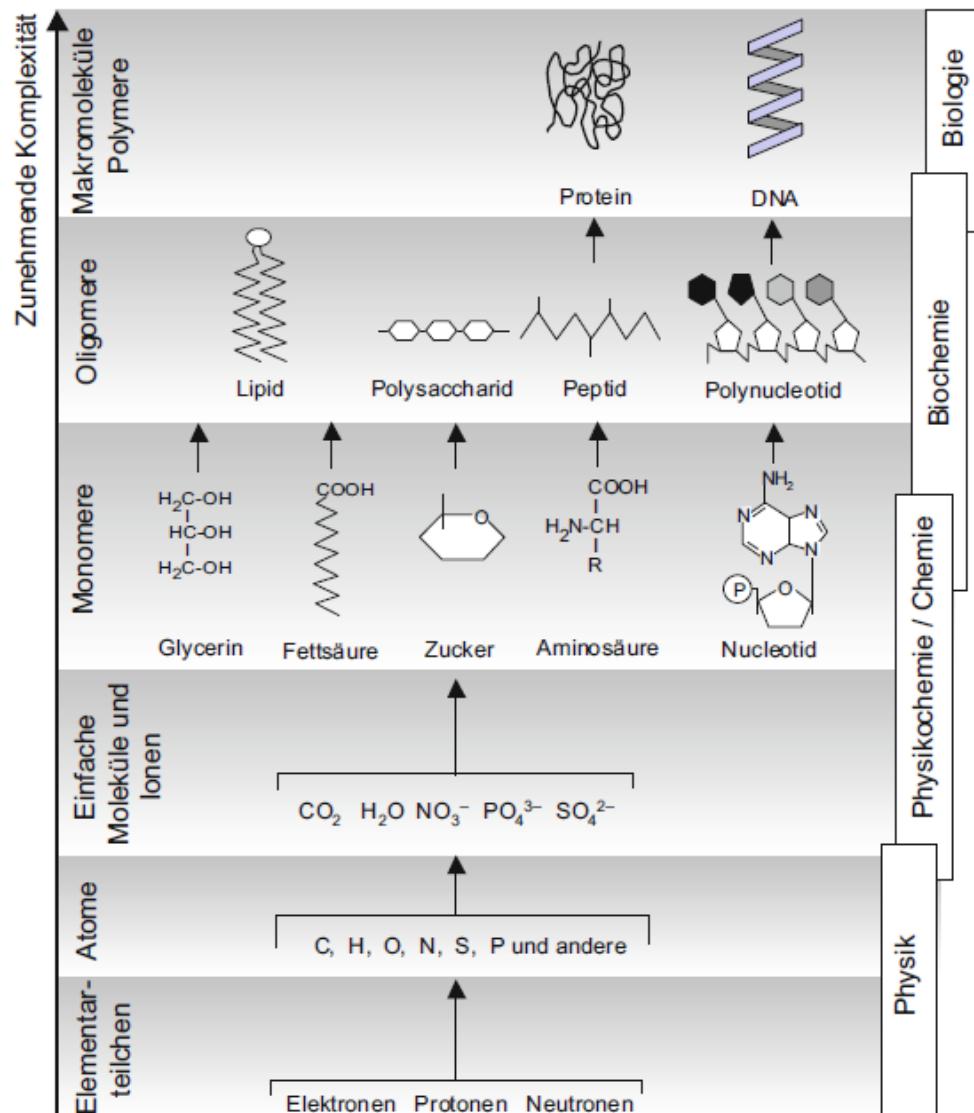
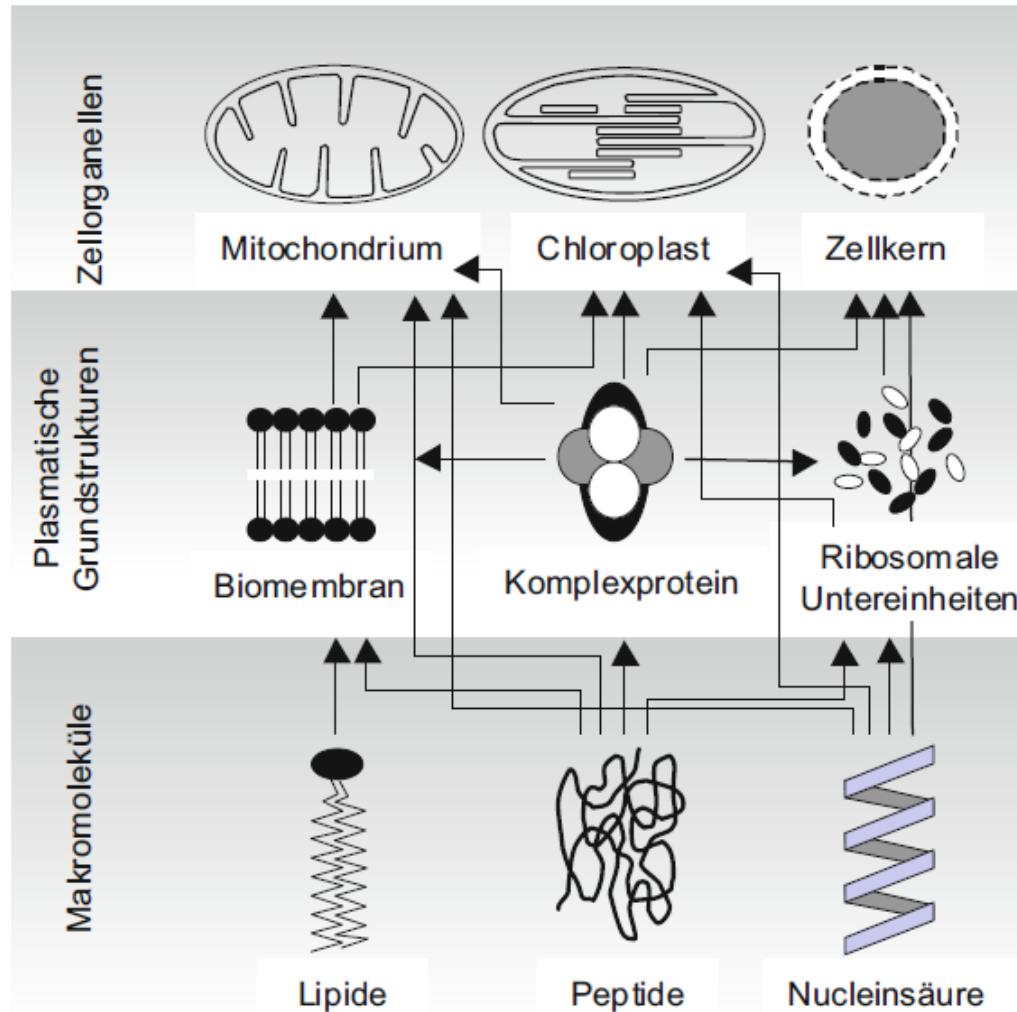


Abb. 1.4 Aufbau organischer Strukturen aus ihren Grundbausteinen und Zuständigkeit der einzelnen Naturwissenschaften

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Zelle

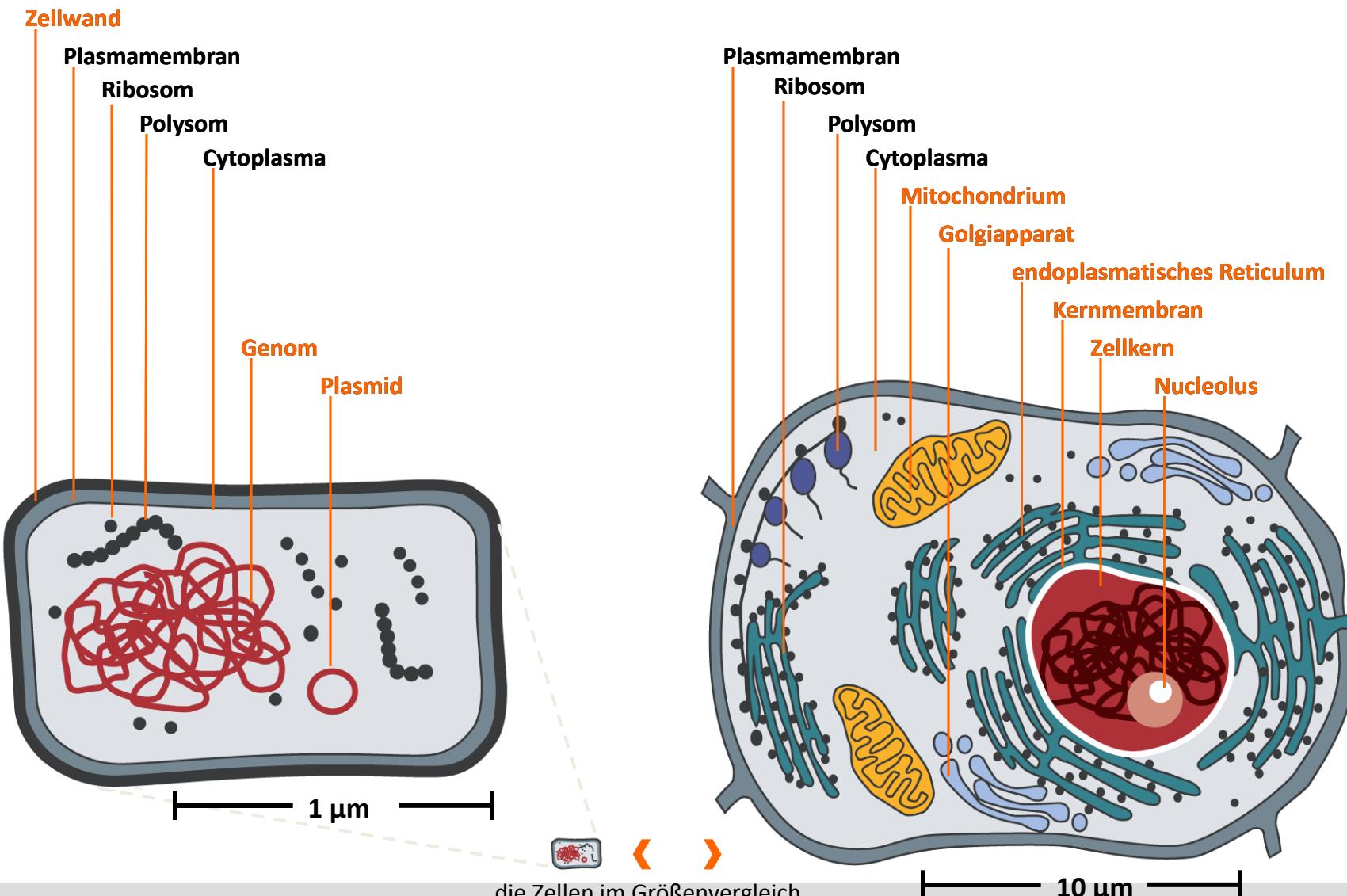


**Abb. 1.1** Strukturhierarchie in der Zelle: Biomakromoleküle und Organellen

[Bannwarth et al., 2019]

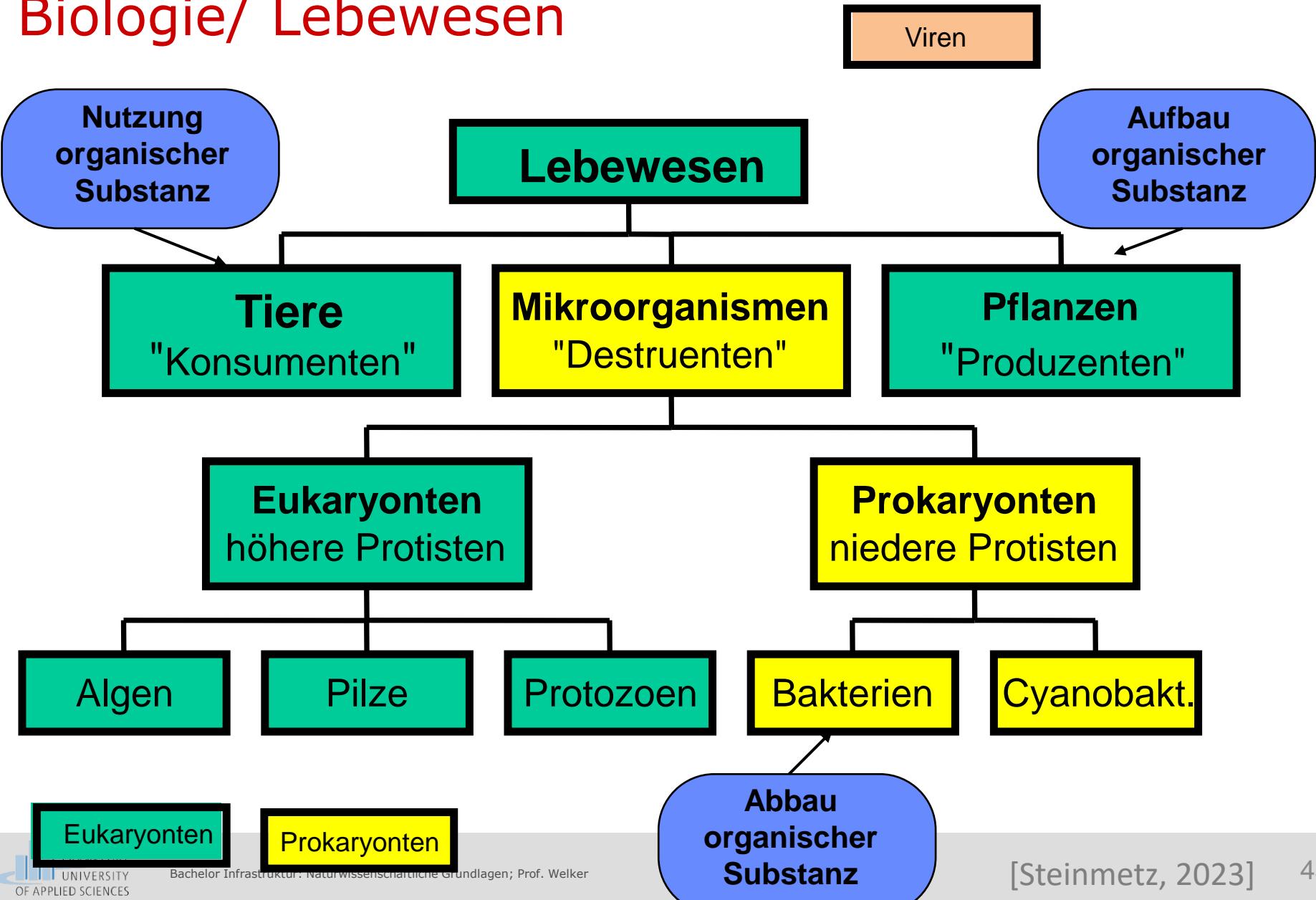
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Bakterienzelle versus Tierzelle



