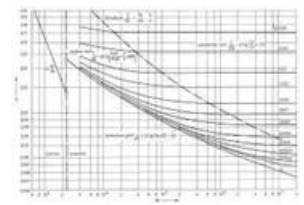
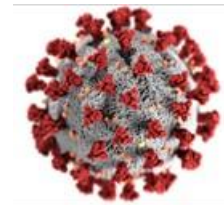
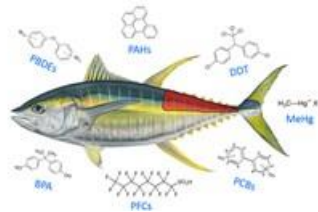
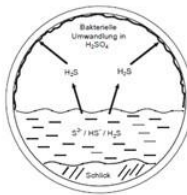
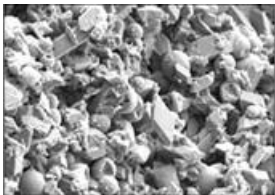


Bachelor Infrastruktur

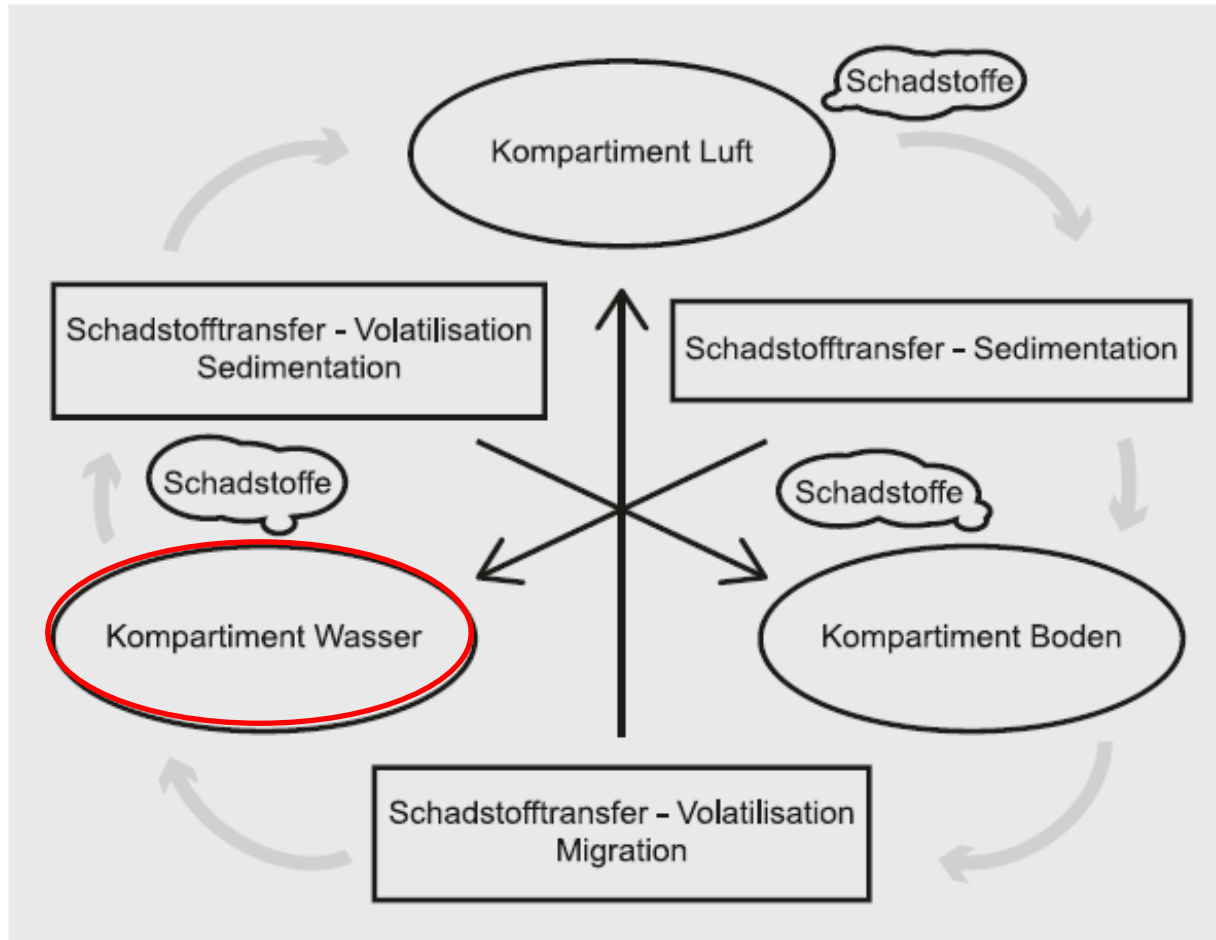
Vorlesung und Übung: Naturwissenschaftliche Grundlagen 2.5 Umweltchemie, Umweltbiologie, Abwasser

Prof. Dr. Welker, Frankfurt University of Applied Sciences



Naturwissenschaftliche Grundlagen

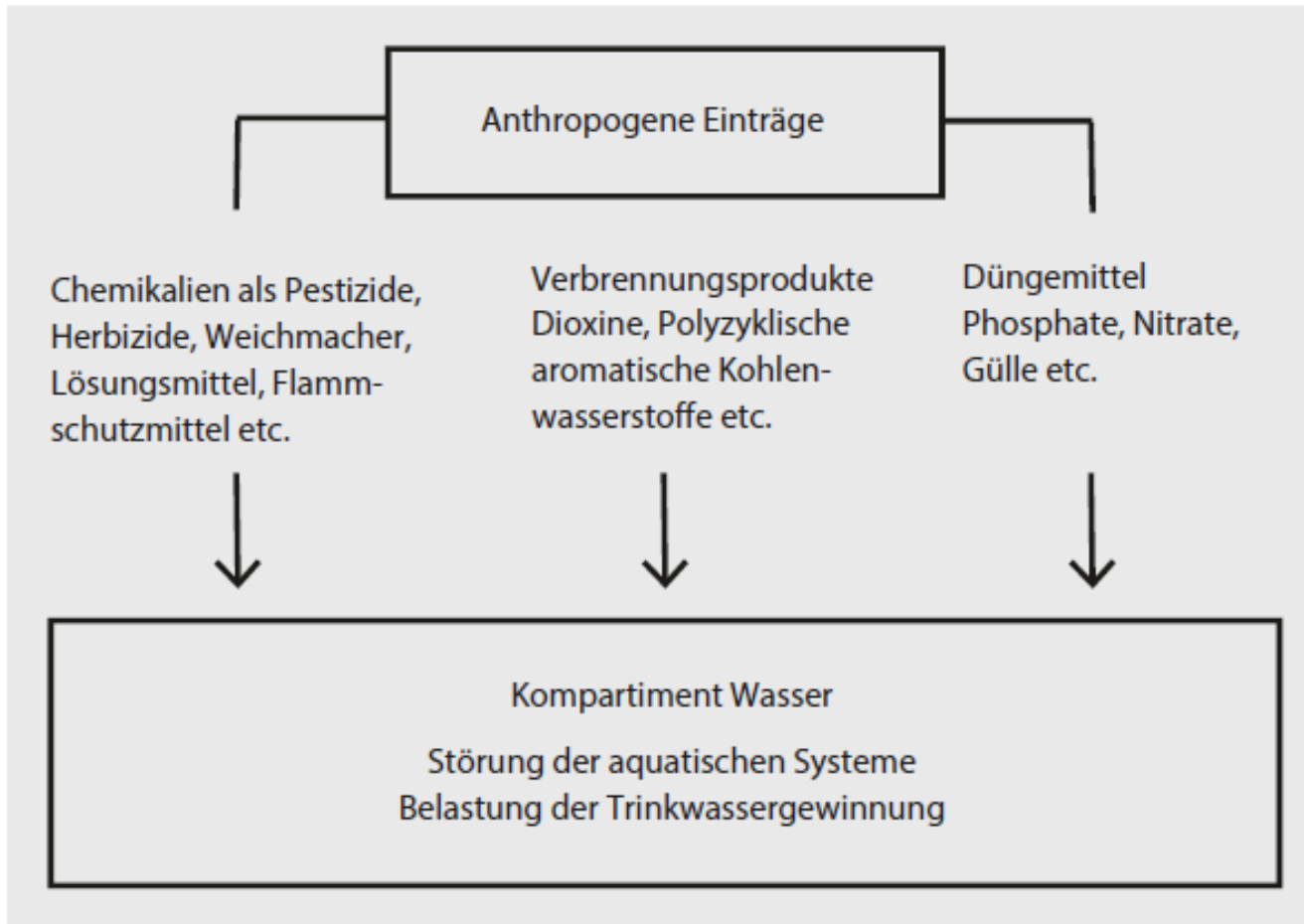
Umweltchemie, Transferprozesse



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

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie, anthropogene Stoffeinträge

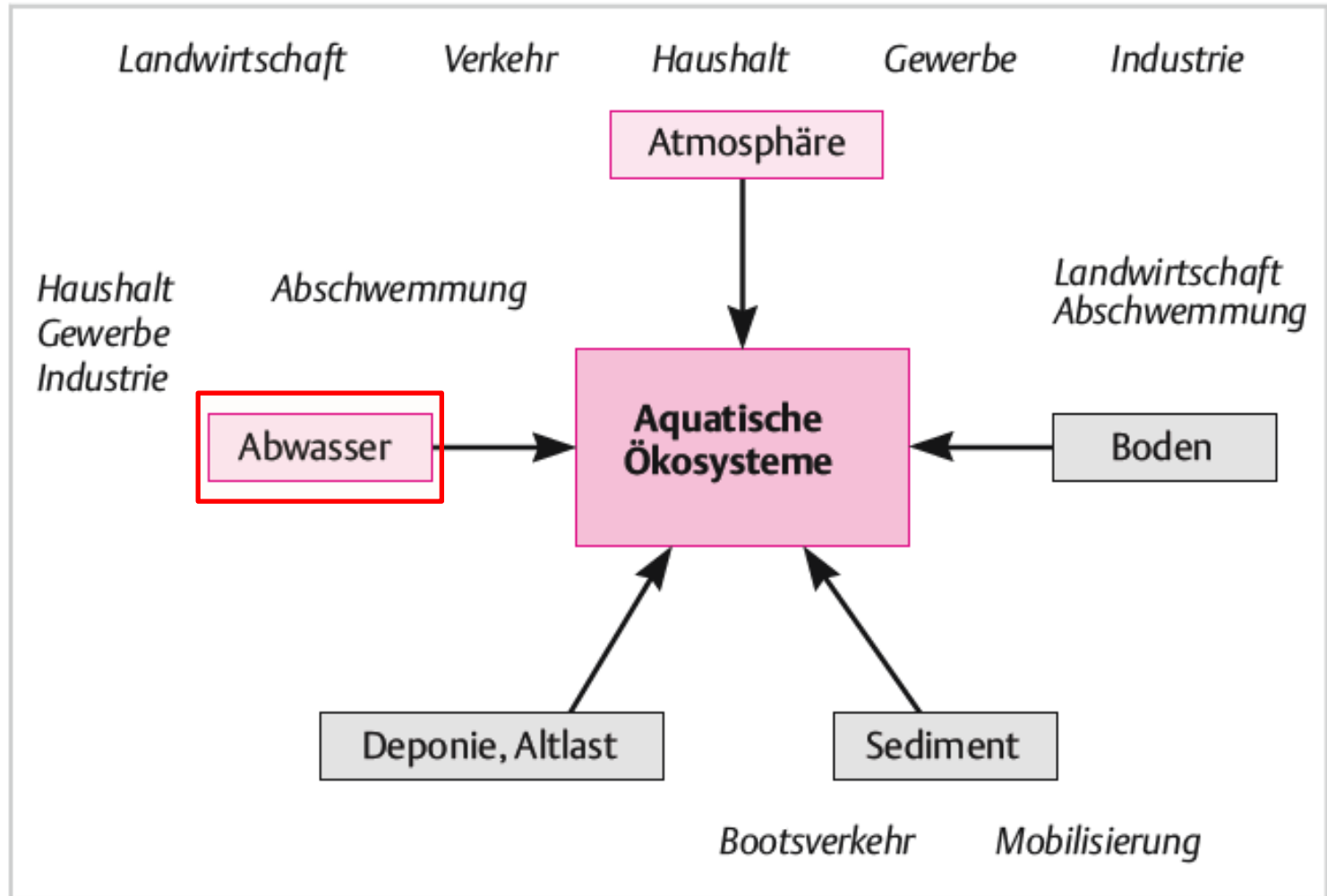


Abwasser-Systeme
Trinkwasser-Systeme

■ 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

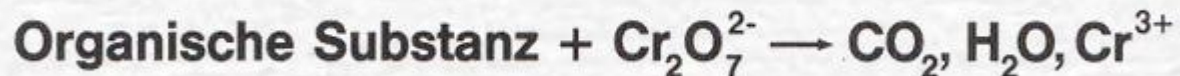
Umweltchemie - Abwasser

CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf)

- organische Kohlenstoffverbindungen (Zehrstoffe: Sauerstoff)
→ **Übermaß** im Gewässer führt zu **Sauerstoffmangel**
- Sauerstoffmenge [mg O₂/l] zur chemische Oxidation von **allen organischen Verbindungen**
- Labormethode mit starken Oxidationsmitteln (Kaliumdichromat)
- Verbrauch Kaliumdichromat wird quantitativ erfasst