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Lebewesen



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Lebewesen

- **Lebewesen**: Aufteilung aufgrund ihrer „Ernährungsweise“ in zwei wesentliche Hauptgruppen
  - **Produzenten** (Pflanzen): anorganische Verbindungen + Energie (Licht) → organische Biomasse (autotrophe Lebensform)
  - **Konsumenten** (Tiere): Abbau organischer Substanz + Sauerstoff (heterotrophe Lebensform) → anorganische Stoffe + Energie (Wärme) + organische Stoffe (Biomassezuwachs)
- Verknüpfung dieser Prozesse führt zu **Kreisläufen**
- **Mikroorganismen**: nicht sauber abgegrenzt
  - **Destruenten** (d.h. sie leben von toter org. Substanz, heterotrophe Lebensform)
  - **Einzellige Algen, aber auch Bakterien**, die der autotrophen Lebensform zuzuordnen sind (C-Quelle ist anorg. Substanz  $\text{CO}_2$ )

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Metabolismus

**Metabolismus** = Stoffwechsel

(Umsetzung der energiereichen Stoffe)

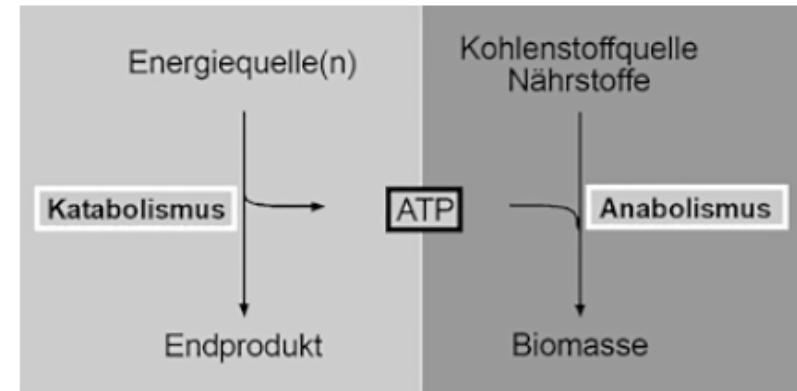
z.B. Polysaccharide zu Glukose  
Fette zu Fettsäuren  
Eiweiße zu Aminosäuren

**Energiestoffwechsel**

**(Katabolismus):** Erhaltung des  
Lebenszustandes überwiegend im  
Citratzyklus und Atmungskette

**Baustoffwechsel (Anabolismus):**

Aufbau körpereigener Substanz  
(Wachstum, Vermehrung)

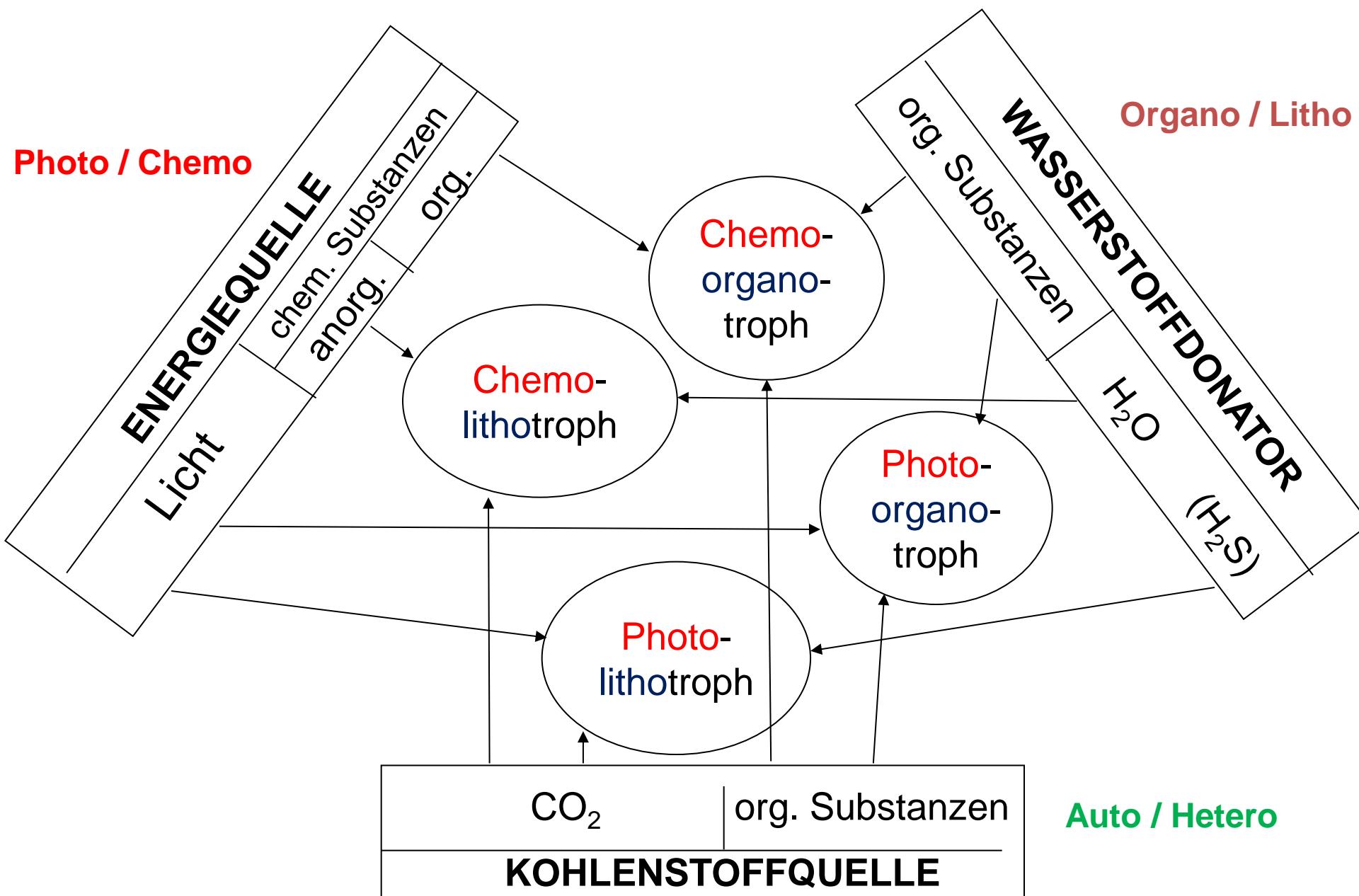


■ Abb. 3.1 Zusammenhang von Energiegewinnung und Biomassebildung. Die Kohlenstoffquelle ist in vielen Fällen identisch mit einer der Energiequellen

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

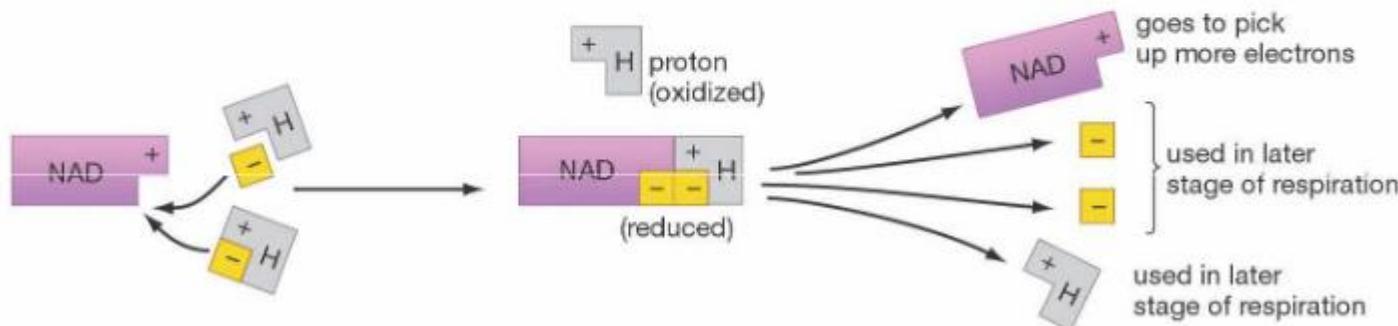
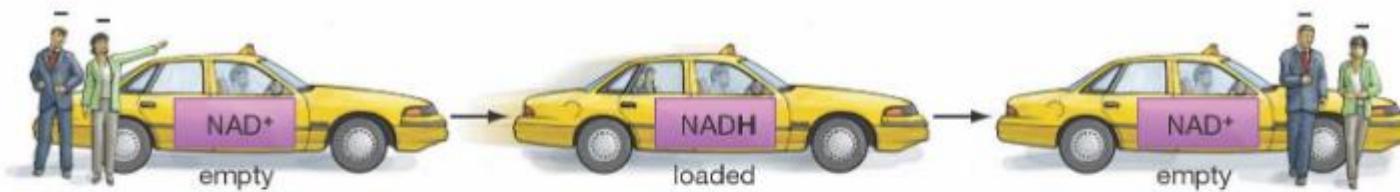
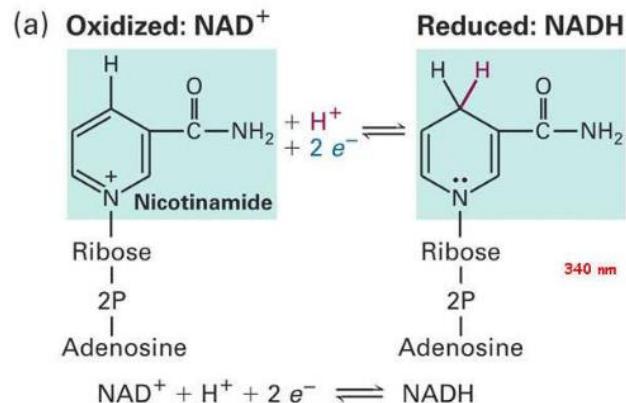
## Biologie/ Ernährungstypen

Energie-, Wasserstoff- Kohlenstoffquelle	Ernährungstyp
<b>Energiequelle</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Strahlung (Licht)</li><li>➤ chemische Umsetzungen</li></ul>	phototroph chemotroph
<b>Wasserstoff- oder Elektronendonator</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ reduzierte anorganische Verbindungen (z.B. <math>\text{NH}_4^+</math>, <math>\text{NO}_2^-</math>, <math>\text{H}_2</math>, <math>\text{S}^{2-}</math>, <math>\text{Fe}^{2+}</math>)</li><li>➤ organische Verbindungen</li></ul>	lithotroph organotroph
<b>Kohlenstoffquelle:</b> Aufbau der Biomasse <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Kohlendioxid <math>\text{CO}_2</math> als Hauptquelle</li><li>➤ organische Kohlenstoff-Verbindungen</li></ul>	autotroph „selbst“ heterotroph „fremd“



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

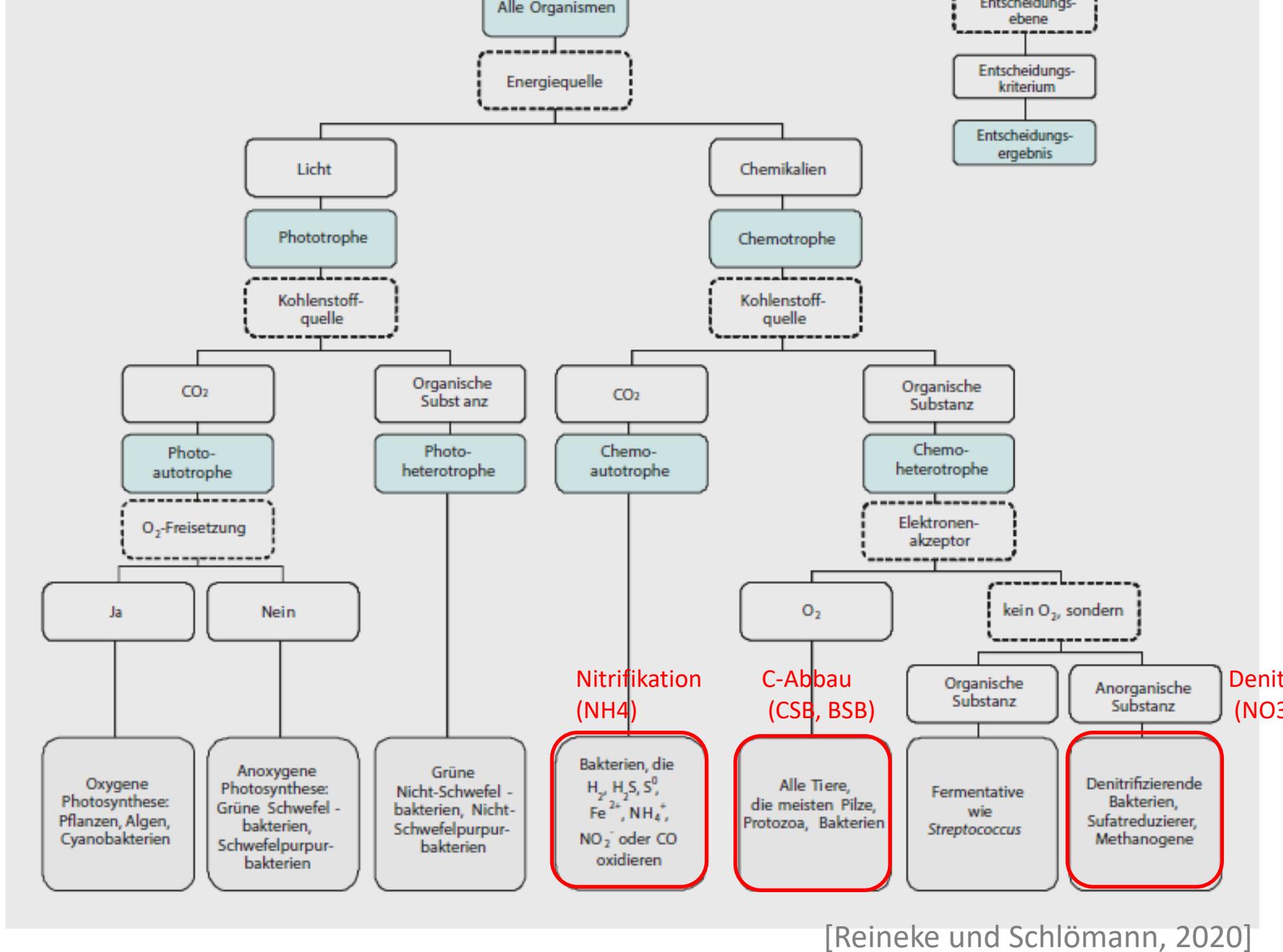
## Wasserstoffdonator, organisch



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Ernährungstypen

Energiequelle	Licht	photo-	-troph
	Redoxreaktion	chemo-	
Wasserstoff- bzw. Elektronendonator	organische Verbindung	organo- litho-	hetero- auto-
	anorganischer Stoff		
Kohlenstoffquelle	organische Verbindung		
	anorganische Verbindung		



[Reineke und Schlömann, 2020]

Abb. 3.12 Fließschema zur Unterteilung der Organismen in die Stoffwechseltypen

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Stoffwechsel

### Baustoffwechsel:

Oxidation von organischen Kohlenstoffverbindungen  
mit **heterotrophen Bakterien**:

$$2 \text{ g org. C} \rightarrow 1 \text{ g Zellmasse}$$

Oxidation von  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$  mit **autotrophen Bakterien** zu  $\text{NO}_3$

$$30 \text{ g } \text{NH}_3 \rightarrow 1 \text{ g Zellmasse}$$

→ **Wachstumsvorteil** für **heterotrophe Bakterien**

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Milieubedingungen

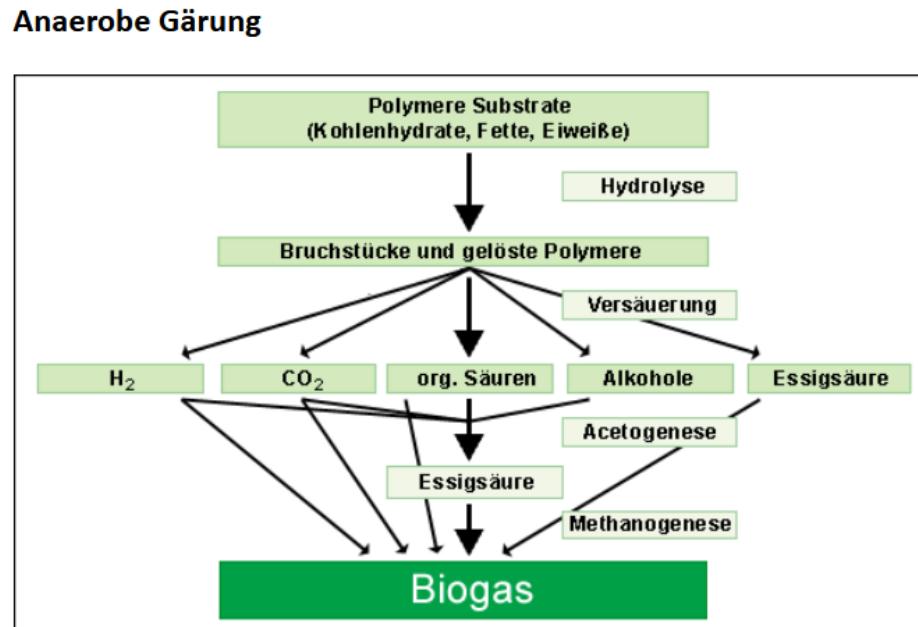
Vorherrschende Energiegewinnung	Milieubedingung
<b>Respiration</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Sauerstoff, <math>O_2</math></li></ul>	aerob
<b>Respiration</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Nitrat <math>NO_3^-</math>, Nitrit <math>NO_2^-</math>, kein gelöster Sauerstoff</li></ul>	anoxisch*
<b>Fermentation</b> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Organische Verbindungen, weder gelöster Sauerstoff, noch Nitrat</li></ul>	anaerob

\*Dieser Begriff ist in der Mikrobiologie nicht geläufig, er wurde durch Ingenieure eingeführt, um die Umweltbedingungen zu charakterisieren, die für die Denitrifikation typisch sind.

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ anaerober Abbau, Gärung

anaerober Abbau bis zur **Methanproduktion**



### Biogas:

- 50 bis 75 Volumen-% aus Methan ( $CH_4$ )
- 25 bis 50 Volumen-% aus Kohlendioxyd ( $CO_2$ )
- geringe Mengen an Sauerstoff, Stickstoff und Spurengase

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

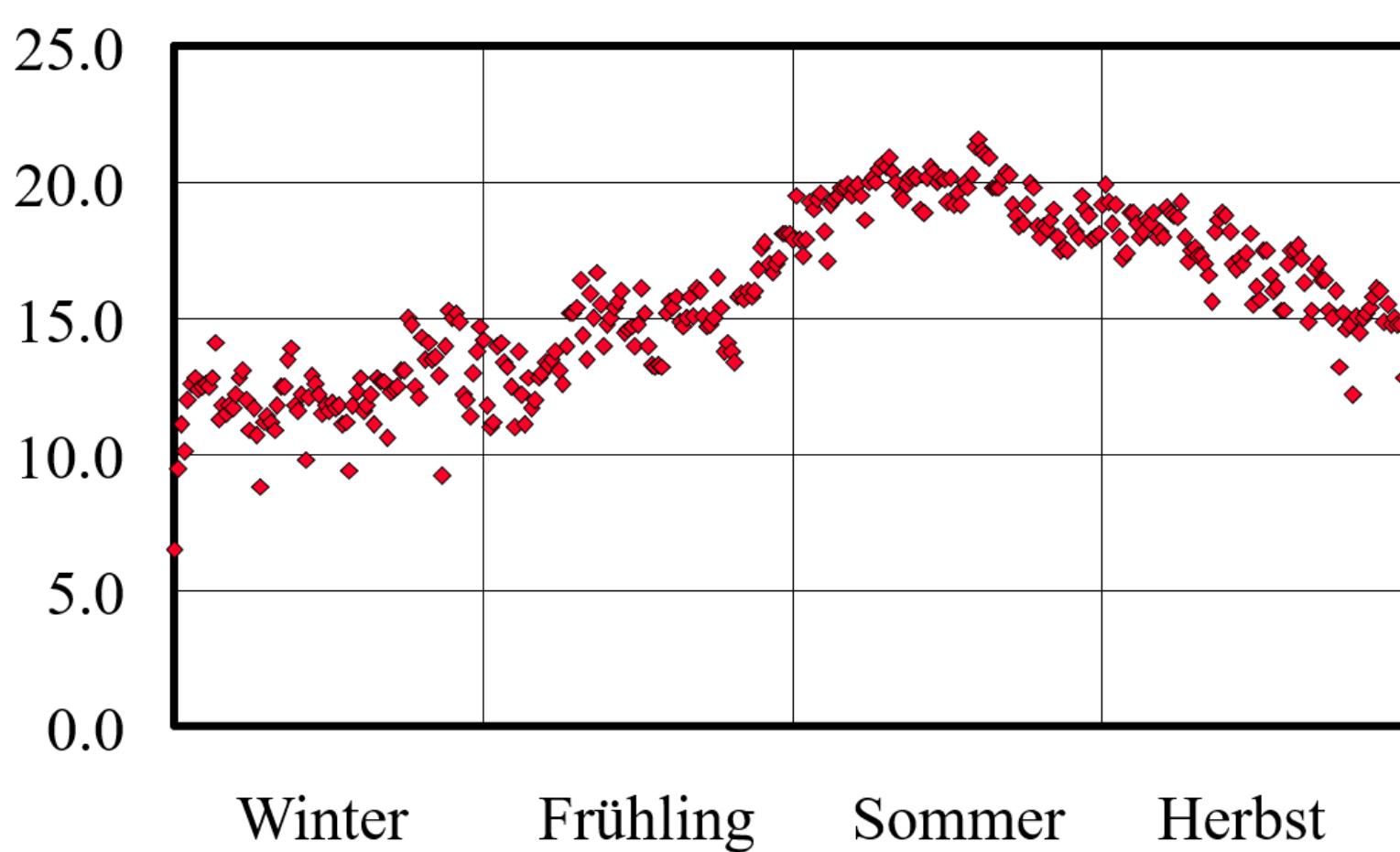
## Biologie/ Wachstum

- Vermehrung von Zellenzahl und Organismendichte, benötigt **Substrate** und Nährstoffe
- Weitere **Wachstumsbedingungen** sind:
  - pH-Wert
  - Temperatur
  - Toxische Substanzen
- Bildung substratspezifischer **Enzyme** wird durch das Nahrungsangebot induziert
- u.U. werden **nicht alle Substratbestandteile zur gleichen Zeit** abgebaut
- bei schwer abbaubaren Stoffen spielt die **Zeit** eine wesentliche Rolle

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Wachstum

### Einfluss Temperatur



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Kinetik

- Bakterien wachsen **exponentiell**
- **Wachstumsgeschwindigkeit ist limitiert**
- Prozesse **Abwasserreinigung**: Wachstum durch **Substratmangel** begrenzt → Beschreibung durch die **MONOD-Kinetik**

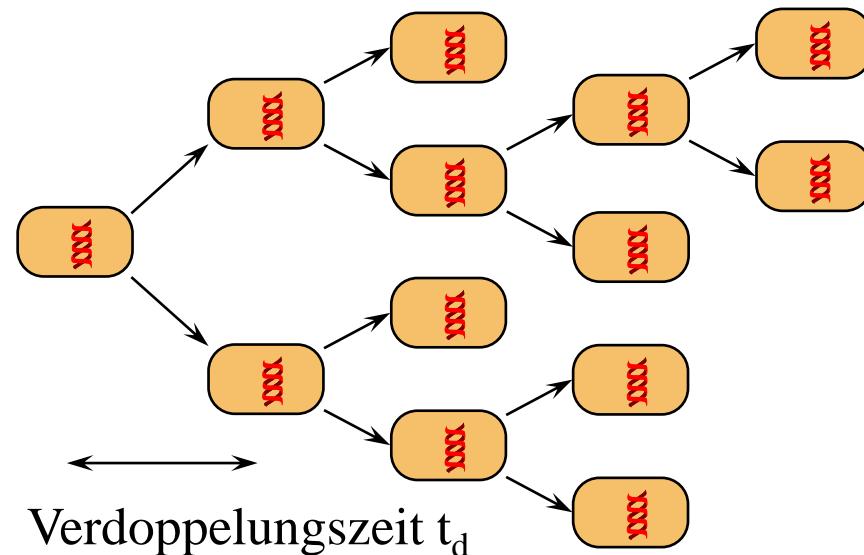
$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{S + k_S}$$

mit:

$\mu$ =aktuelle Wachstumsgeschwindigkeit  
 $\mu_{\max}$ =maximale Wachstumsgeschwindigkeit  
 $S$ =Substratkonzentration  
 $k_S$ =Substrataffinitäts-Konstante

Wachstumsgeschwindigkeit bei:

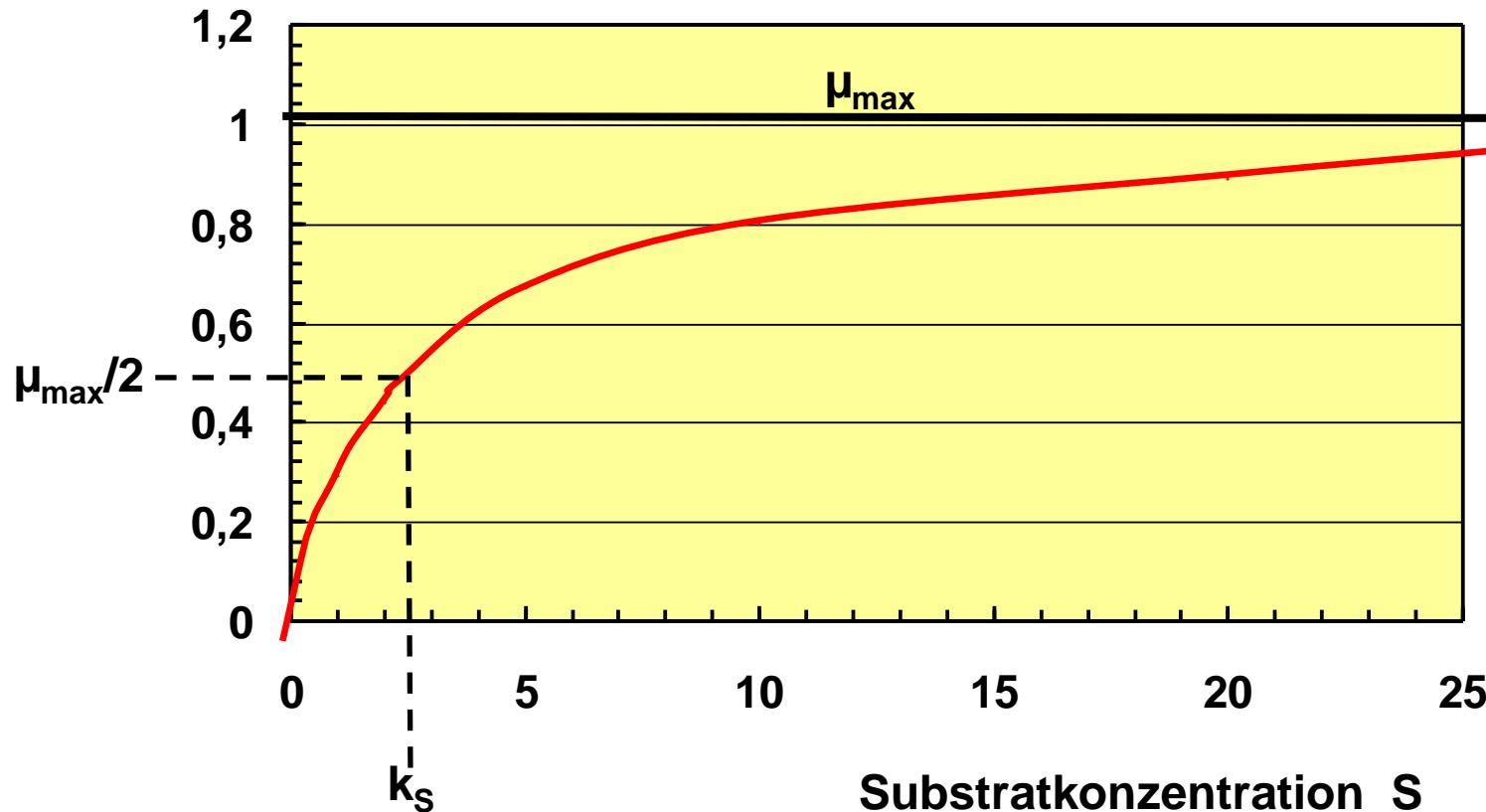
$$\begin{array}{ll} S = k_S : & \mu_{\max}/2 \\ S \gg k_S & \mu_{\max} \end{array}$$