Redoxreaktion:

Organische Verbindungen werden durch Kaliumdichromat oxidiert zu CO₂ und Wasser, Cr (VII) wird dabei verbraucht und reduziert zu Cr (III)



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



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

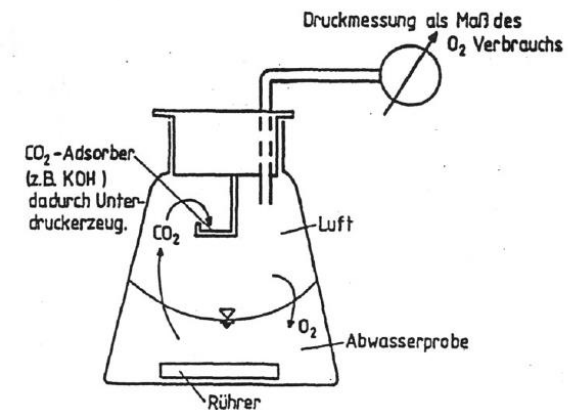
- **BSB₅ (Biologischer Sauerstoffbedarf)**

- Zucker
- Fette
- Proteine



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

- **Sauerstoffmenge** [mg O₂/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 NH_4^+** führt zu **fischtoxischem Ammoniak NH_3**



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



[Spiegel online]

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

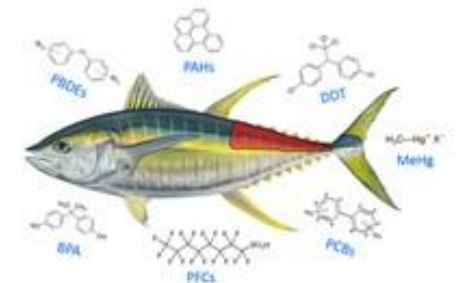
■ Personal Care Products

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



■ Arzneimittel

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

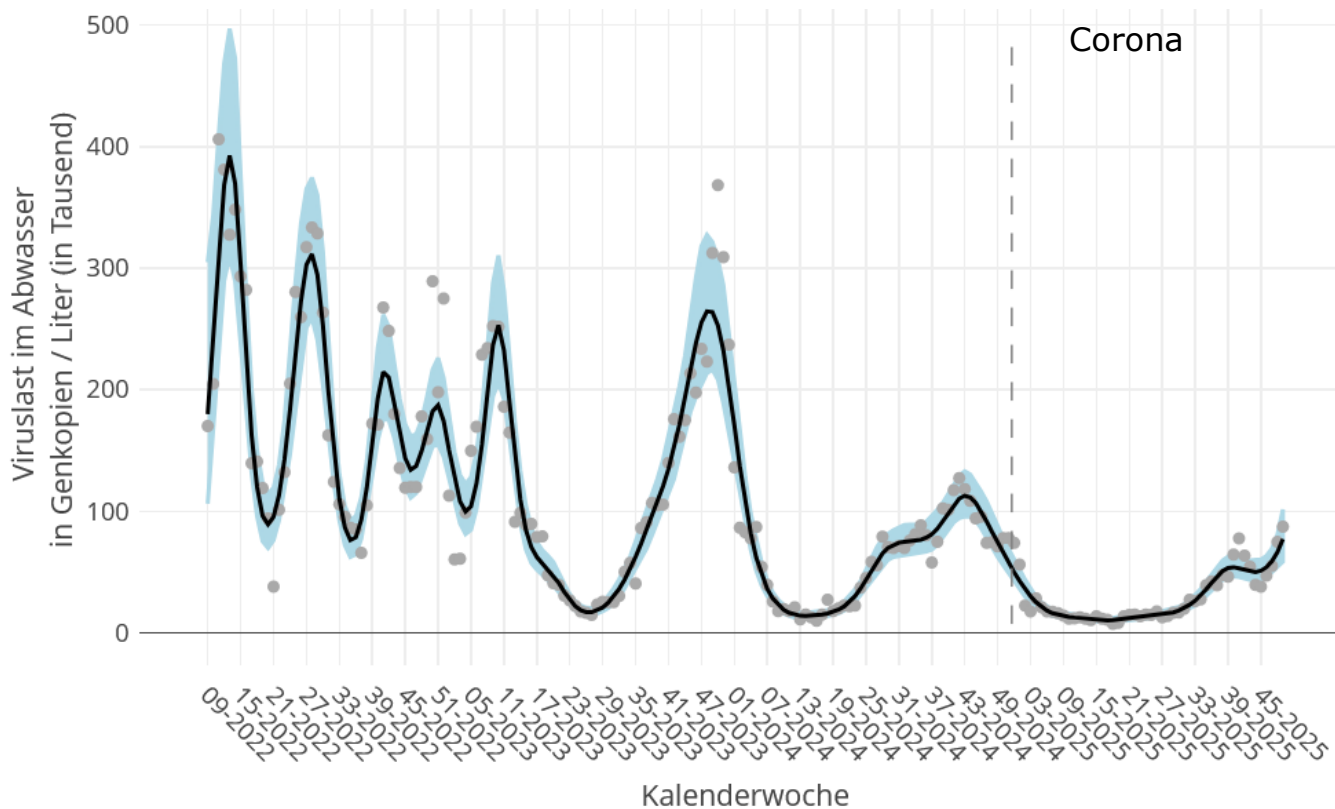


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

■ Keime

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



2023-2024: ca. 170
Kläranlagen

2025: ca. 50
Kläranlagen (ca. 25
% der Bevölkerung)

[Robert Koch-Institut, 2025]

Naturwissenschaftliche Grundlagen

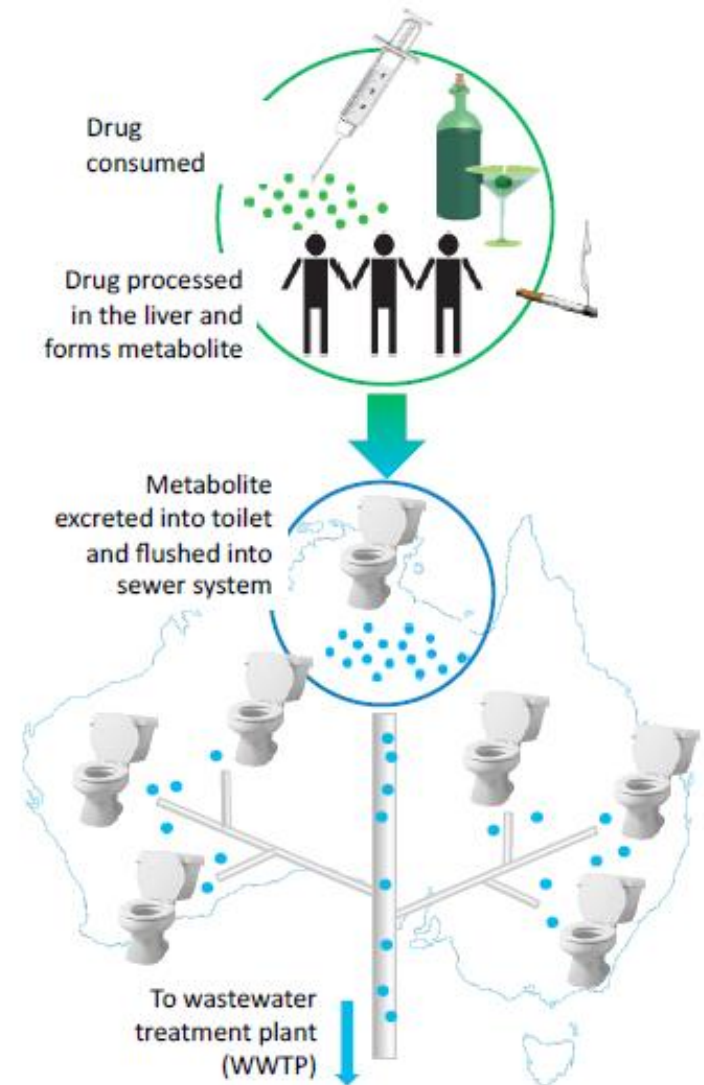
Umweltchemie - Abwasser

- **andere**

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

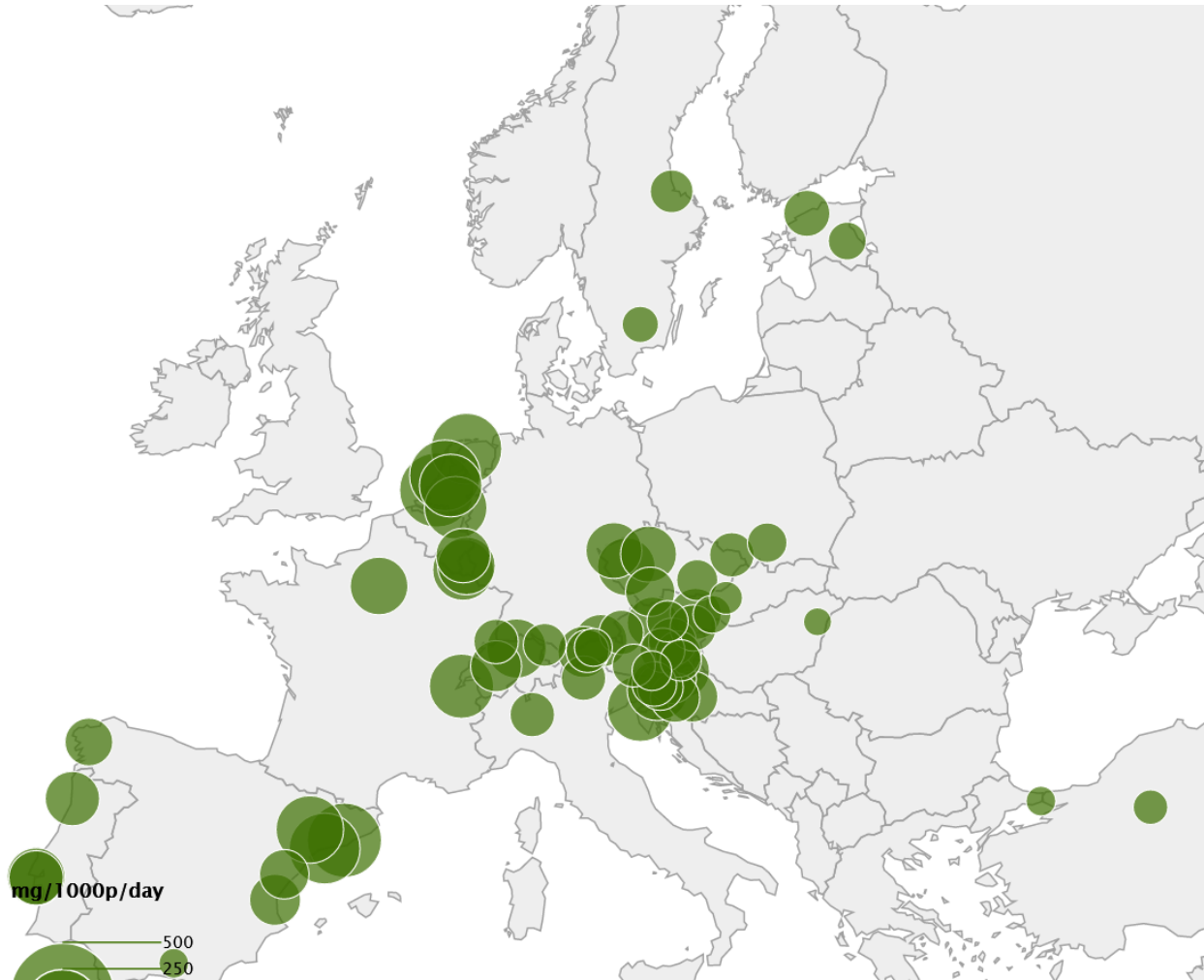
- **Drogen**

- 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)