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

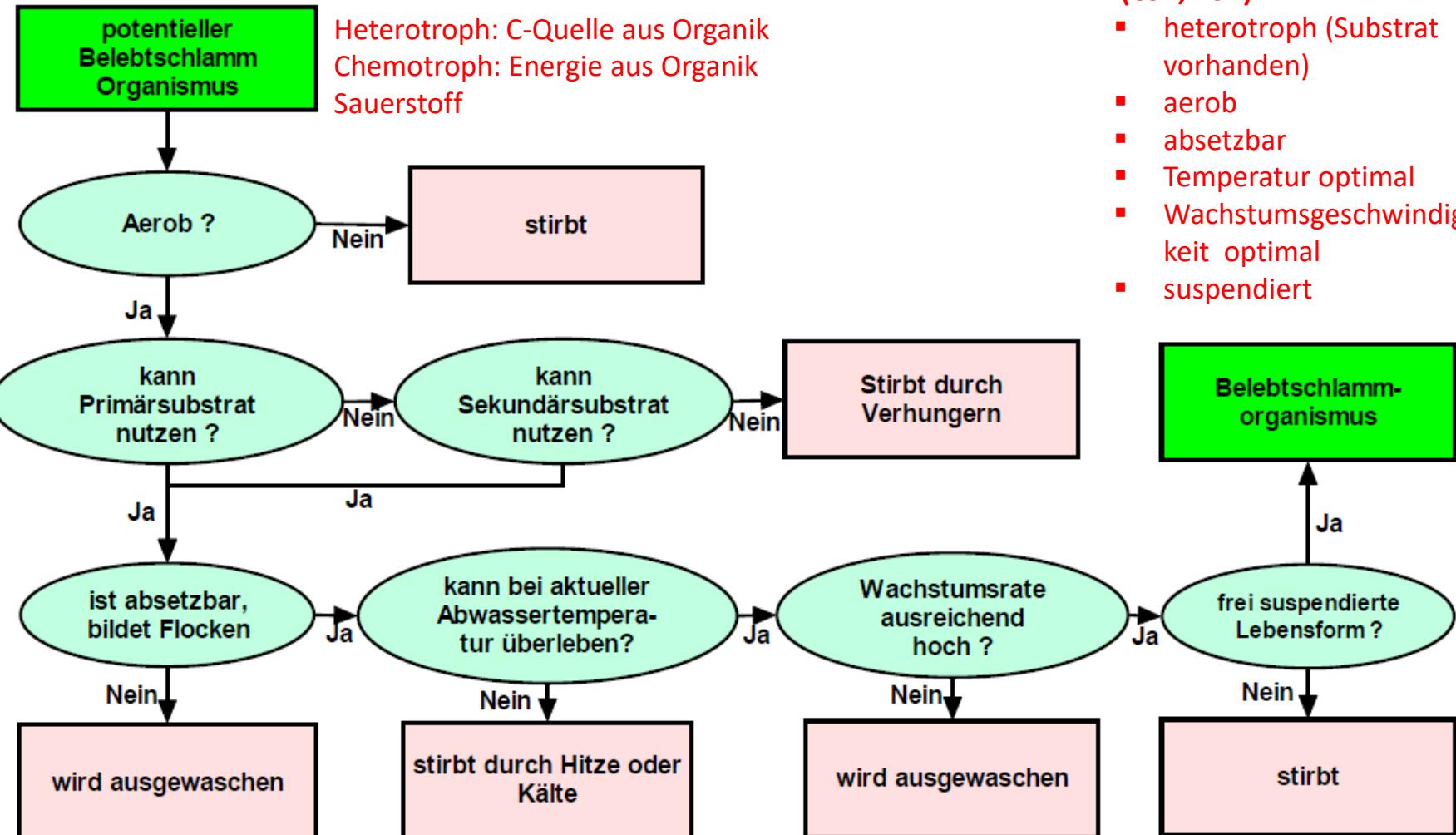
## Biologie/ Wachstum

### Monod-Kinetik: Wachstumsgeschwindigkeit $\mu$



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

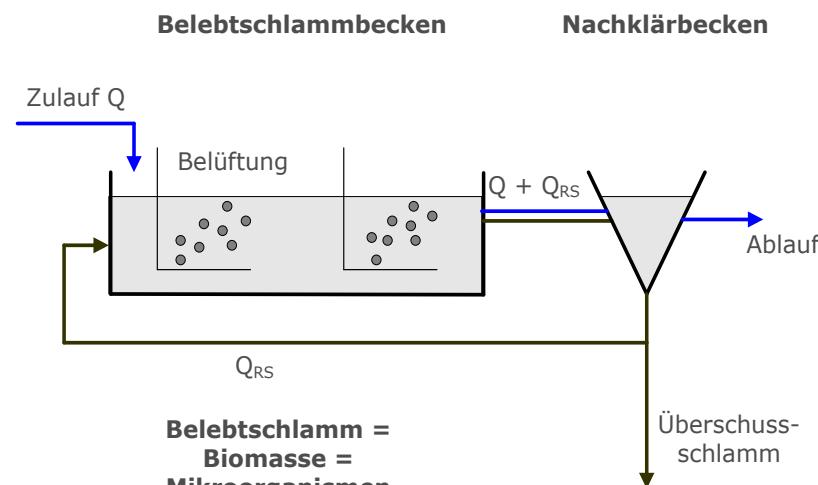
## Biologie



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

- **organische Substanzen** (BSB<sub>5</sub>, CSB) sind **biologisch abbaubar**
  - **aerobe biologische Behandlung**  
Standardmethode und „**zweite Stufe**“ der Abwasserreinigung
  - **Mikroorganismenwachstum**  
(Überschussschlammproduktion und Rückführung)
  - **Sauerstoffverbrauch**



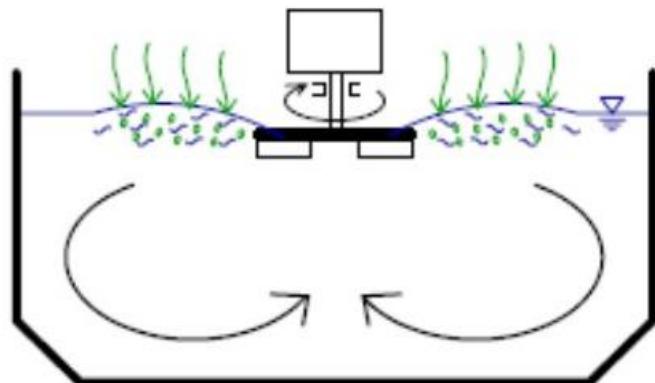
## Beispiel: Glucoseabbau (Oxidation mit Sauerstoff)



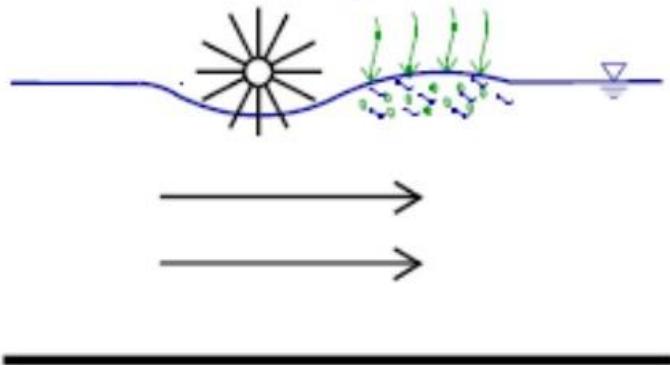
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

⇒ **Kreiselbelüfter:**



⇒ **Walzenbelüfter (Mammutrotoren):**

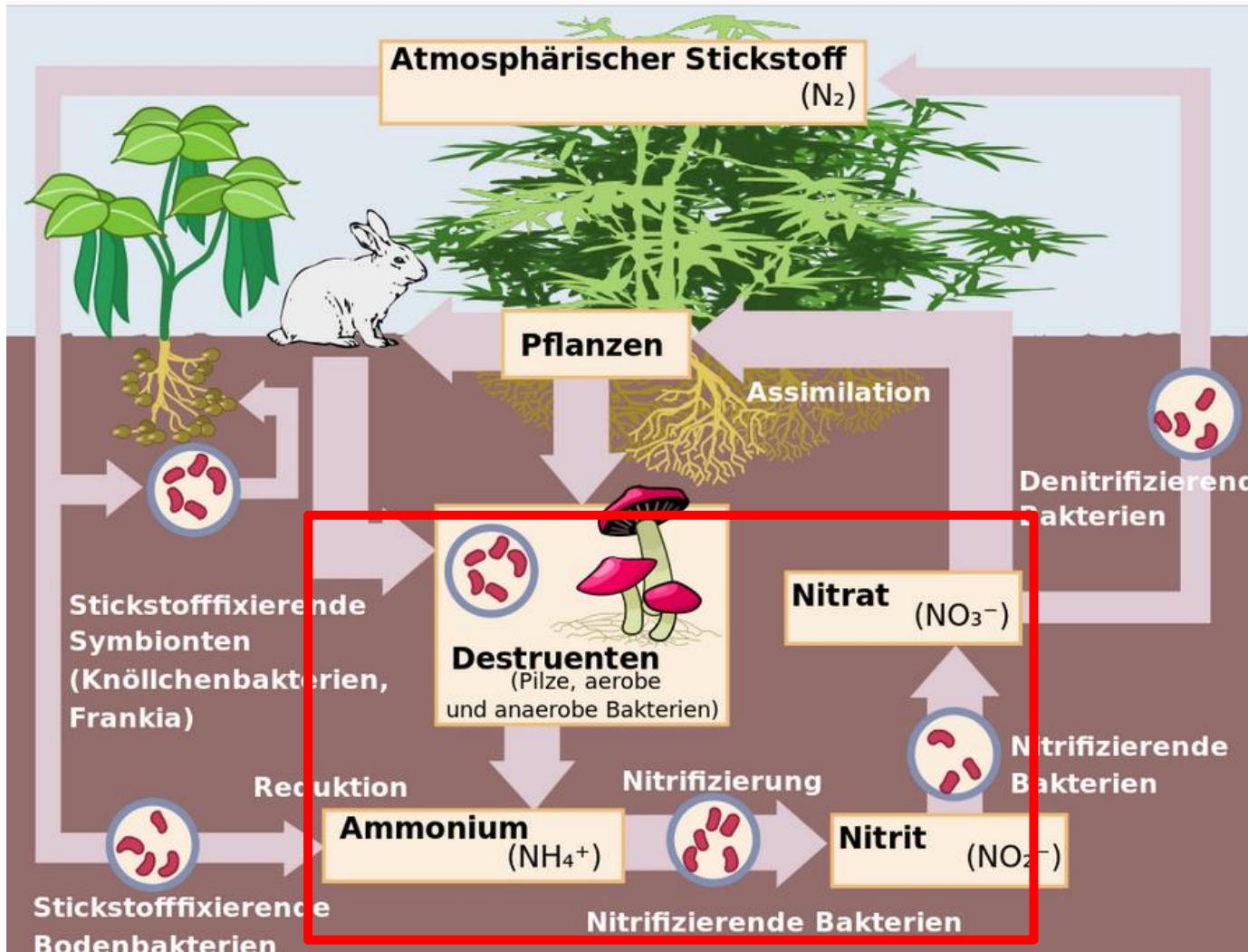


**Belüftung kostet viel Energie!**



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Biologie/ Stickstoffkreislauf



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

**Nitrifikation** ist die **autotrophe** Oxidation von Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) durch spezialisierte **Mikroorganismen** in zwei Schritten:

### Nitritation (Nitrosomonas)



### Nitratation (Nitrobacter)



### Gesamter Prozess



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

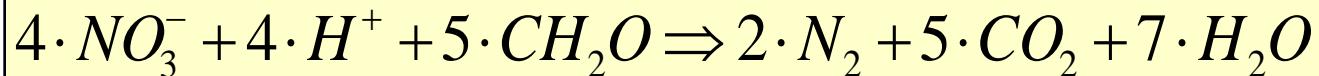
## Umweltchemie - Abwasser

- **Stickstoffoxidierende Bakterien (autotrophe Nitrifikanten)** beziehen ihre Baustoffe aus **anorganischen Stoffen**. Dieser Stoffaufbau erfordert Energie.
- sie werden erst tätig, wenn ein **gewisser Kohlenstoffabbau** erfolgt ist, anderenfalls haben die **heterotrophen Bakterien** einen Wachstumsvorteil.
- autotrophe Bakterien haben eine **längere Generationszeit** als heterotrophe Bakterien, d.h. sie können sich nur entwickeln, wenn sie mindestens 12 Tage im System gehalten werden → größere **Beckenvolumen**
- stark **temperaturabhängig** ( $T > 12^\circ \text{ C}$ ) und **pH labil** (Entstehung  $\text{H}^+$  → Eigenhemmung bei gering gepufferten Wässern)

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

**Denitrifikation** ist die Reduktion von Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) in gasförmigen Stickstoff ( $\text{N}_2 \uparrow$ ), der in die Atmosphäre entweicht, durch **heterotrophe Mikroorganismen**



- leicht abbaubares **organisches Material** muss als Substrat zur Verfügung stehen
- es darf kein **gelöster Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) vorhanden sein (anoxische Bedingungen, Nitratatmung)**, ansonsten würden die Bakterien diesen vorziehen.
- Nebenprodukt **Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )**
- „**Verbrauch**“ von  $\text{H}^+$  (Abpufferung pH Wert)

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

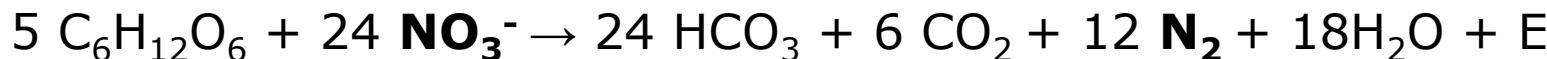
Biologischer Abbau erfolgt nur, wenn damit für beteiligte Organismen **Energiegewinn** einhergeht

### **aerobe Atmung (CSB/BSB-Abbau):**



[2.900 kJ/mol Glukose]

### **Denitrifikation (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>- Abbau):**



[2.700 kJ/mol Glukose]

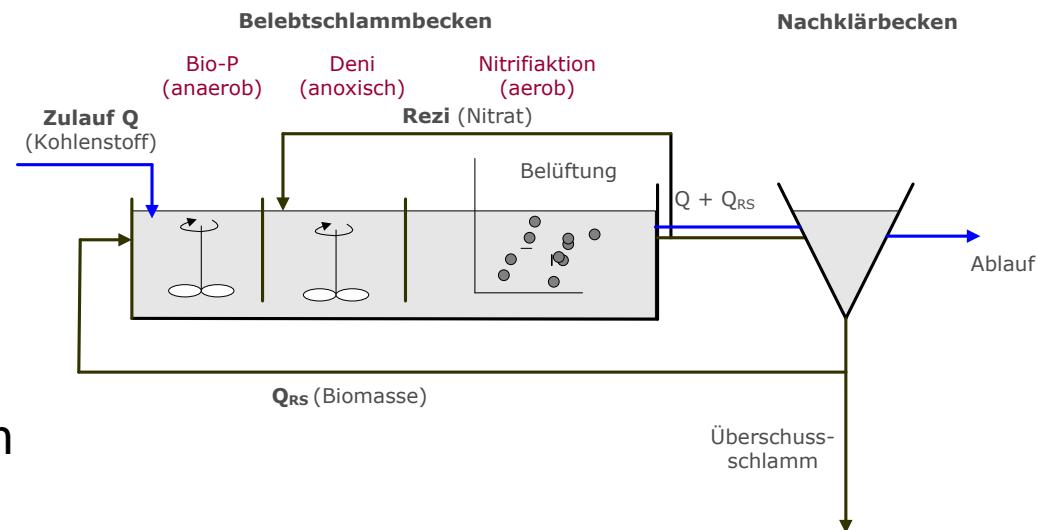
Denitrifikation erfolgt durch die gleichen Bakterien, wenn **kein gelöster O<sub>2</sub>** vorhanden, da aerobe Atmung mehr Energie bringt.