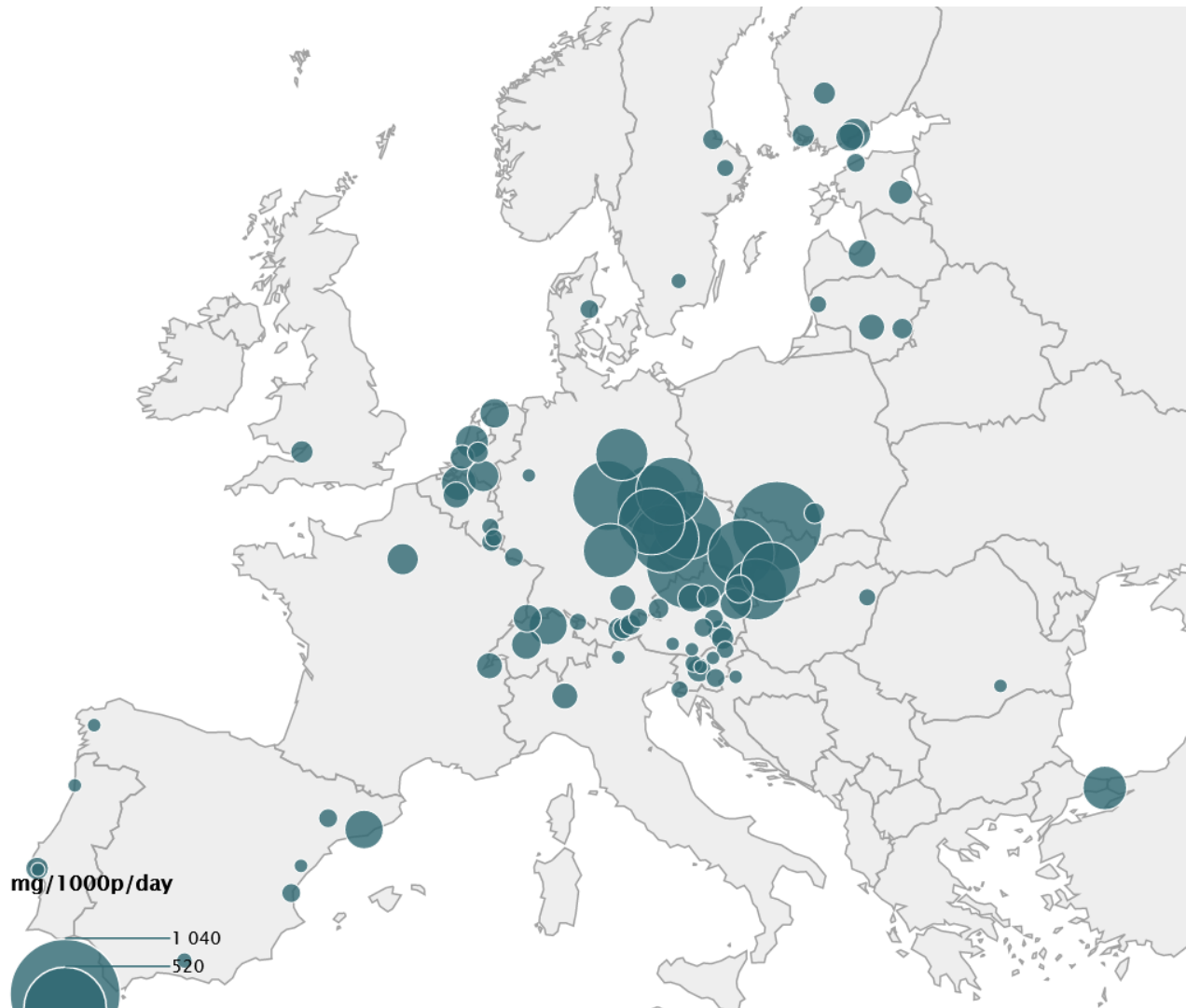
8 % der
Erwachsenen
konsumiert
Cannabis

Wochenendspitze

https://www.emcdda.europa.eu/publications/html/pods/waste-water-analysis_en

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



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

Schwerpunkte in
Tschechien, Slowakei,
Ostdeutschland

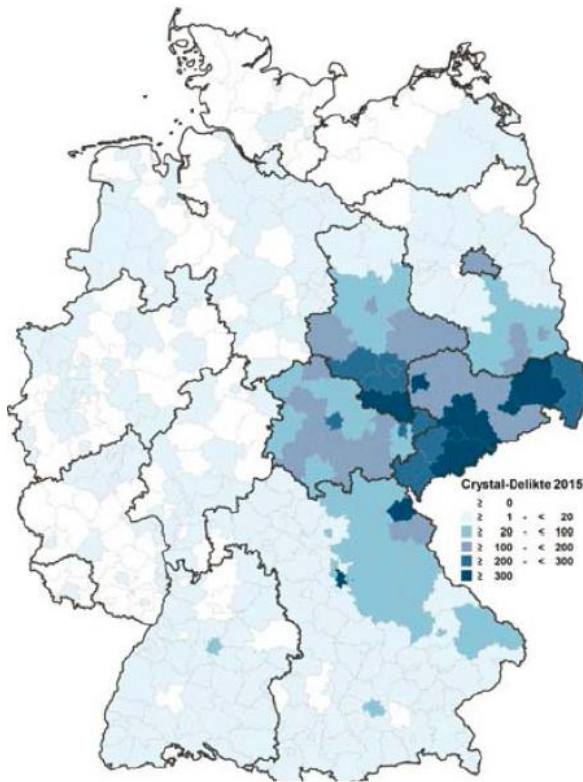
**keine
Wochenendsspitze!**

https://www.emcdda.europa.eu/publications/ntmi/pods/waste-water-analysis_en

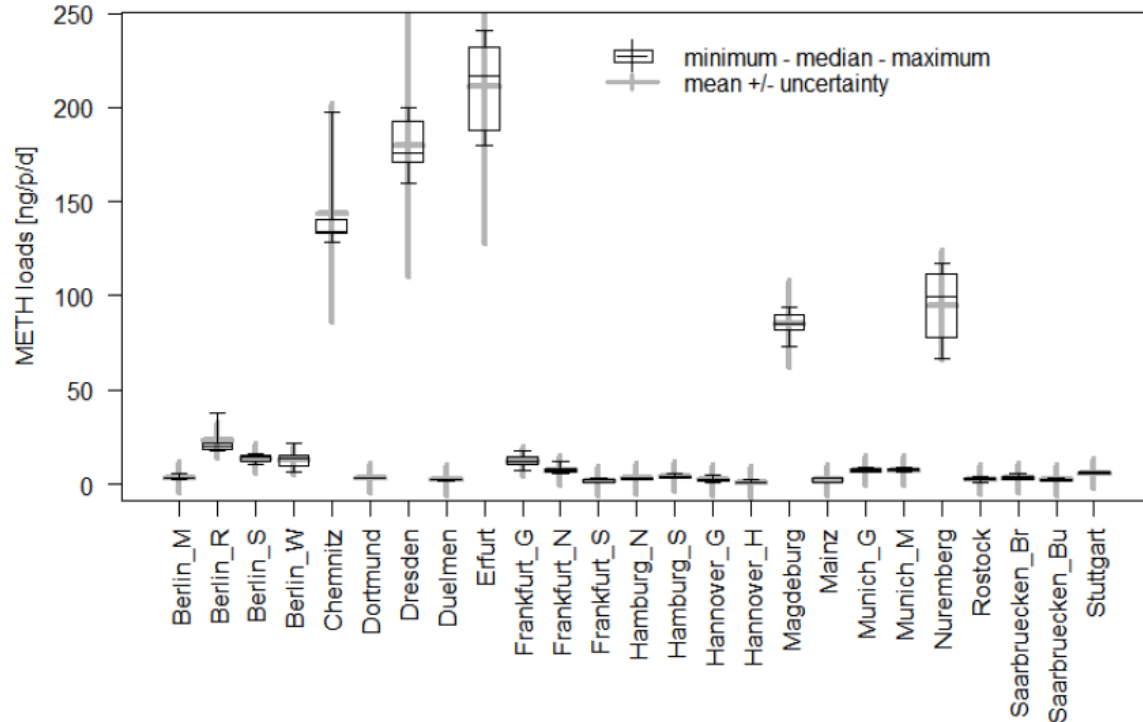
Naturwissenschaftliche Grundlagen

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)...) [Burckhardt, 2008]
- **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

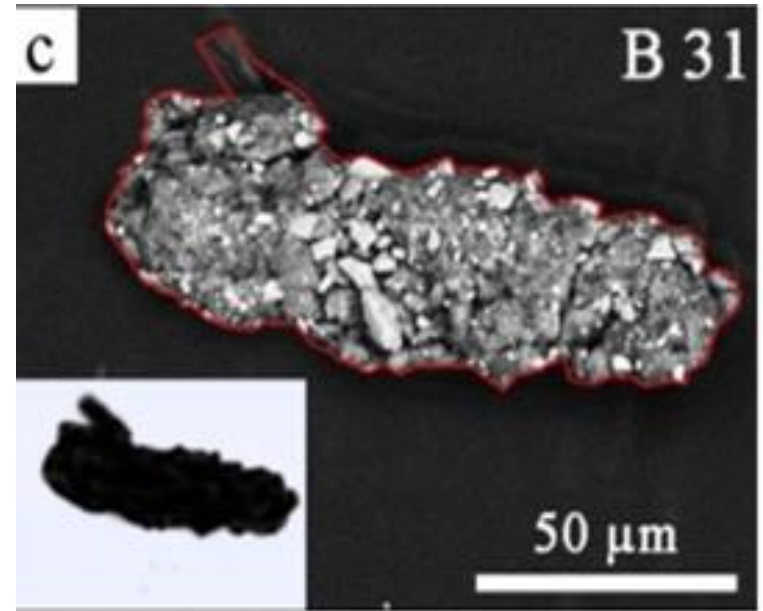


[Burckhardt, 2008]



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

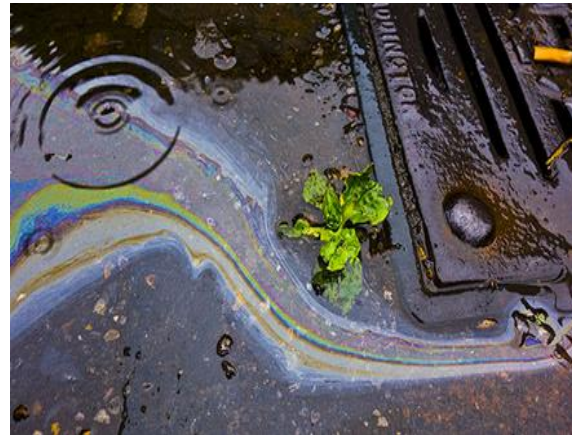


[Sommer et al., 2008]

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

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



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



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

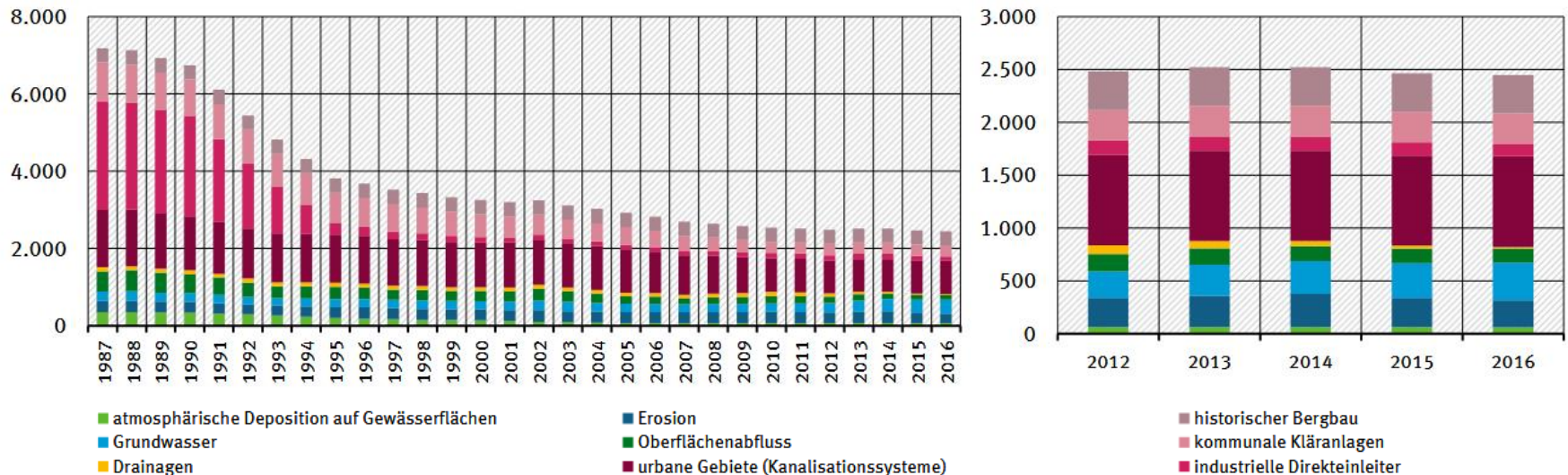


Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser:

- **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



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser :

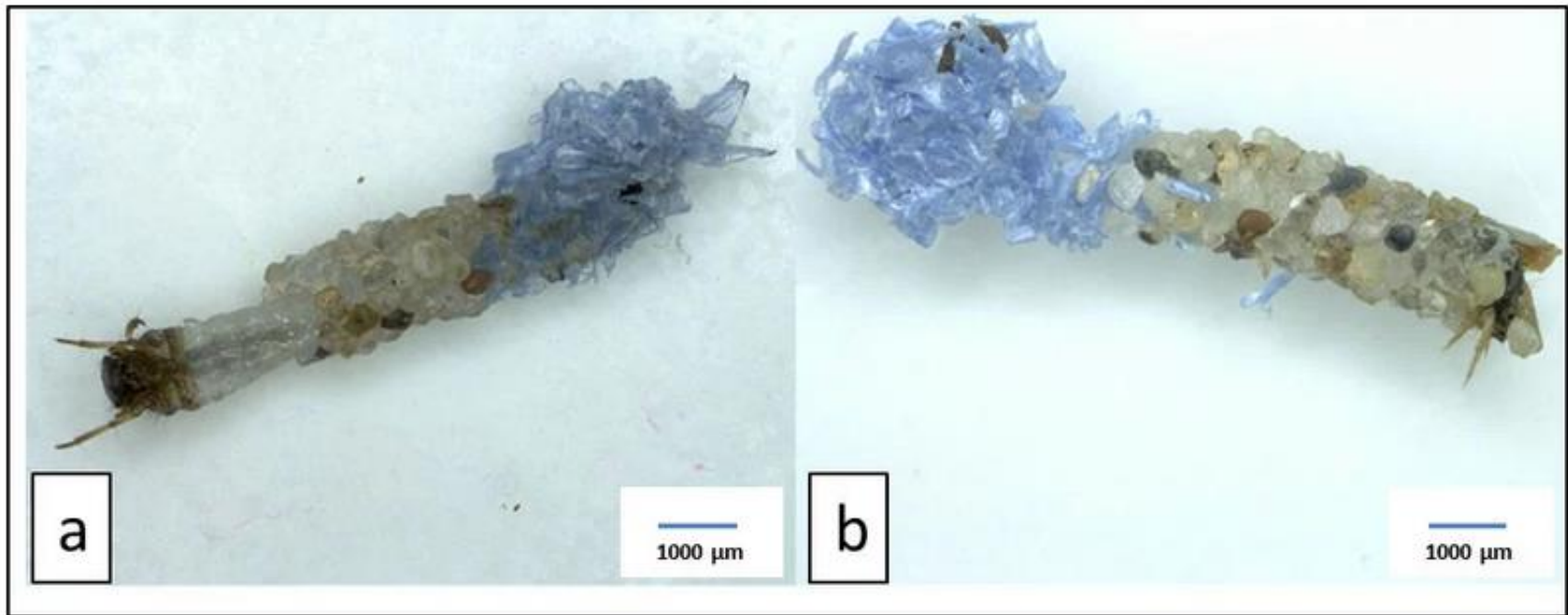
- **Mikroplastik** und Reifeninhaltsstoffe (Chinon: Ursache für Lachssterben)