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Nitrifikation

- autotrophe Mikroorganismen
- $\text{CO}_2$  Kohlenstoffquelle
- Substrat: Ammonium
- aerobe Bedingungen
- Entstehung  $\text{H}^+$   $\rightarrow$  pH sinkt  
Puffer wichtig
- Temperatur und Volumen

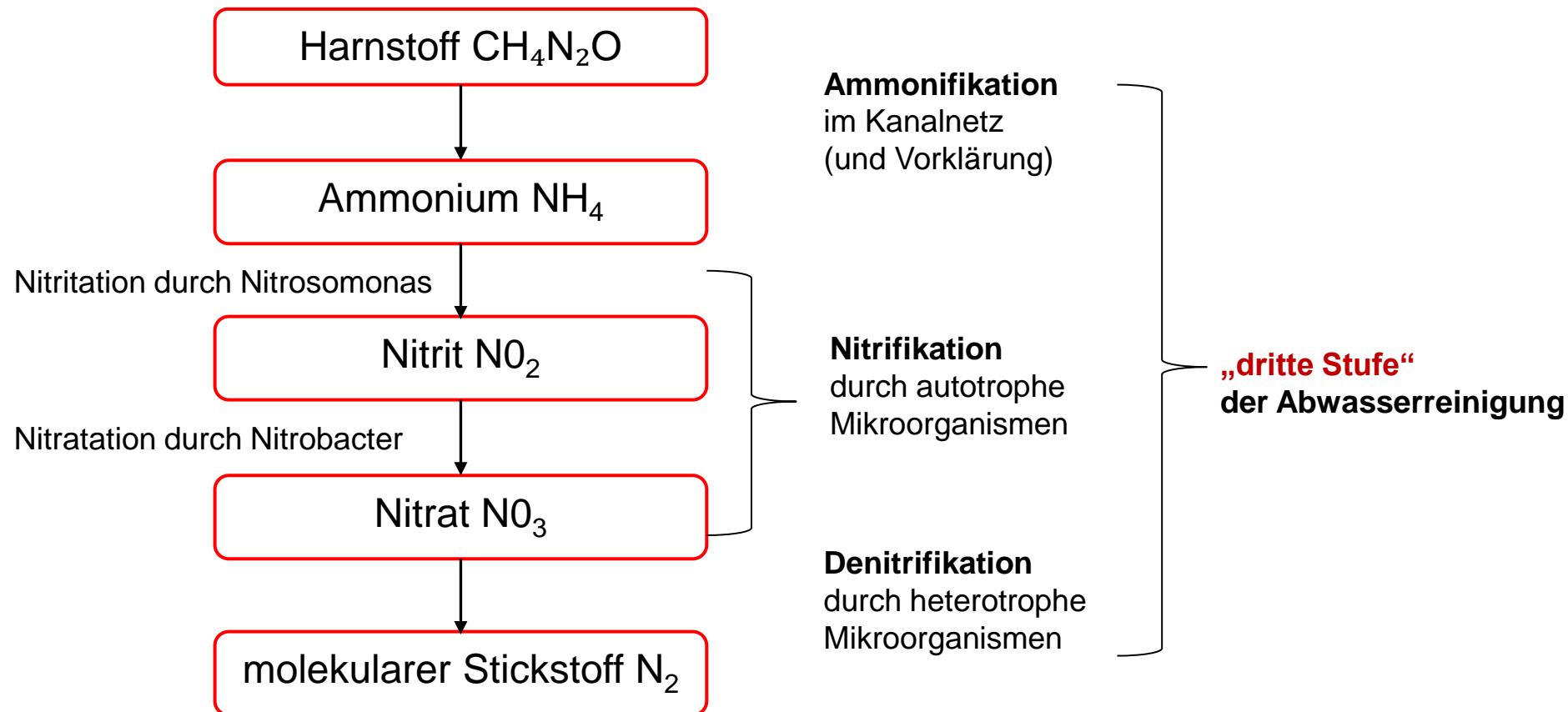


### Denitrifikation

- heterotrophe Mikroorganismen
- organische Kohlenstoffquelle
- Substrat: Nitrat
- anoxische Bedingungen

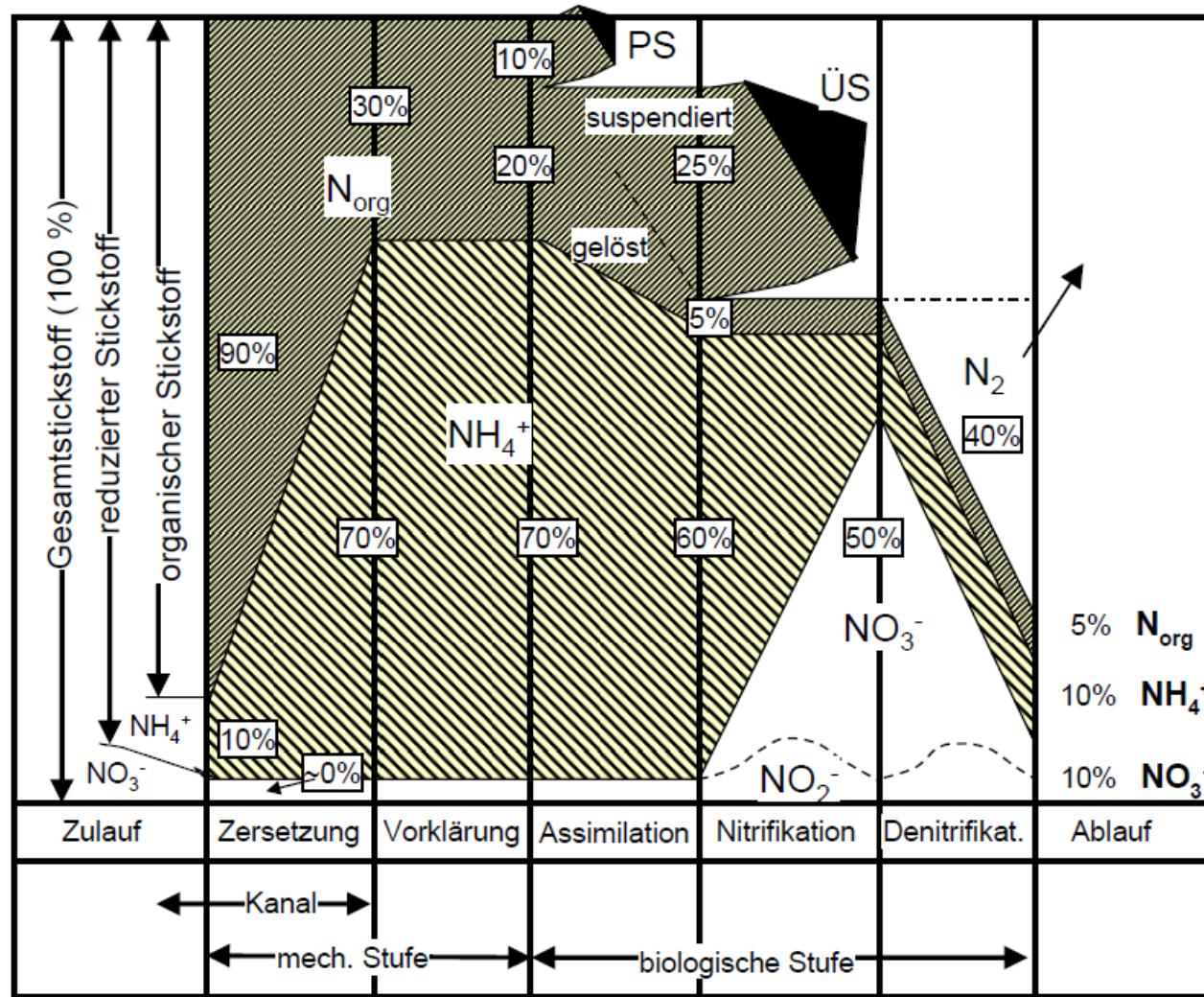
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



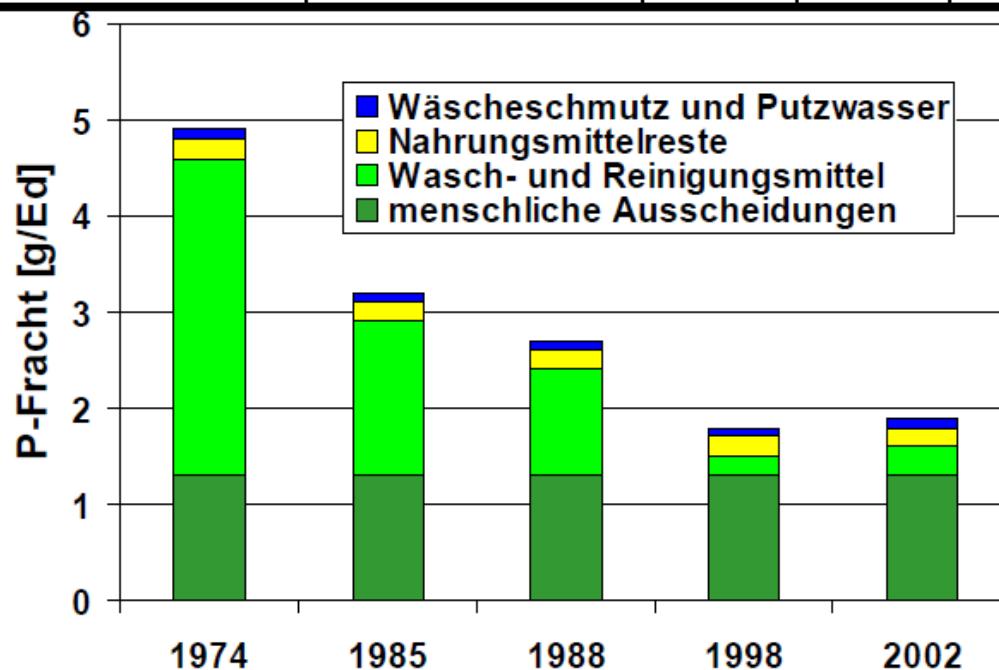


# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

**Bedeutung Phosphor:** Minimumwachstum Faktor bei **Eutrophierung**, insbesondere stehende Gewässer

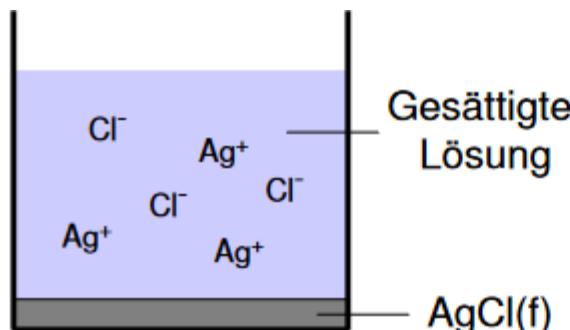
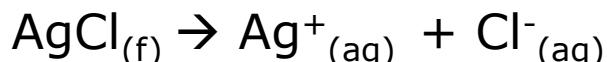
P-Frachten im Abwasser		1975	1985	1990	2005
aus menschl. Fäkalien:	ca. g P/(E· d)	1,9	1,9	1,9	1,8
aus Waschmitteln:	ca. g P/(E· d)	3,1	1,6	0,6	~ 0
insgesamt:	ca. g P/(E· d)	5,0	3,5	2,5	1,8



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

- viele Stoffe sind in Wasser „unlöslich“, d.h. sie sind nur **sehr gering löslich** (z.B. Silberchlorid, Calciumsulfat)
- Andere Stoffe sind **sehr gut löslich** (Natriumchlorid und o-Phosphat in Abwasser)
- Ausbildung Gleichgewicht → **Löslichkeitsprodukt (klein → schwer löslich)**
- **Einflussfaktoren:** Temperatur, pH Wert, Salzgehalt, Komplexe...



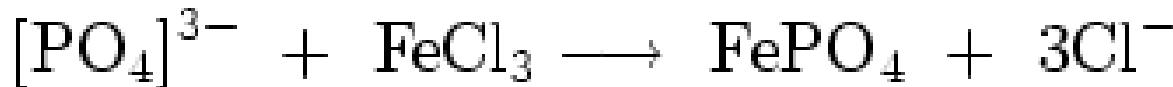
$$K = \frac{c(\text{Ag}^+) \cdot c(\text{Cl}^-)}{c[\text{AgCl}(\text{f})]}$$

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Fällung/Flockung

- Überführung des **gelösten Phosphates** in eine **unlösliche** Verbindung (**Fällung**)
- **Aluminium- oder Eisensalze:** Dosierung in Belebungsbecken  
→ **Fällung** der negativ geladenen Phosphationen zu  $\text{AlPO}_4$  bzw.  $\text{FePO}_4$

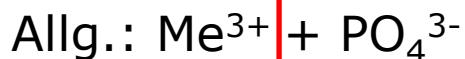


- **Salze** aus dem Fällungsmittel verbleiben im Abwasser → ggf. negative Aufsalzung Gewässer
- entstehende Mikroflocken ballen sich durch Flockung zu **Makroflocken** zusammen (**Flockung**) → Entfernung mit Sedimentation und Filtration

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

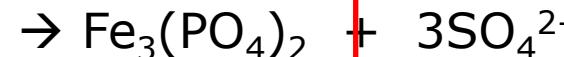
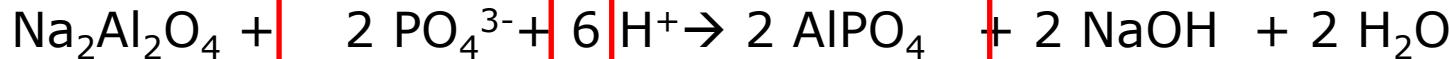
### P - Fällung mit Metallsalzen $\text{Fe}^{3+}$ ; $\text{Al}^{3+}$



#### Kalkhydrat



#### Natriumaluminat



gelöstes Phosphor

ungelöstes Phosphor

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

- **Eindosierung** Fällmittel: Ort möglichst mit turbulenter Strömung und örtliche Unter- und Überdosierungen vermeiden.
  - im Anschluss dürfen die entstandenen Flocken nicht wieder zerstört werden.
- sorgfältige Planung der Art der Dosierung und der Dosierstelle



Dosierstelle



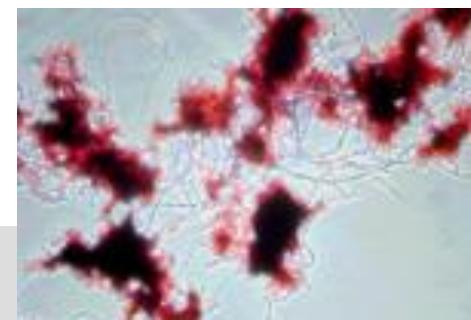
Flockungsmittelbehälter



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

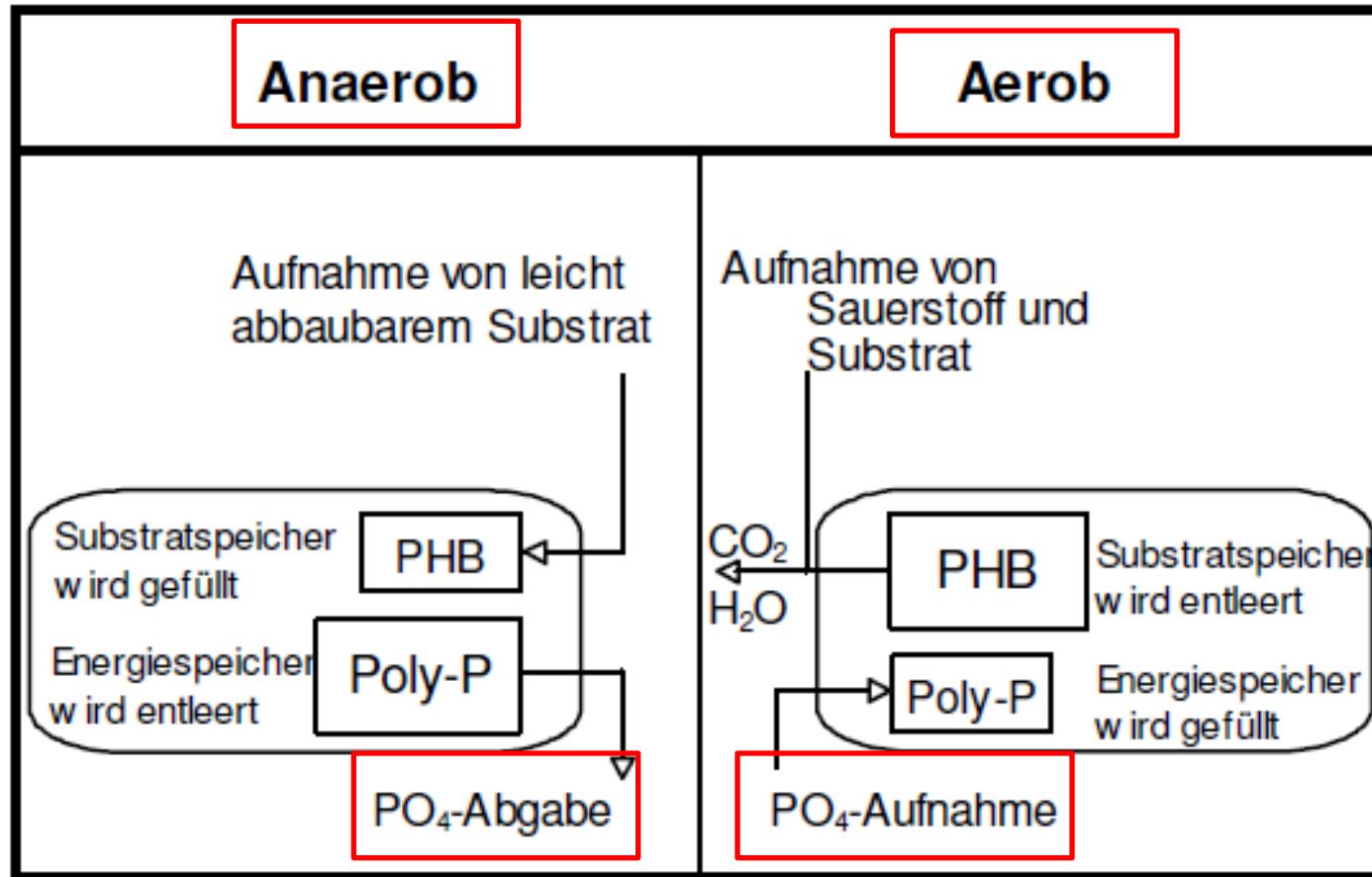
## Umweltchemie - Abwasser

- **biologische P-Elimination:** Bakterien werden im **Wechsel anaeroben und aeroben Bedingungen** ausgesetzt:
- unter **anaeroben Bedingungen (Stress)** geben die Bakterien  $\text{PO}_4^{3-}$  ab, um ihren Energiestoffwechsel aufrecht zu erhalten.
- im anschließenden **aeroben Milieu nehmen die Bakterien vermehrt**  $\text{PO}_4^{3-}$  auf, um in zukünftigen Stresssituationen gewappnet zu sein.
- das vermehrt aufgenommene **P (3...4% statt normal: 1...2%)** kann mit dem **Überschussschlamm** aus dem System entfernt werden.



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

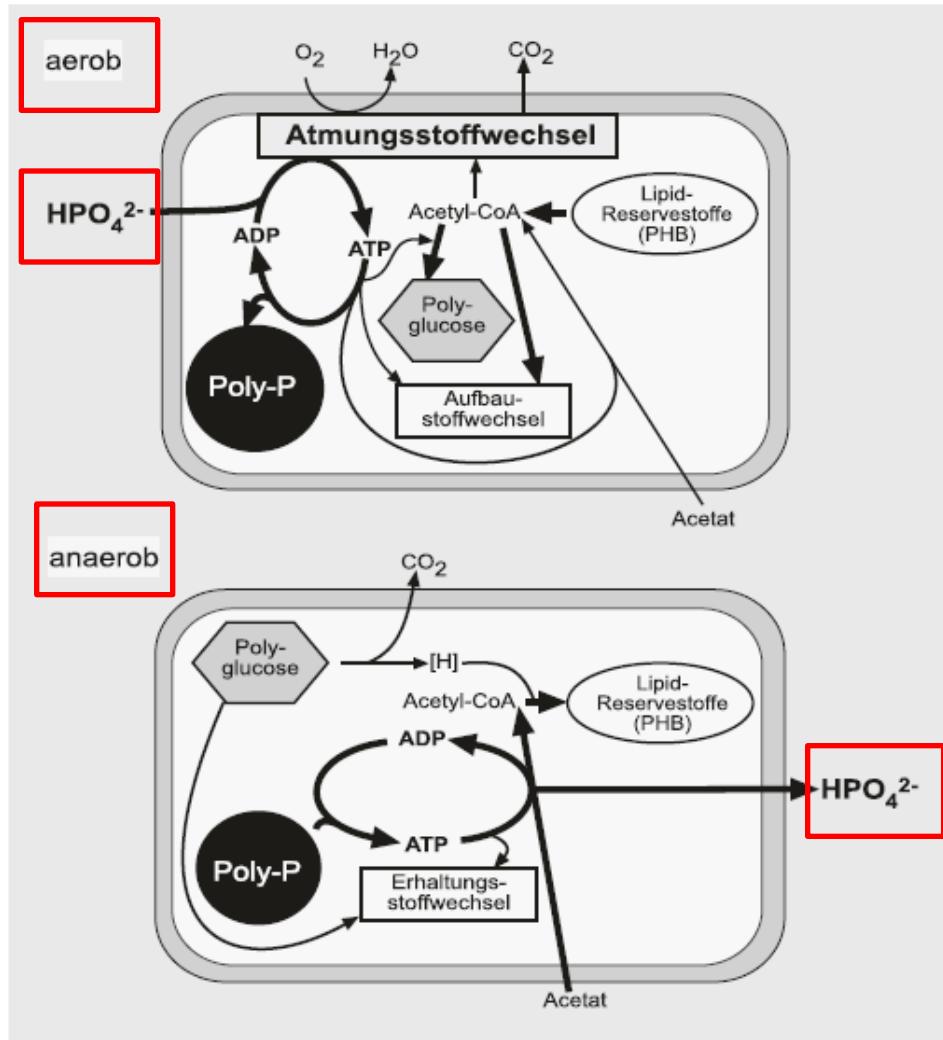
## Umweltchemie - Abwasser



Klee, O.: Angewandte Hydrobiologie, Thieme Verlag, Stuttgart, 1991

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



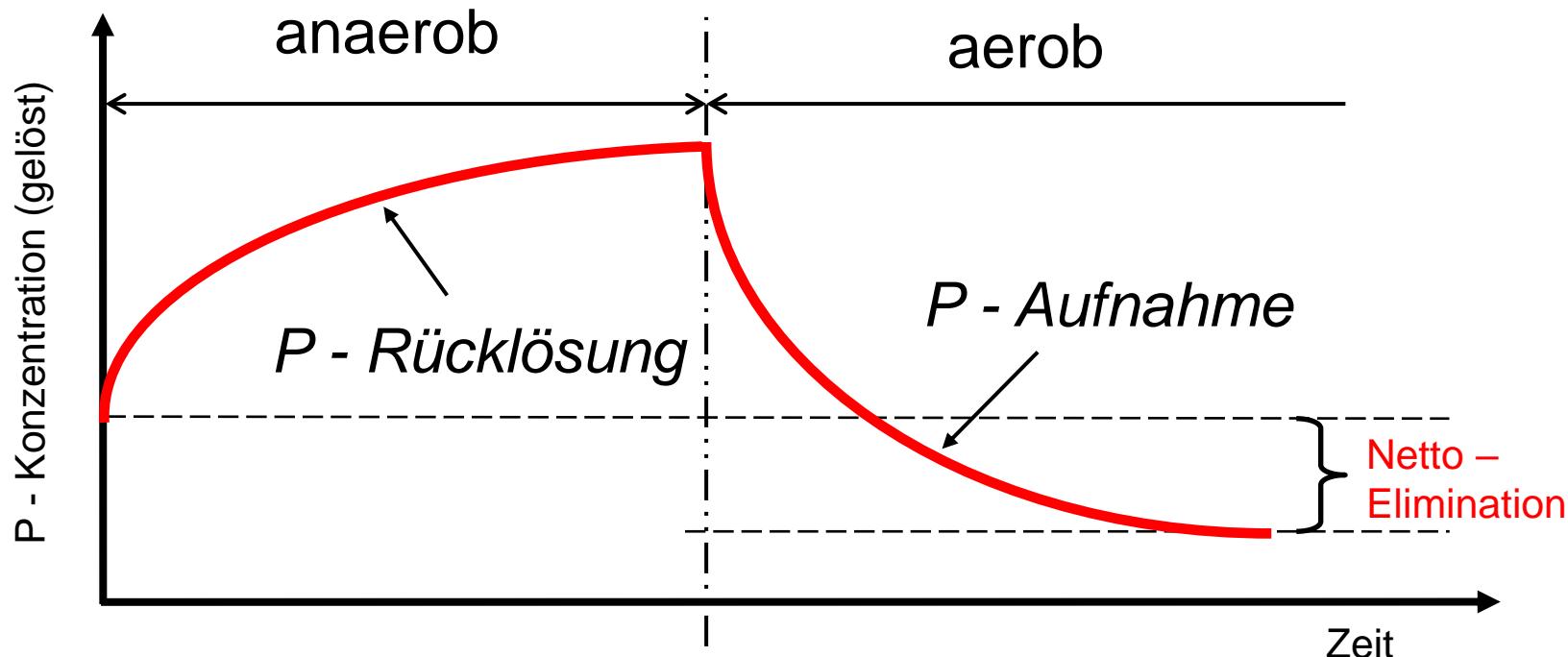
[Reineke und Schlömann, 2020]

■ Abb. 14.5 Schematische Darstellung des Stoffwechsels obligat aerober, polyphosphatspeichernder Bakterien unter aeroben und anaeroben Bedingungen. Poly-P, Polyphosphat; PHB, Poly- $\beta$ -hydroxybuttersäure; [H],

# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

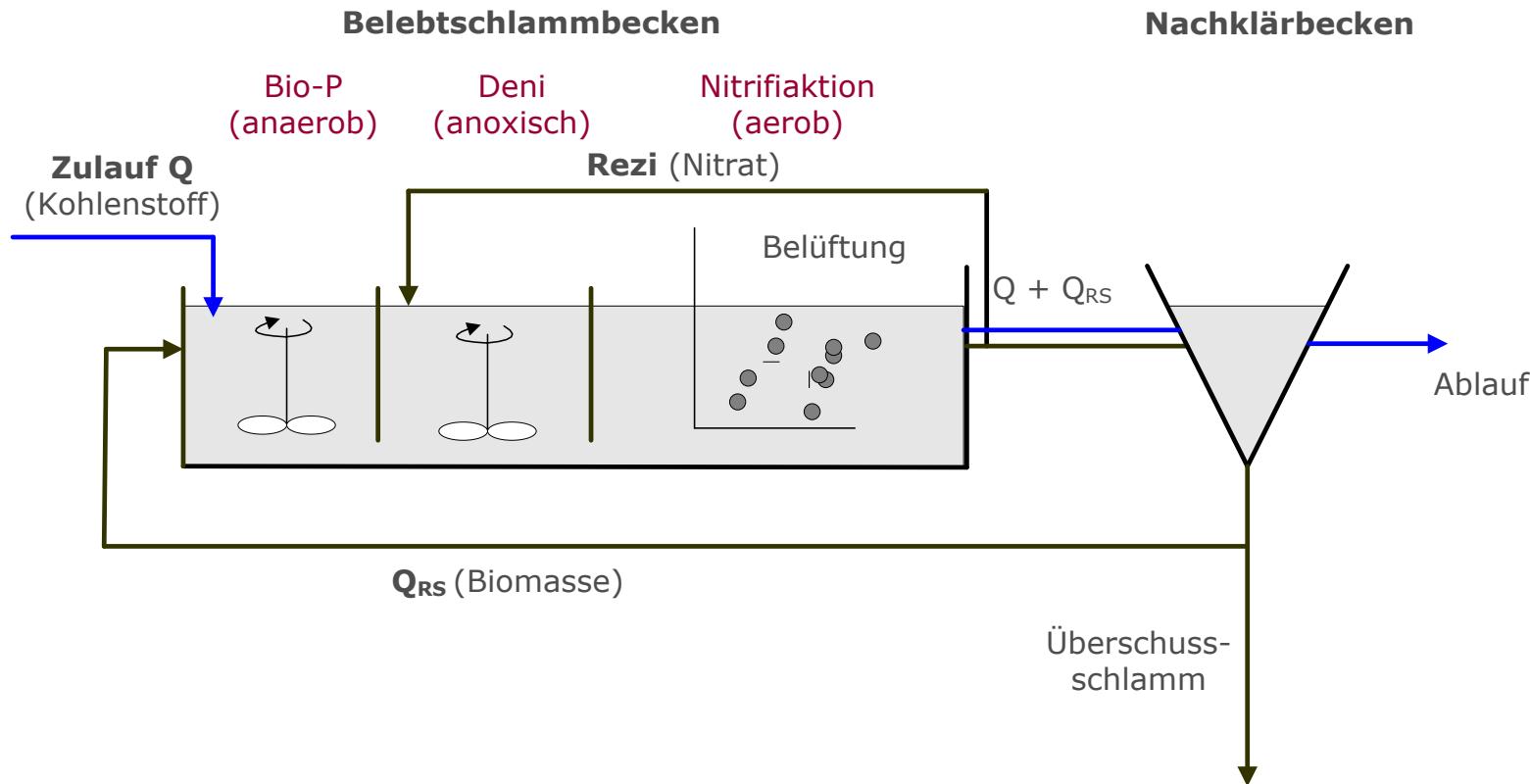
- **anaerobe Verhältnisse** (auch kein Nitrat!)
- leicht abbaubarer organischer Kohlenstoff (CSB/BSB) muss vorhanden sein (heterotrophe Organismen)
- Abwassertemperatur  $> 18^{\circ}\text{C}$