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“)

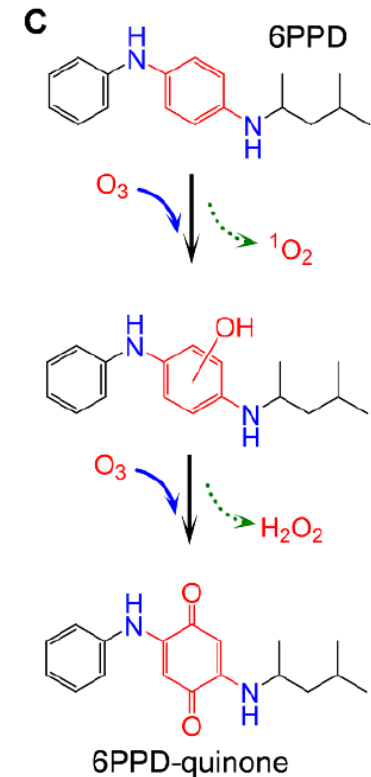


[Hürlimann et al., 2011]

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

LC50 (letale concentration): $0,8 \pm 0,16 \mu\text{g/l}$
versus $< 0,3 - 19 \mu\text{g/l}$ Aufkommen in
Straßenabflüssen

→ **Minimierung Emissionen Reifenabrieb wichtig!**



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

Aufkommen Stoffe Niederschlagswasser:

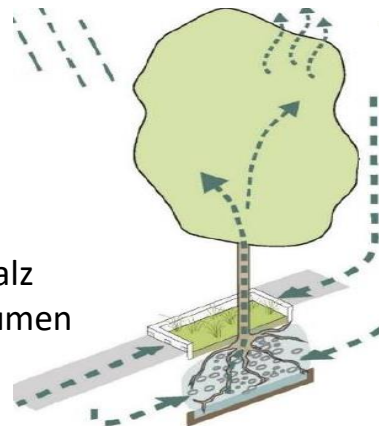
- **Pestizide/ Biozide**
 - Algizide Fassaden
 - Wurzelschutz Dachbahnen
- **Nikotin**
- **Streusalz**



Algenbewuchs durch Spritzwasser (© OST)



[Burkhardt, 2024]



Chlorid aus Streusalz
→ **Schäden** an Bäumen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

Zielkompartiment

Schmutzwasser/Niederschlagswasser

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

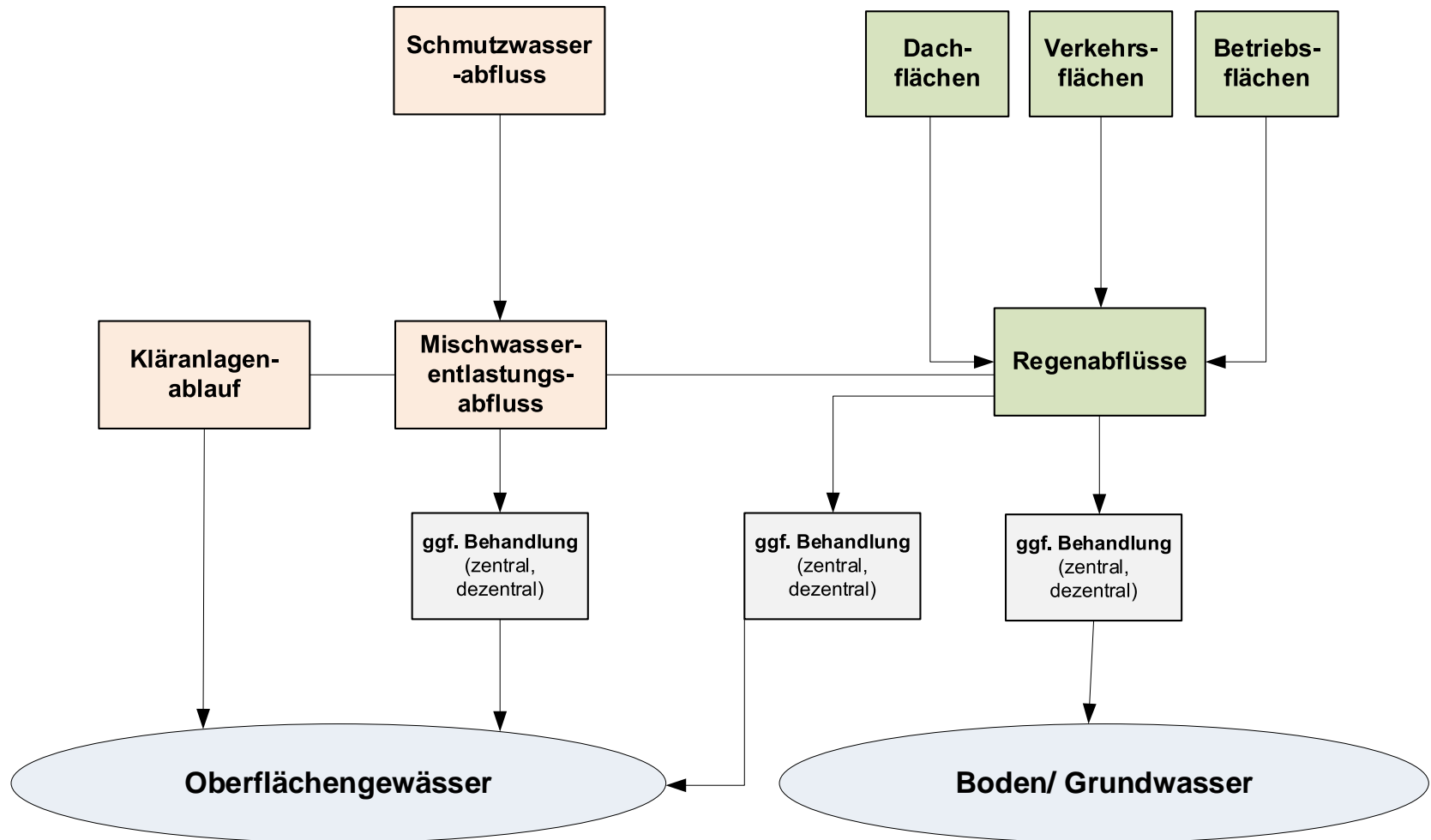
Zielorganismen:

- **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



[Dierkes, 2023]

Vorgaben Abwasser und Niederschlagswasser

■ Kommunales Abwasser:

- 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]

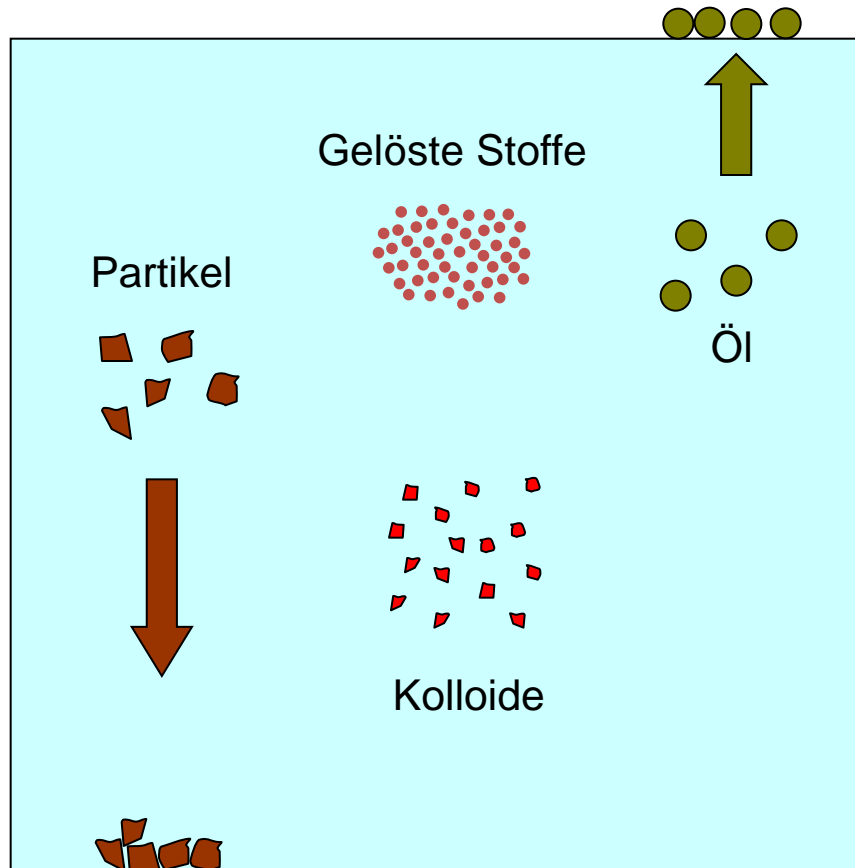
Naturwissenschaftliche Grundlagen

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**
 - **Dichtentrennung** (Schwimmen und Sinken)
→ **Absetzbecken** mit **Tauchwand**

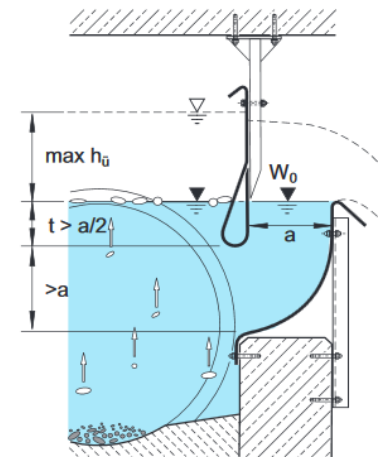
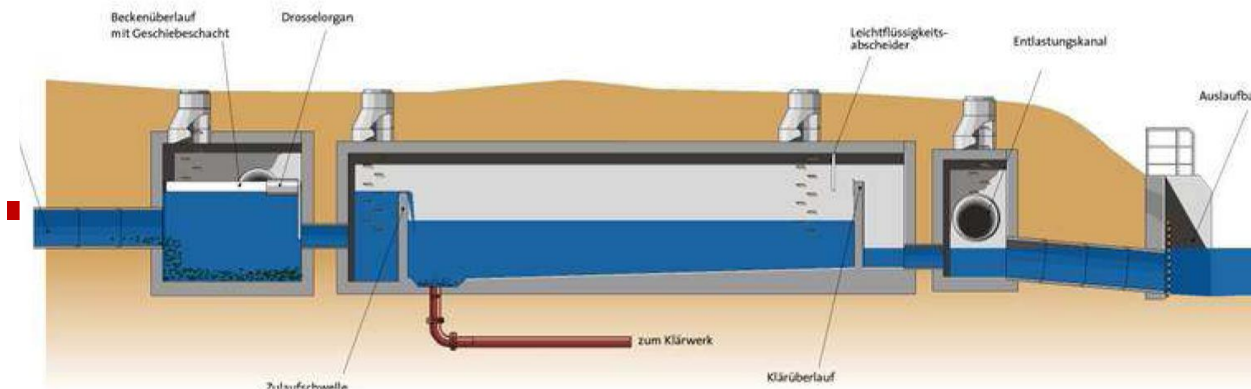


Bild 1: Anordnung auf der Schwelle

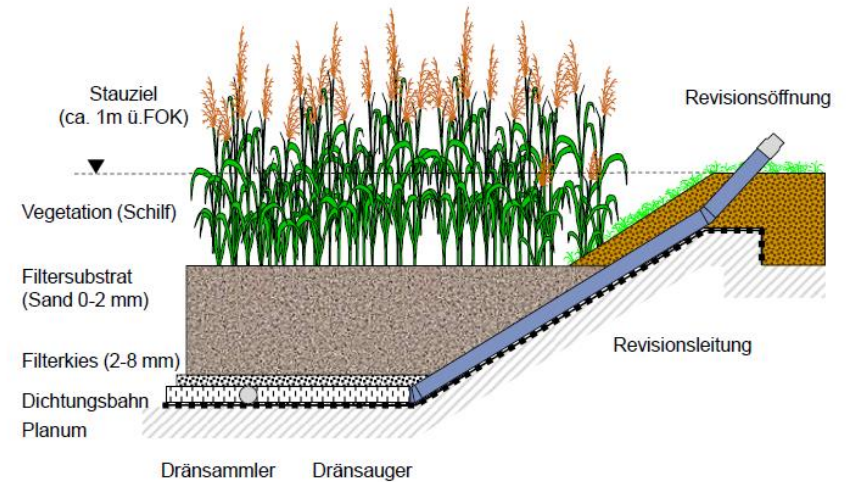
Naturwissenschaftliche Grundlagen

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 NH_4^+ , Nitrat NO_3^- ...)**
 - Biologische **Phosphorelimination (org. P, o-P...)**



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

Ziel: Reduktion von sauerstoffzehrenden
Kohlenstoffparametern (BSB, CSB)

Grund:
Sauerstoffmangel im Gewässer verringern



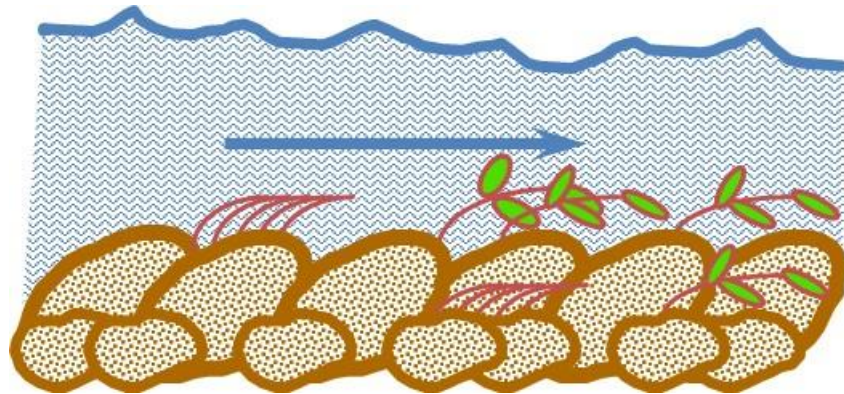
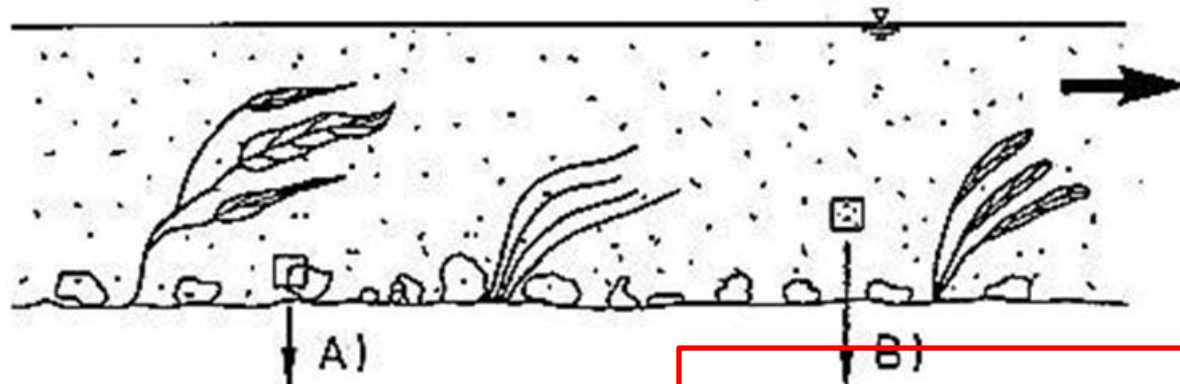
Ziel: Reduktion von **Nährstoffen** (Stickstoff, Phosphor)

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



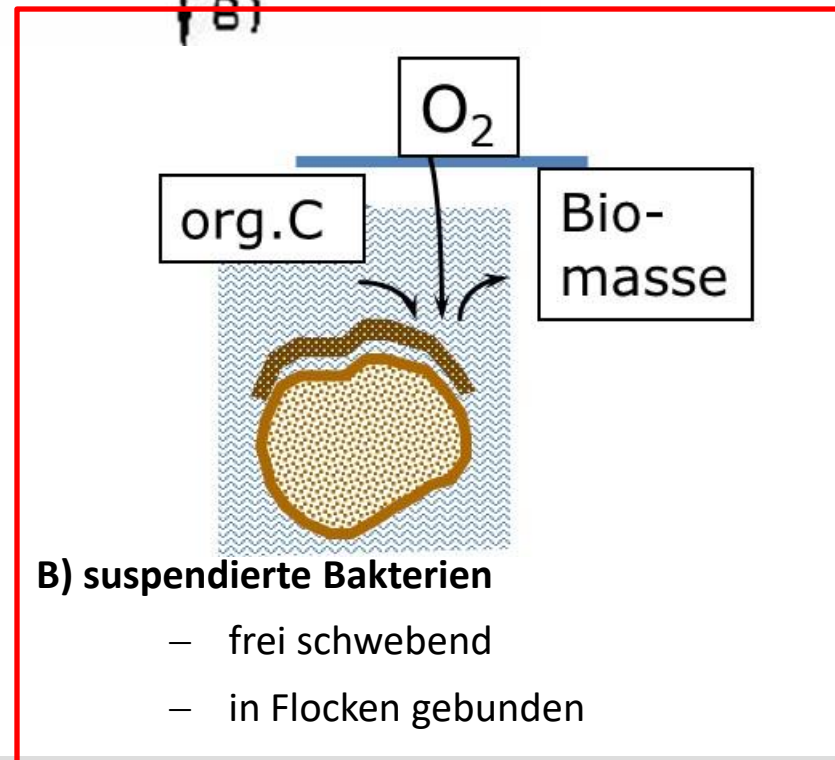
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



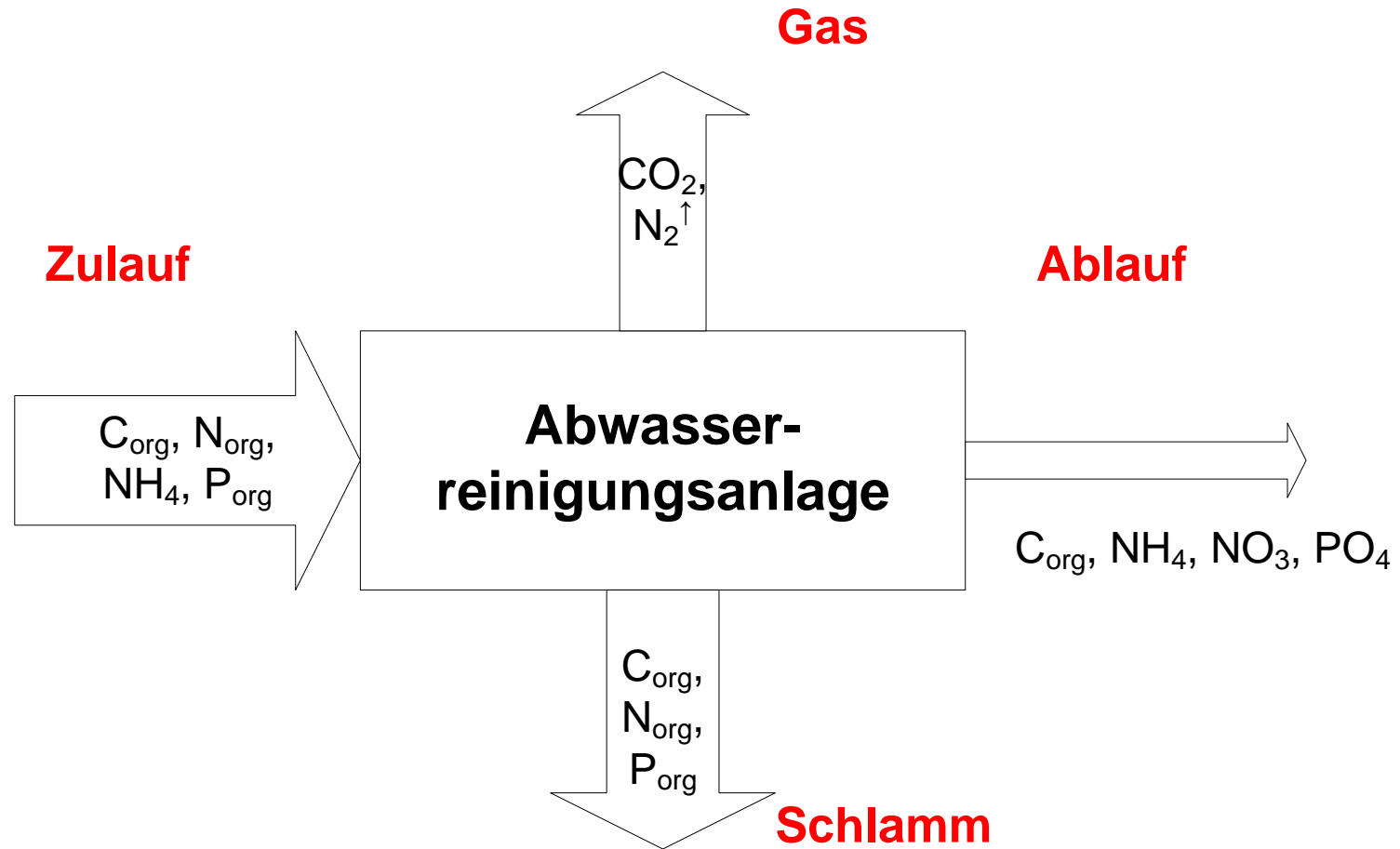
A) fest sitzende Bakterien

- an der Bodenoberfläche
- als Biofilm, z.B. an Steinen



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

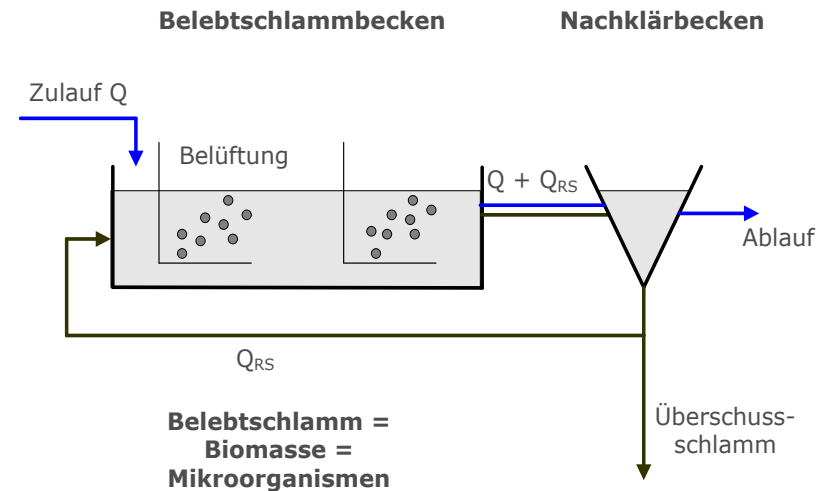


Naturwissenschaftliche Grundlagen

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

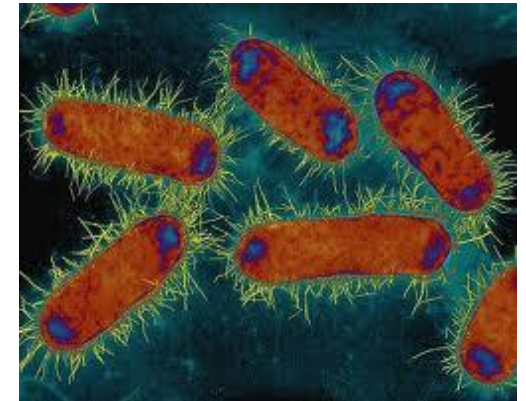
Umweltchemie - Abwasser

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

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie

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



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ Grundbausteine

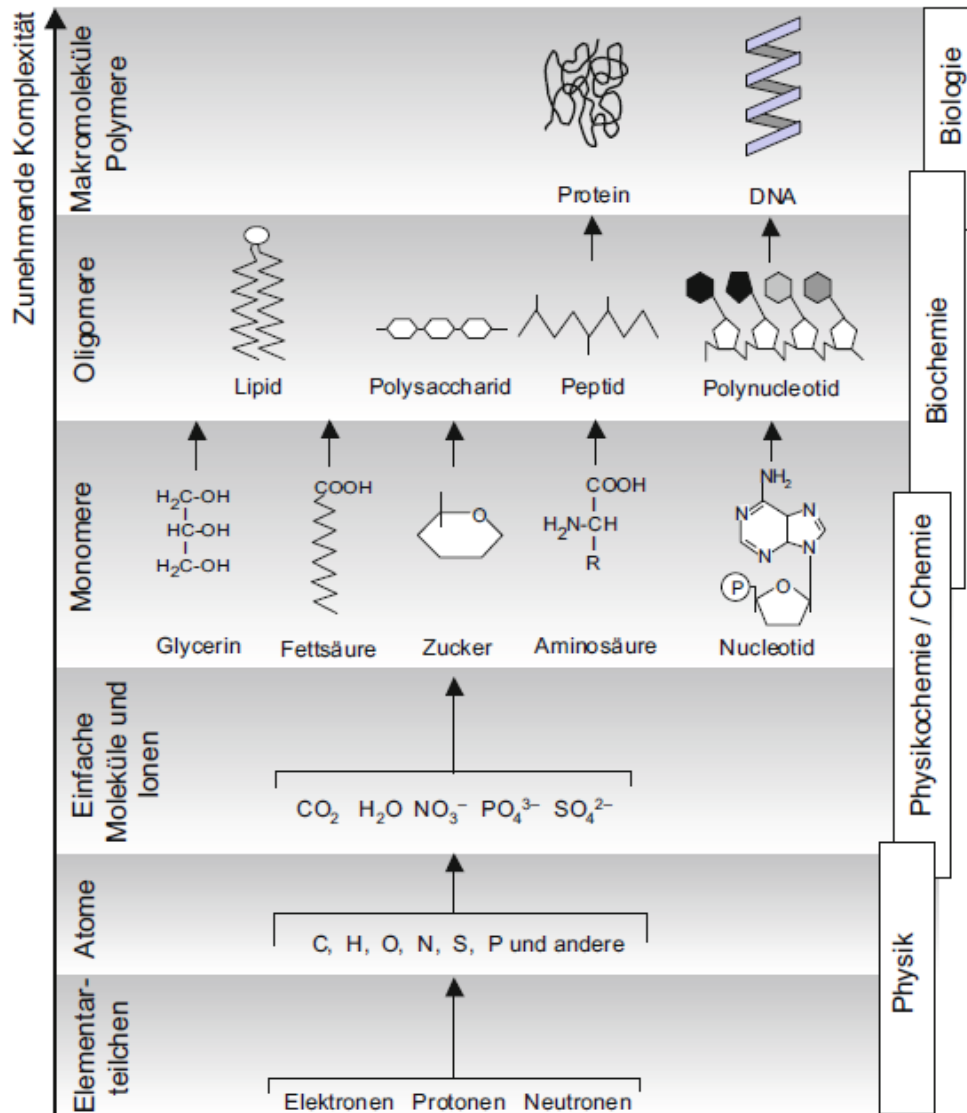


Abb. 1.4 Aufbau organischer Strukturen aus ihren Grundbausteinen und Zuständigkeit der einzelnen Naturwissenschaften