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

Beispiel einer Kläranlage **mit vorgeschalteter biologischer P-Elimination und Stickstoffelimination („dritte Stufe“ der Abwasserreinigung)**



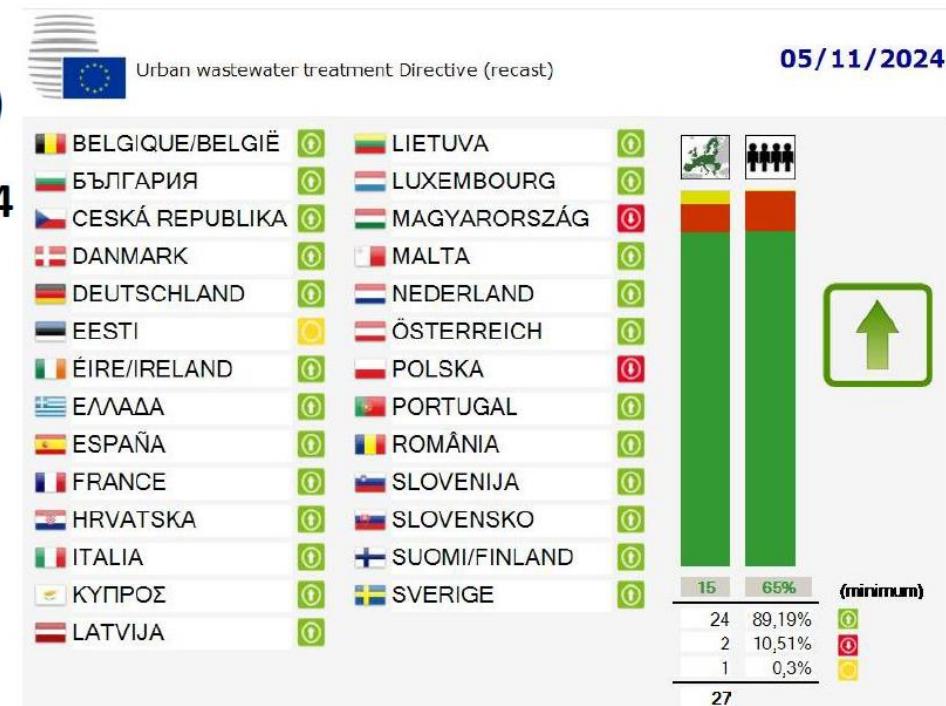


# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

### Zukunft: **vierte Stufe** der Abwasserreinigung

- Novellierung der **Kommunalabwasserrichtlinie 91/271/EWG von Mai 1991**  
→ Anpassung der Richtlinie an den Stand der Technik nach mehr als 30 Jahren
- Vorschlag der EU KOM am **26.10.2022**;  
Ratspräsidentschaften (CZE, SWE, ESP, BEL)
- politische Einigung im **Trilog am 29.01.2024**
- Zustimmung des EU-Parlaments am  
10.04.2024 und 8.10.2024  
(Corrigendum-Verfahren)
- **Zustimmung im Rat (Mitgliedstaaten)**  
am **5. November 2024**



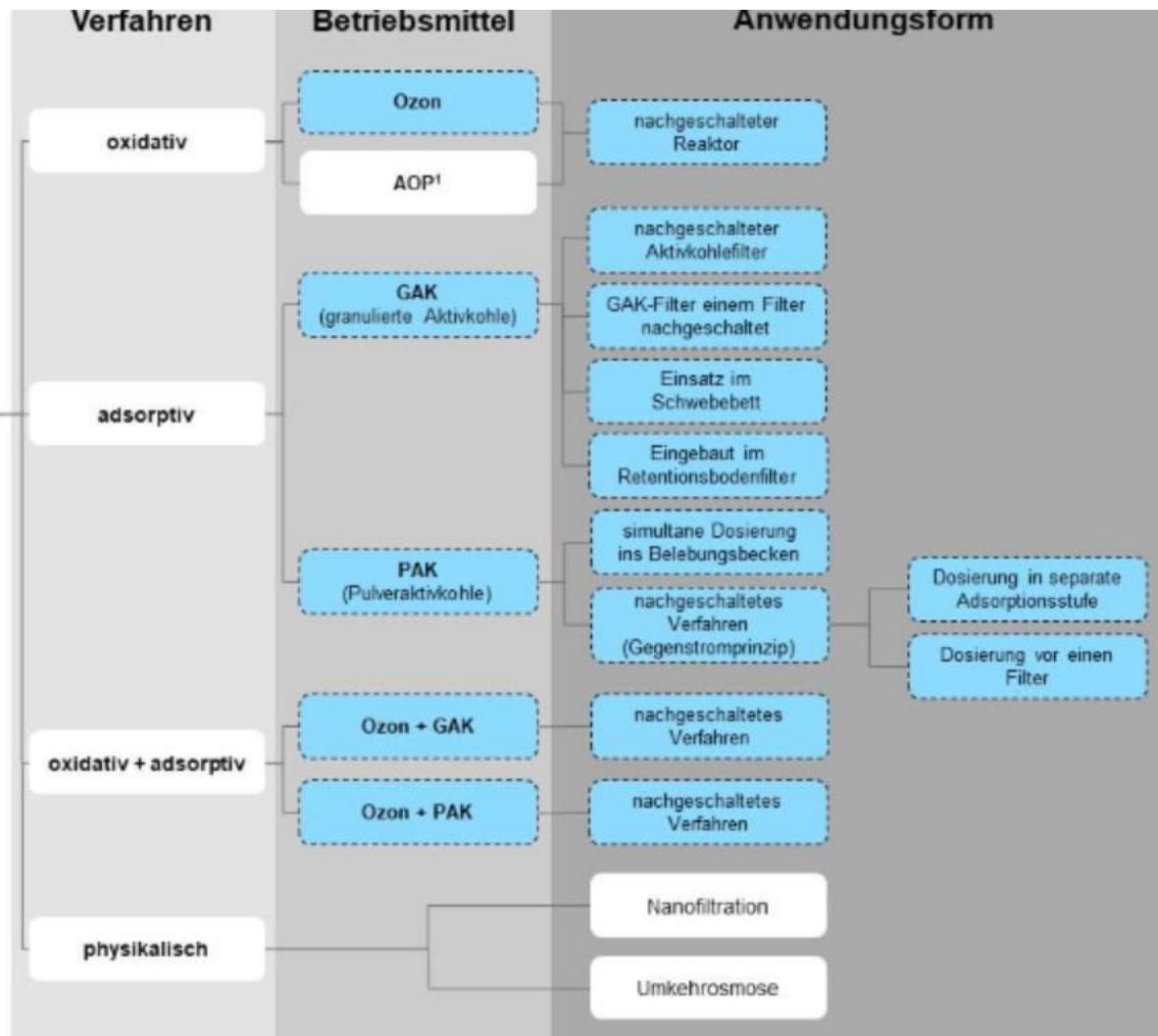
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser

- **Artikel 8 – 9 – 10: Einführung einer **vierten Reinigungsstufe** für Kläranlagen**
- **vierte Reinigungsstufe** für alle Kläranlagen > **150.000 EW** (obligatorisch)
- **Umsetzung:** bis 2033: 20 % bis 2039: 60 % bis 2045: 100 % der Anlagen
- **Stoffe:** Röntgenkontrastmittel, Diclofenac, Benzotriazole...
- erweiterte **Herstellerverantwortung:** nicht nur europäische oder deutsche Hersteller – also auch Importe aus Nicht-EU-Ländern (insbesondere Indien-China-USA-Kanada)

# 4. Reinigungsstufe

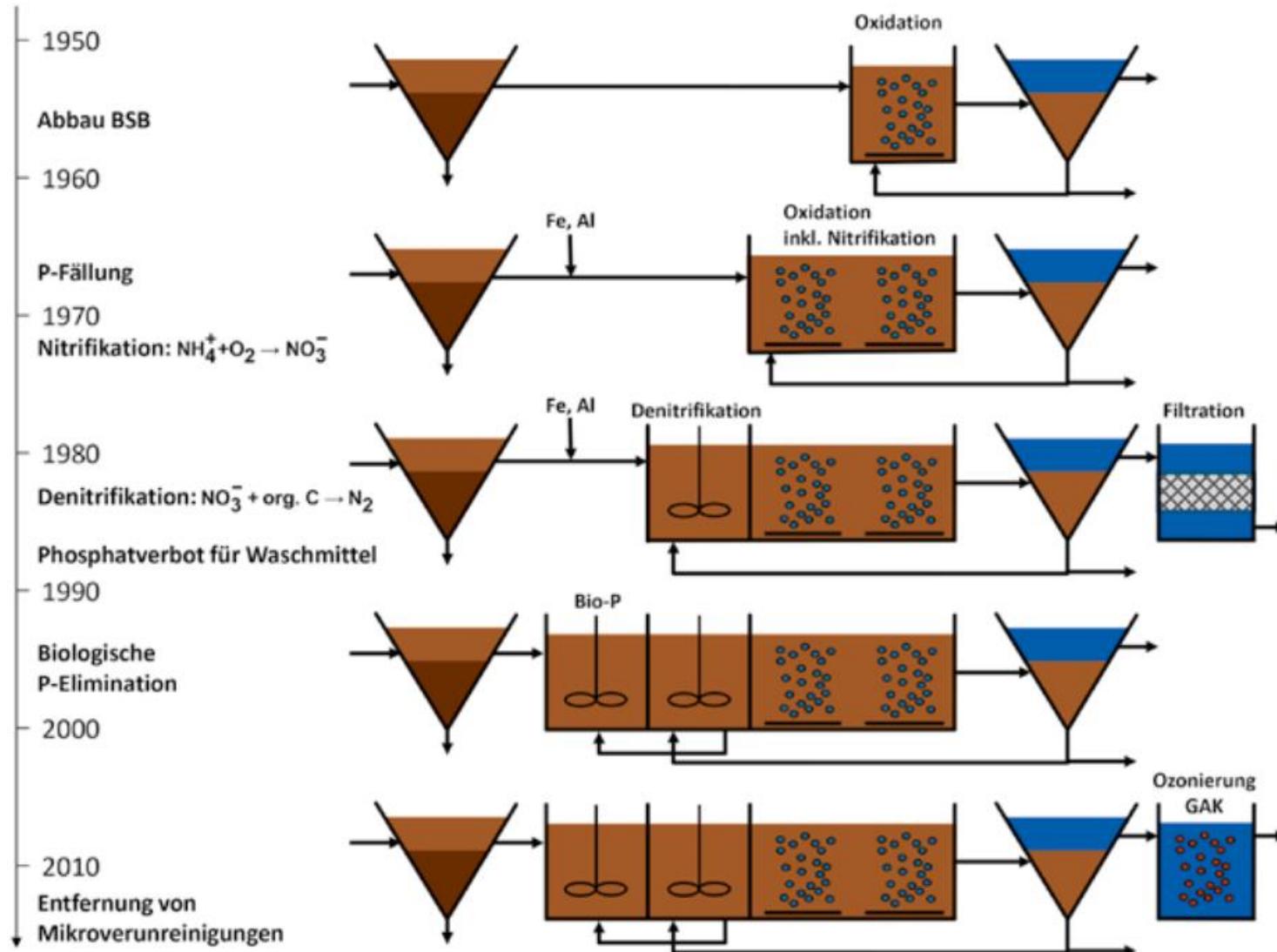
© Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg 2020  
Abbildung 2: Übersicht über verschiedene Verfahren der Spurenstoffelimination



Nach heutigen Kenntnisstand für den Einsatz zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen geeignet

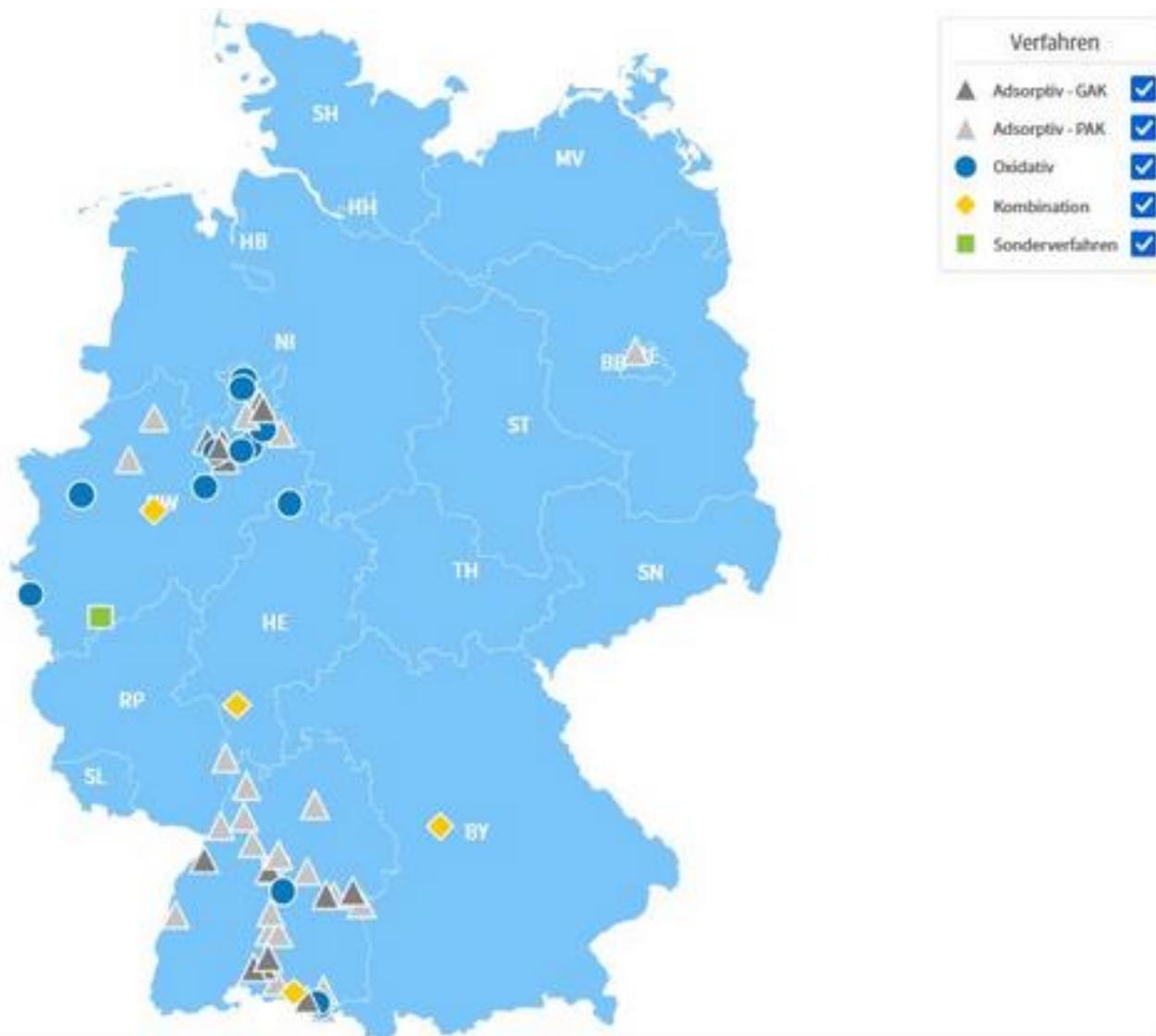
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser





# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



### Primary treatment<sup>a, b, c</sup>

Treatment of wastewater by a physical and/or chemical process involving settlement of suspended solids, or other process in which the BOD<sub>5</sub> of the incoming wastewater is reduced by at least 20 per cent before discharge and the total suspended solids of the incoming wastewater are reduced by at least 50 per cent.