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ Zelle

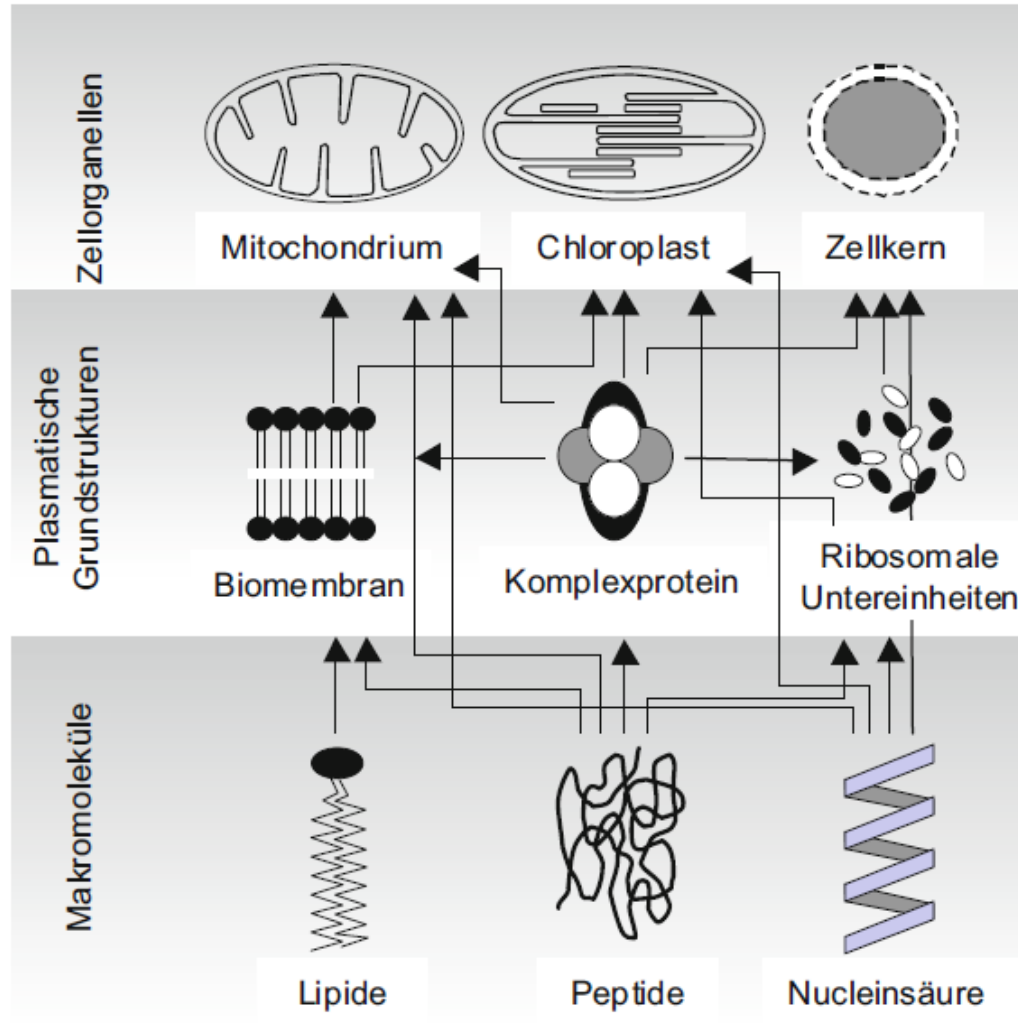
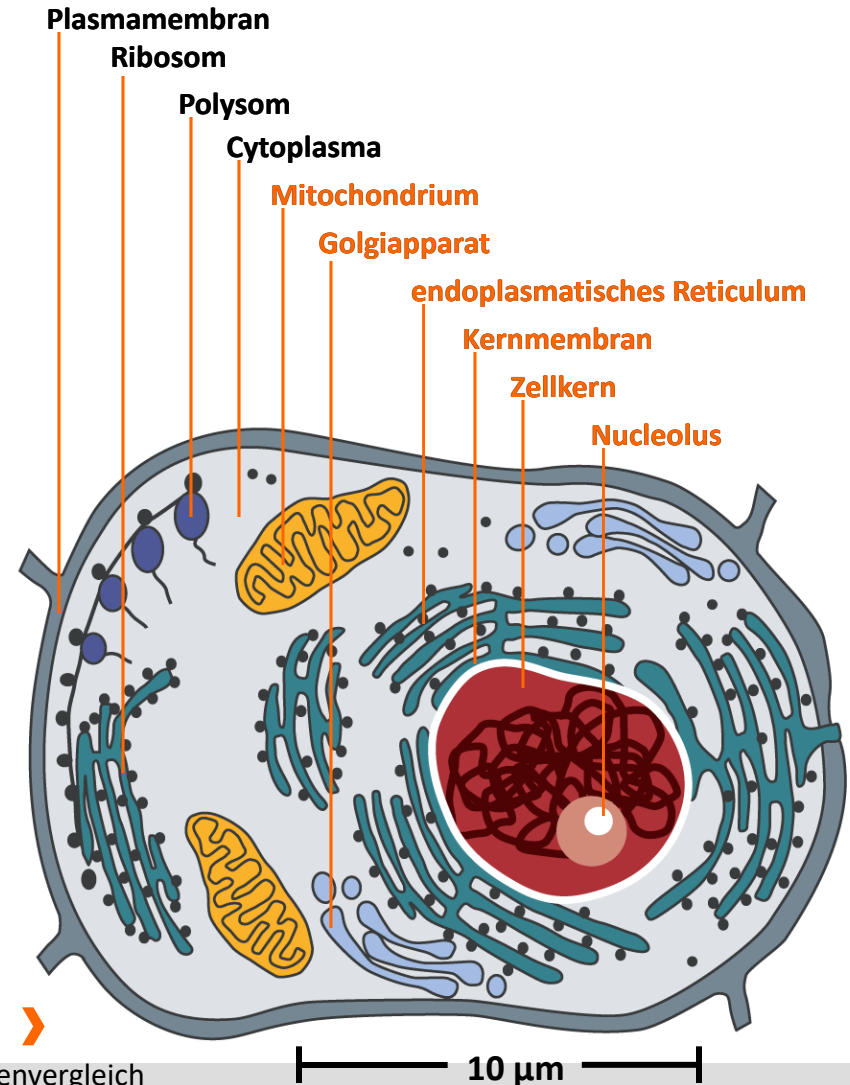
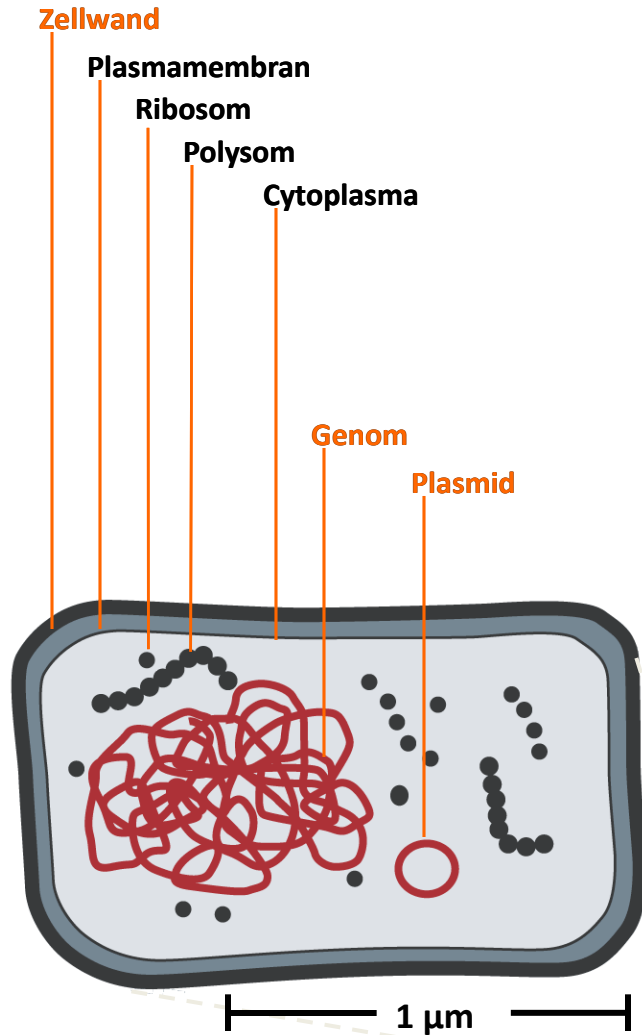


Abb. 1.1 Strukturhierarchie in der Zelle: Biomakromoleküle und Organellen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

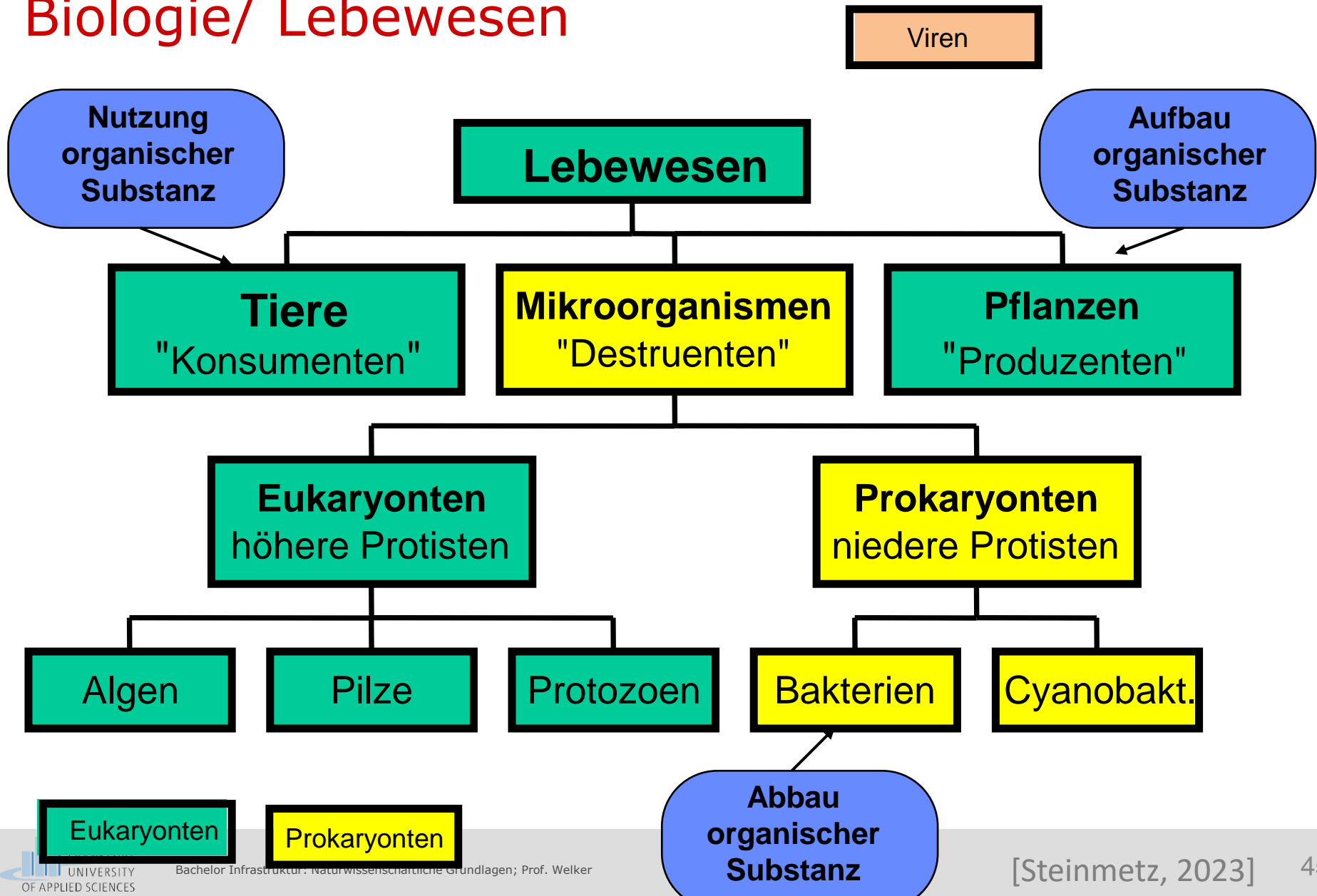
Biologie/ Bakterienzelle versus Tierzelle



die Zellen im Größenvergleich

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 CO_2)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ Metabolismus