### Secondary treatment<sup>a, b, c</sup>

Post-primary treatment of wastewater by a process generally involving biological treatment with a secondary settlement or other process, resulting in a Biochemical Oxygen Demand (BOD) removal of at least 70 per cent and a Chemical Oxygen Demand (COD) removal of at least 75 per cent. Natural biological treatment processes are also considered under secondary treatment if the constituents of the effluents from this type of treatment are similar to the conventional secondary treatment.

### Tertiary treatment<sup>a, b, c</sup>

Treatment (additional to secondary treatment) of nitrogen and/or phosphorous and/or any other pollutant affecting the quality or a specific use of water: microbiological pollution, colour etc. The different possible treatment efficiencies ("organic pollution removal" of at least 95 per cent for BOD<sub>5</sub> and 85 per cent for COD, "nitrogen removal" of at least 70 per cent, "phosphorous removal" of at least 80 per cent and "microbiological removal") cannot be added and are exclusive.

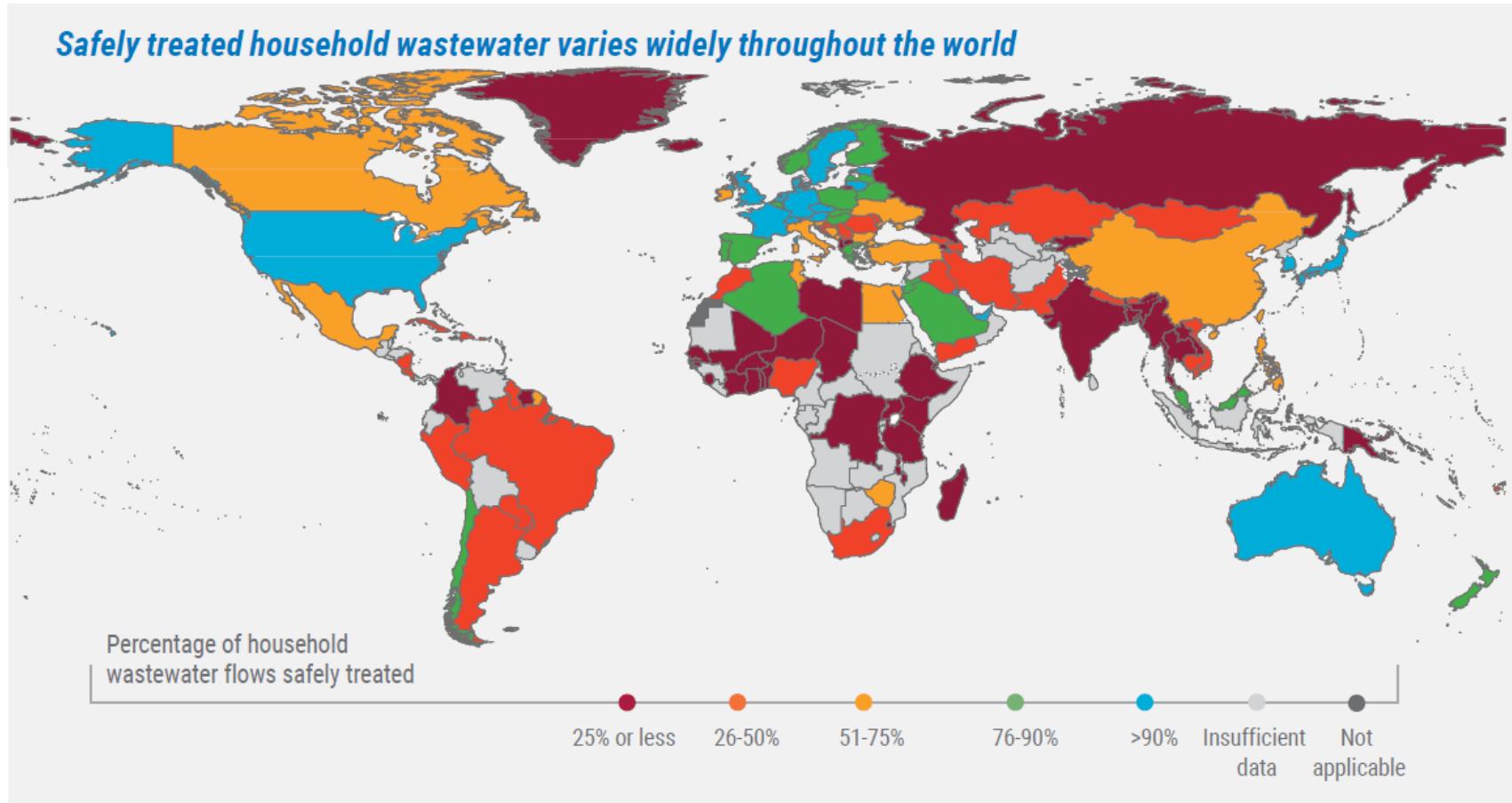
### Safely treated wastewater

Wastewater that has been treated and discharged in compliance with relevant standards, or has been treated by processes commensurate with secondary or higher treatment.

[United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) and World Health Organization (WHO), 2024]

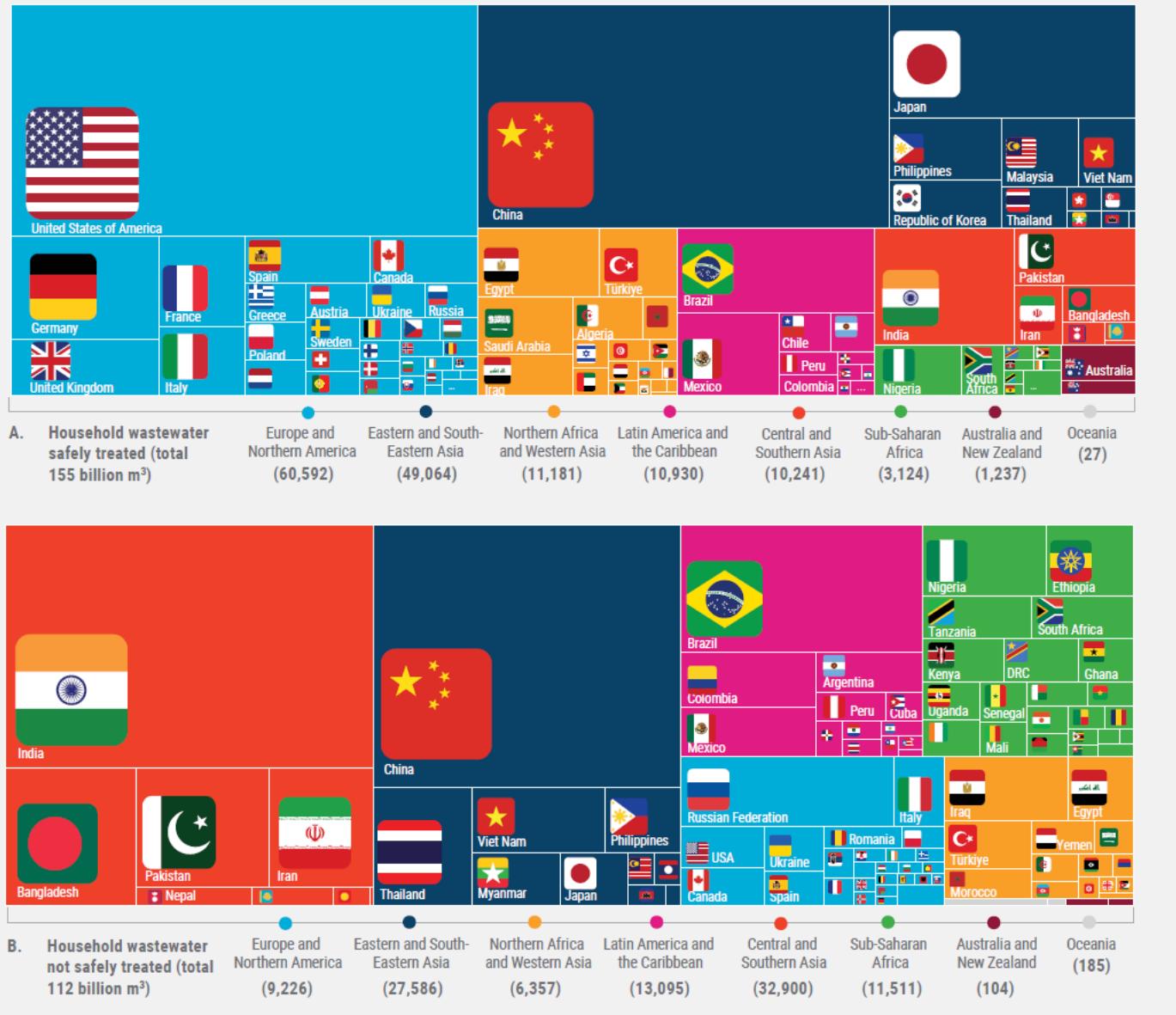
# Naturwissenschaftliche Grundlagen

## Umweltchemie - Abwasser



**Figure 28. Estimated proportions of household wastewater safely treated by country (2022).**

**The United States of America and China discharge a large fraction of the world's safely treated household wastewater, while India, China and Brazil are the largest contributors of flows that have not been safely treated**

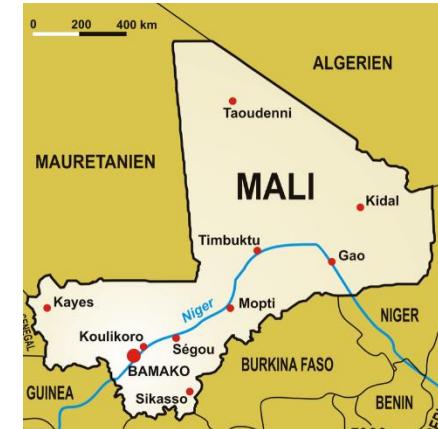


hoher Standard  
Abwasserreinigung

keine sichere  
Abwasserreinigung

# Beispiele

## Mali



COUNTRY	Total household wastewater generated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of household wastewater generated – Sewers (%)	Proportion of household wastewater generated – Septic Tanks (%)	Proportion of household wastewater generated – All other sanitation (%)	Total household wastewater delivered to treatment (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of septic tank household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of household wastewater delivered to treatment (%)	Total household wastewater safely treated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater safely treated (%)	Proportion of septic tank household wastewater safely treated (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2022 (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2020 (%)
Mali	403.888	3.4%	13.8%	82.8%	40.970	100.0%	48.7%	10.1%	24.726	50.0%	31.9%	6.1%	

## 2022:

- Ableitung überwiegend in anderen Systemen (ca. 83 %) als in „septic tanks“ oder Kanalisation
- ca. 6 % des Abwassers „safely treated“

# Beispiele

## Indien



Figure 9. Example of greywater management  
(Government of India, 2021).

COUNTRY	Total household wastewater generated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of household wastewater generated – Sewers (%)	Proportion of household wastewater generated – Septic Tanks (%)	Proportion of household wastewater generated – All other sanitation (%)	Total household wastewater delivered to treatment (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of septic tank household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of household wastewater delivered to treatment (%)	Total household wastewater safely treated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater safely treated (%)	Proportion of septic tank household wastewater safely treated (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2022 (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2020 (%)
India	26,414.320	12.2%	37.6%	50.2%	6,084.415	46.4%	46.2%	23.0%	5,471.707	28.0%	46.0%	20.7%	26.6%

### 2022:

- geringer Anteil Ableitung in Kanalisation (ca. 12 %)
- ca. 21 % des Abwassers „safely treated“
- Verschlechterung zu 2020 (ca. 27 %)

# Beispiele

## Chile



COUNTRY	Total household wastewater generated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of household wastewater generated – Sewers (%)	Proportion of household wastewater generated – Septic Tanks (%)	Proportion of household wastewater generated – All other sanitation (%)	Total household wastewater delivered to treatment (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of septic tank household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of household wastewater delivered to treatment (%)	Total household wastewater safely treated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater safely treated (%)	Proportion of septic tank household wastewater safely treated (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2022 (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2020 (%)
Chile	756.481	89.0%	9.3%	1.6%	708.574	100.0%	50.0%	93.7%	674.030	95.0%	48.8%	89.1%	90.5%

## 2022:

- Ableitung zu ca. 90 % in Kanalisation
- ca. 89 % des Abwassers „safely treated“

# Beispiele

## Singapore



COUNTRY	Total household wastewater generated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of household wastewater generated – Sewers (%)	Proportion of household wastewater generated – Septic Tanks (%)	Proportion of household wastewater generated – All other sanitation (%)	Total household wastewater delivered to treatment (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of septic tank household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of household wastewater delivered to treatment (%)	Total household wastewater safely treated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater safely treated (%)	Proportion of septic tank household wastewater safely treated (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2022 (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2020 (%)
Singapore	268.715	100.0%	0.0%	0.0%	268.715	100.0%	NA	100.0%	268.715	100.0%	NA	100.0%	100.0%

2022:

- Ableitung zu 100 % in Kanalisation
- 100 % des Abwassers „safely treated“

# Beispiele

## Deutschland



COUNTRY	Total household wastewater generated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of household wastewater generated – Sewers (%)	Proportion of household wastewater generated – Septic Tanks (%)	Proportion of household wastewater generated – All other sanitation (%)	Total household wastewater delivered to treatment (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of septic tank household wastewater delivered to treatment (%)	Proportion of household wastewater delivered to treatment (%)	Total household wastewater safely treated (million m <sup>3</sup> )	Proportion of sewer household wastewater safely treated (%)	Proportion of septic tank household wastewater safely treated (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2022 (%)	Proportion of household wastewater safely treated 2020 (%)
Germany	5,121.590	96.0%	3.4%	0.6%	5,073.830	100.0%	89.9%	99.1%	5,068.409	99.9%	89.9%	99.0%	99.3%

2022:

- Ableitung zu 96 % in Kanalisation
- 99 % des Abwassers „safely treated“