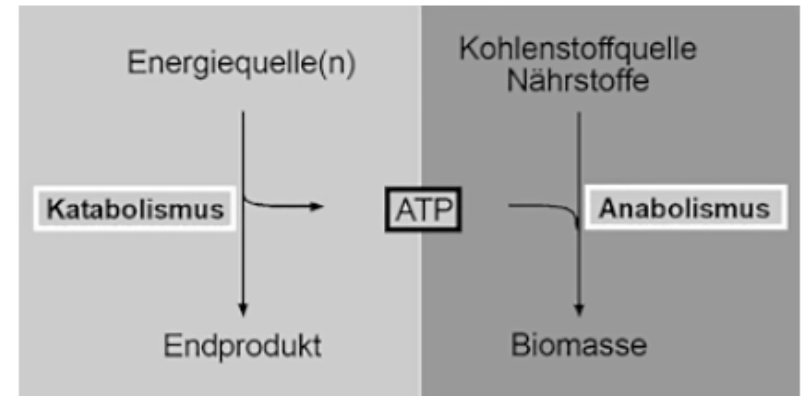
Metabolismus = Stoffwechsel
(Umsetzung der energiereichen Stoffe)

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)

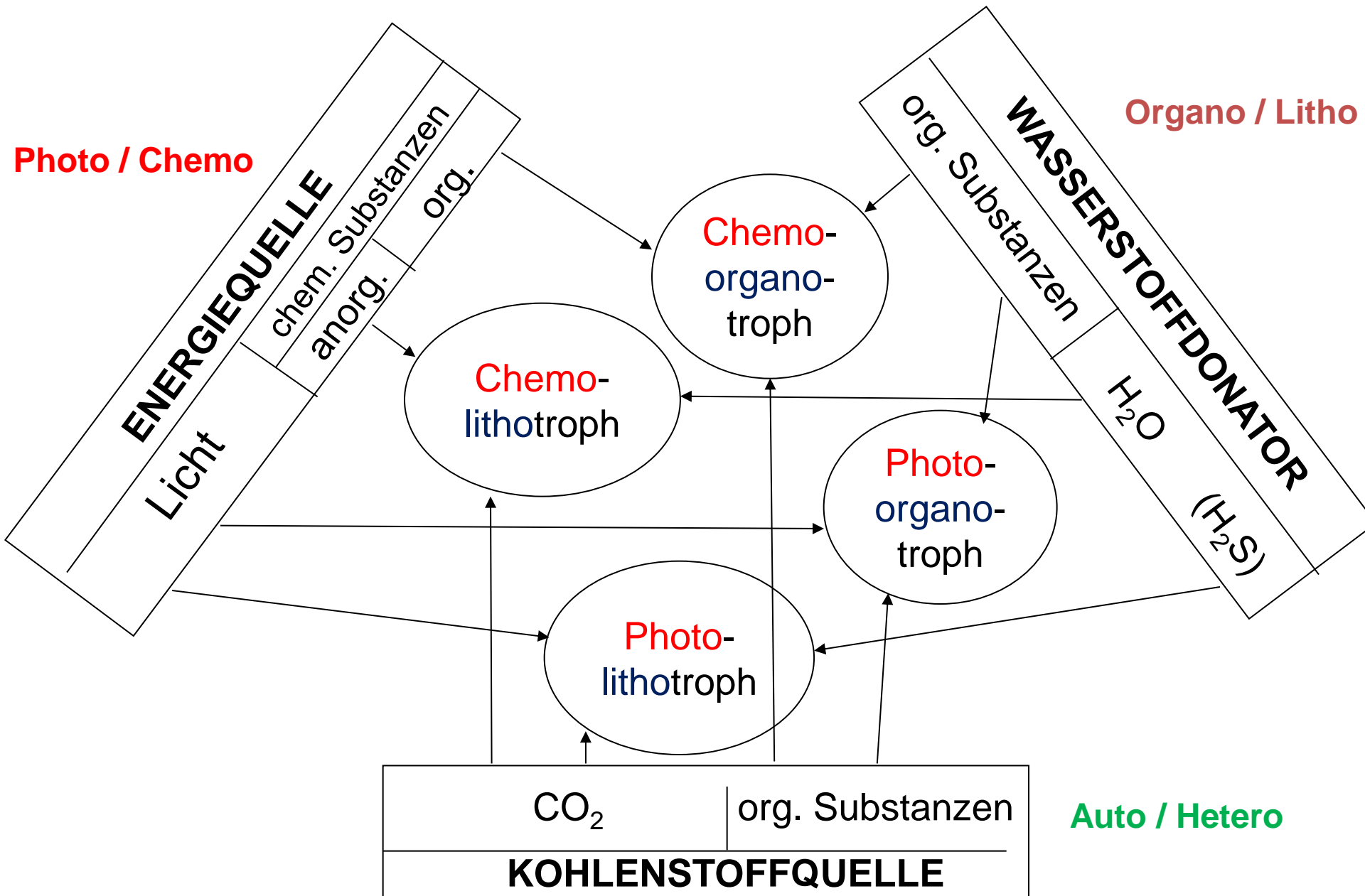


■ Abb. 3.1 Zusammenhang von Energiegewinnung und Biomassebildung. Die Kohlenstoffquelle ist in vielen Fällen identisch mit einer der Energiequellen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

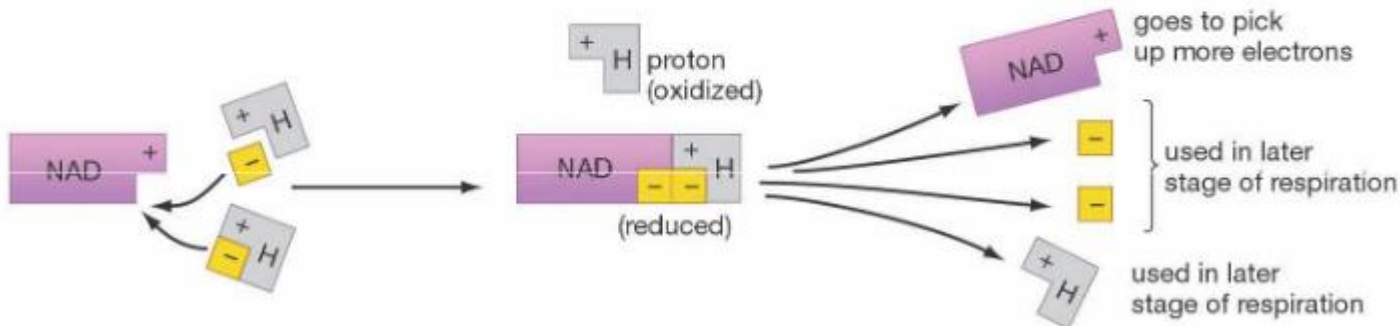
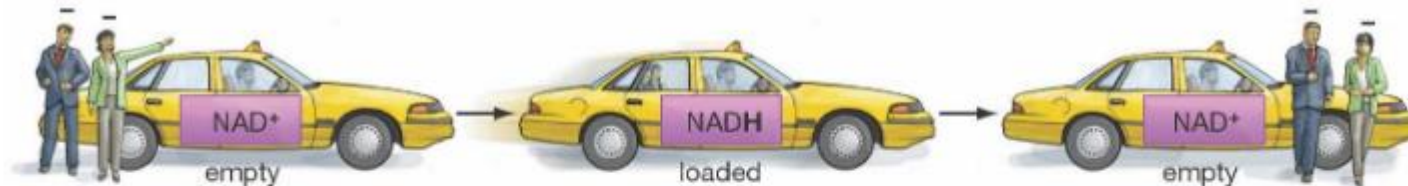
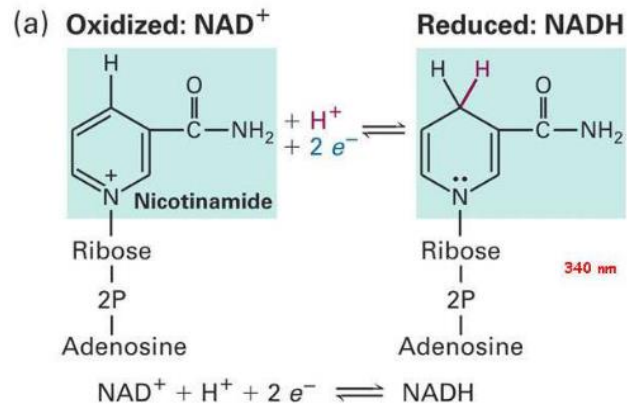
Biologie/ Ernährungstypen

Energie-, Wasserstoff- Kohlenstoffquelle	Ernährungstyp
Energiequelle <ul style="list-style-type: none"> ➤ Strahlung (Licht) ➤ chemische Umsetzungen 	<p>phototroph</p> <p>chemotroph</p>
Wasserstoff- oder Elektronendonator <ul style="list-style-type: none"> ➤ reduzierte anorganische Verbindungen (z.B. NH_4^+, NO_2^-, H_2, S^{2-}, Fe^{2+}) ➤ organische Verbindungen 	<p>lithotroph</p> <p>organotroph</p>
Kohlenstoffquelle: Aufbau der Biomasse <ul style="list-style-type: none"> ➤ Kohlendioxid CO_2 als Hauptquelle ➤ organische Kohlenstoff-Verbindungen 	<p>autotroph „selbst“</p> <p>heterotroph „fremd“</p>



Naturwissenschaftliche Grundlagen

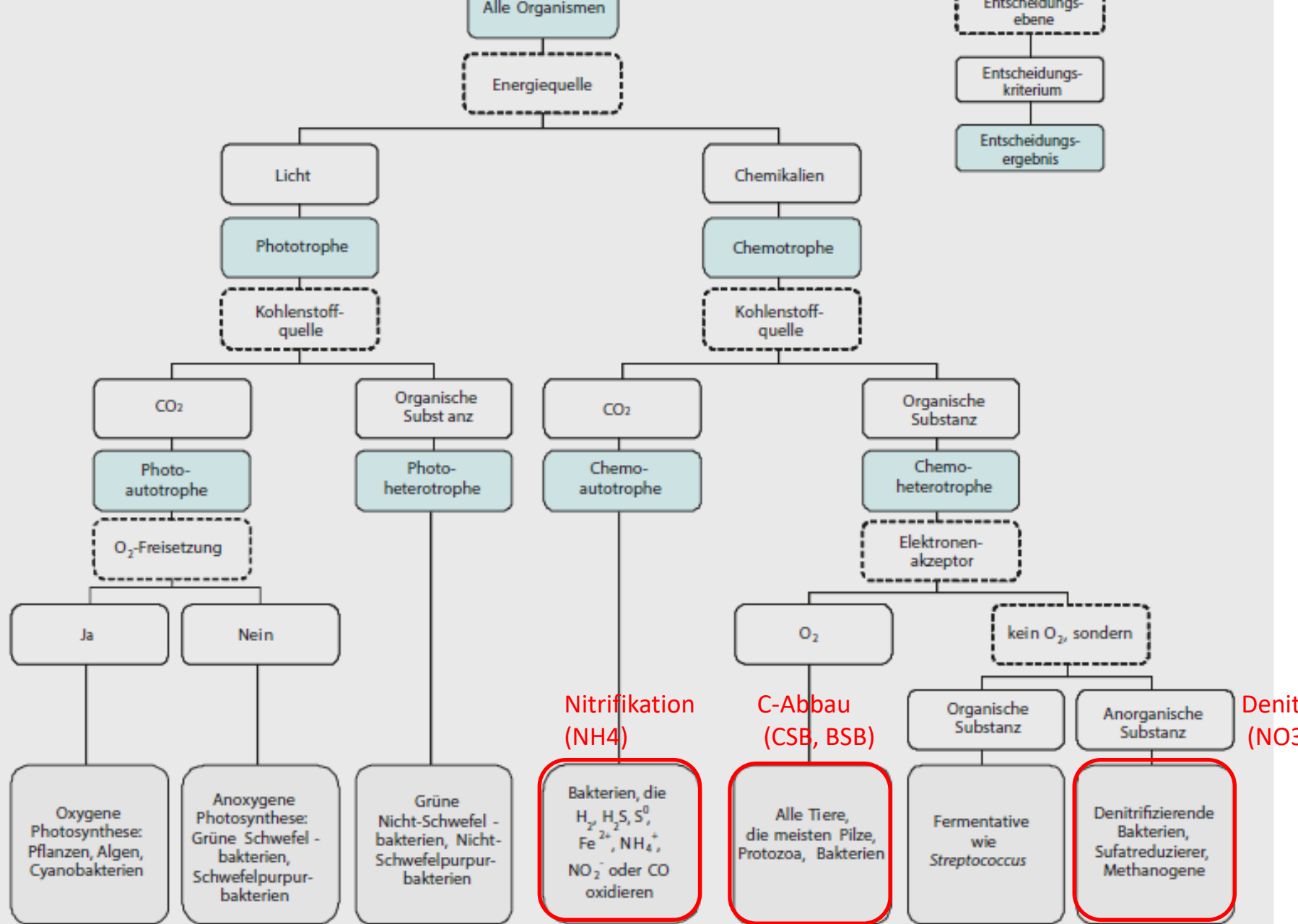
Wasserstoffdonator, organisch



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ Ernährungstypen

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



[Reineke und Schlömann, 2020]

Abb. 3.12 Fließschema zur Unterteilung der Organismen in die Stoffwechseltypen

Naturwissenschaftliche Grundlagen

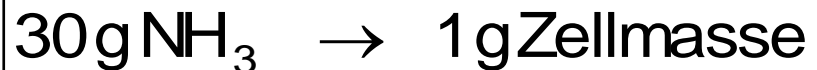
Biologie/ Stoffwechsel

Baustoffwechsel:

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



Oxidation von NH_3/NH_4 mit **autotrophen Bakterien** zu NO_3



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

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ Milieubedingungen

Vorherrschende Energiegewinnung	Milieubedingung
Respiration ➤ Sauerstoff, O ₂	aerob
Respiration ➤ Nitrat NO ₃ ⁻ , Nitrit NO ₂ ⁻ , kein gelöster Sauerstoff	anoxisch*
Fermentation ➤ Organische Verbindungen, weder gelöster Sauerstoff, noch Nitrat	anaerob

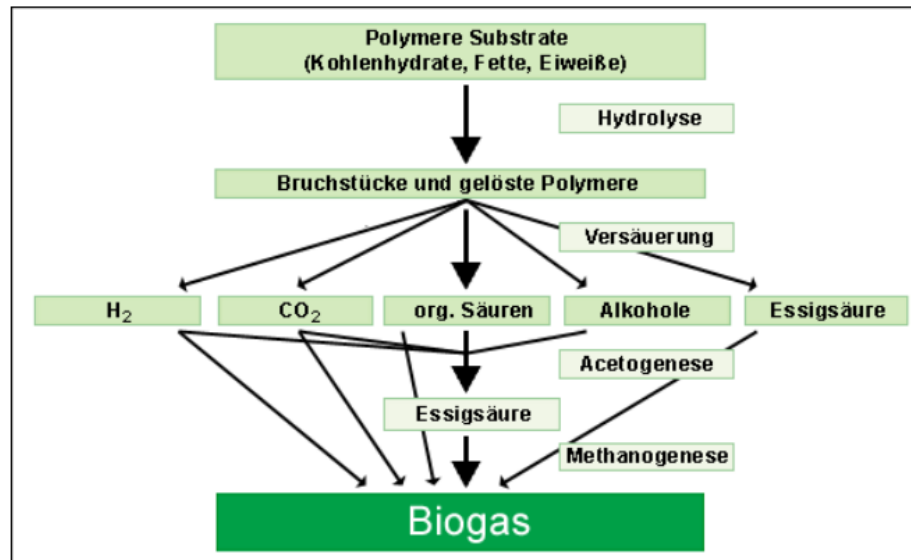
*Dieser Begriff ist in der Mikrobiologie nicht geläufig, er wurde durch Ingenieure eingeführt, um die Umweltbedingungen zu charakterisieren, die für die Denitrifikation typisch sind.

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ anaerober Abbau, Gärung

anaerober Abbau bis zur **Methanproduktion**

Anaerobe Gärung



Biogas:

- 50 bis 75 Volumen-% aus Methan (CH₄)
- 25 bis 50 Volumen-% aus Kohlendioxyd (CO₂)
- geringe Mengen an Sauerstoff, Stickstoff und Spurengase

Naturwissenschaftliche Grundlagen

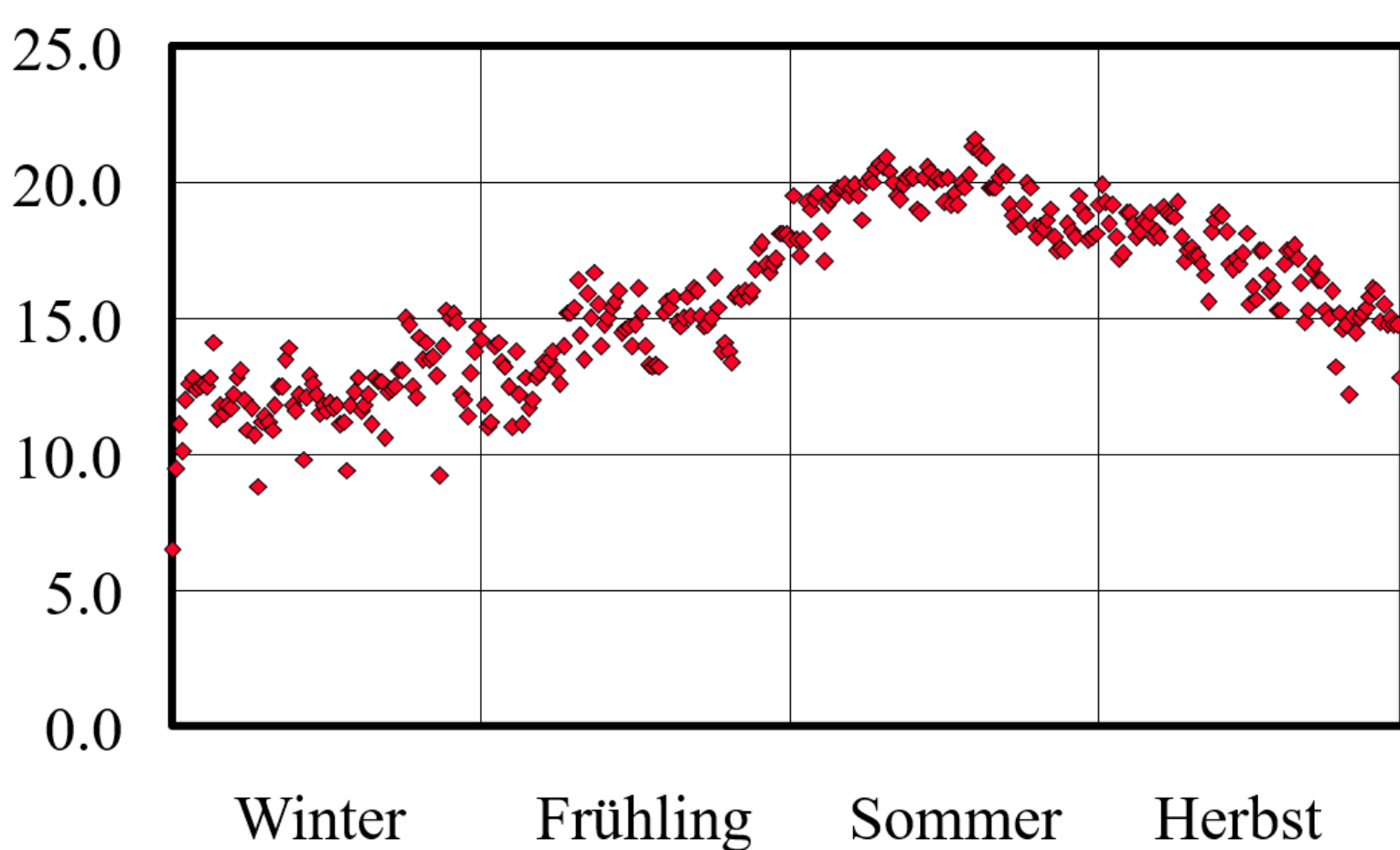
Biologie/ Wachstum

- 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**

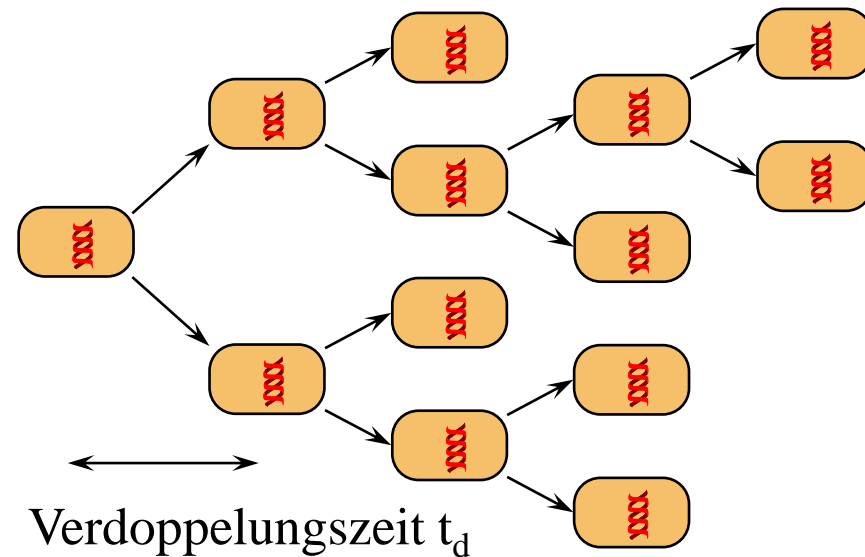
$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{S + k_S}$$

mit:

μ = aktuelle Wachstumsgeschwindigkeit
 μ_{\max} = maximale Wachstumsgeschwindigkeit
 S = Substratkonzentration
 k_S = Substrataffinitäts-Konstante

Wachstumsgeschwindigkeit bei:

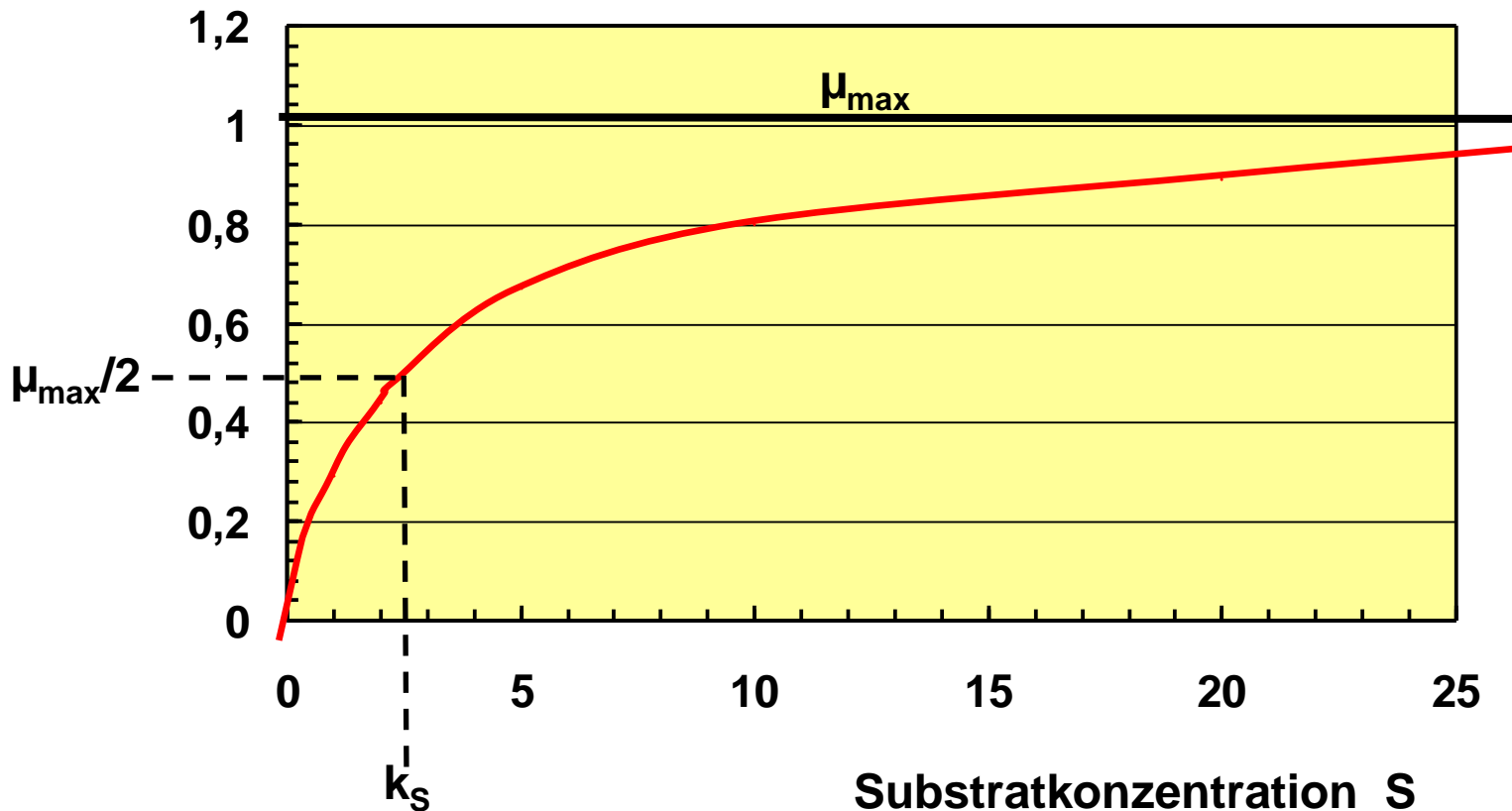
$$\begin{array}{ll} S = k_S : & \mu_{\max}/2 \\ S \gg k_S & \mu_{\max} \end{array}$$



Naturwissenschaftliche Grundlagen

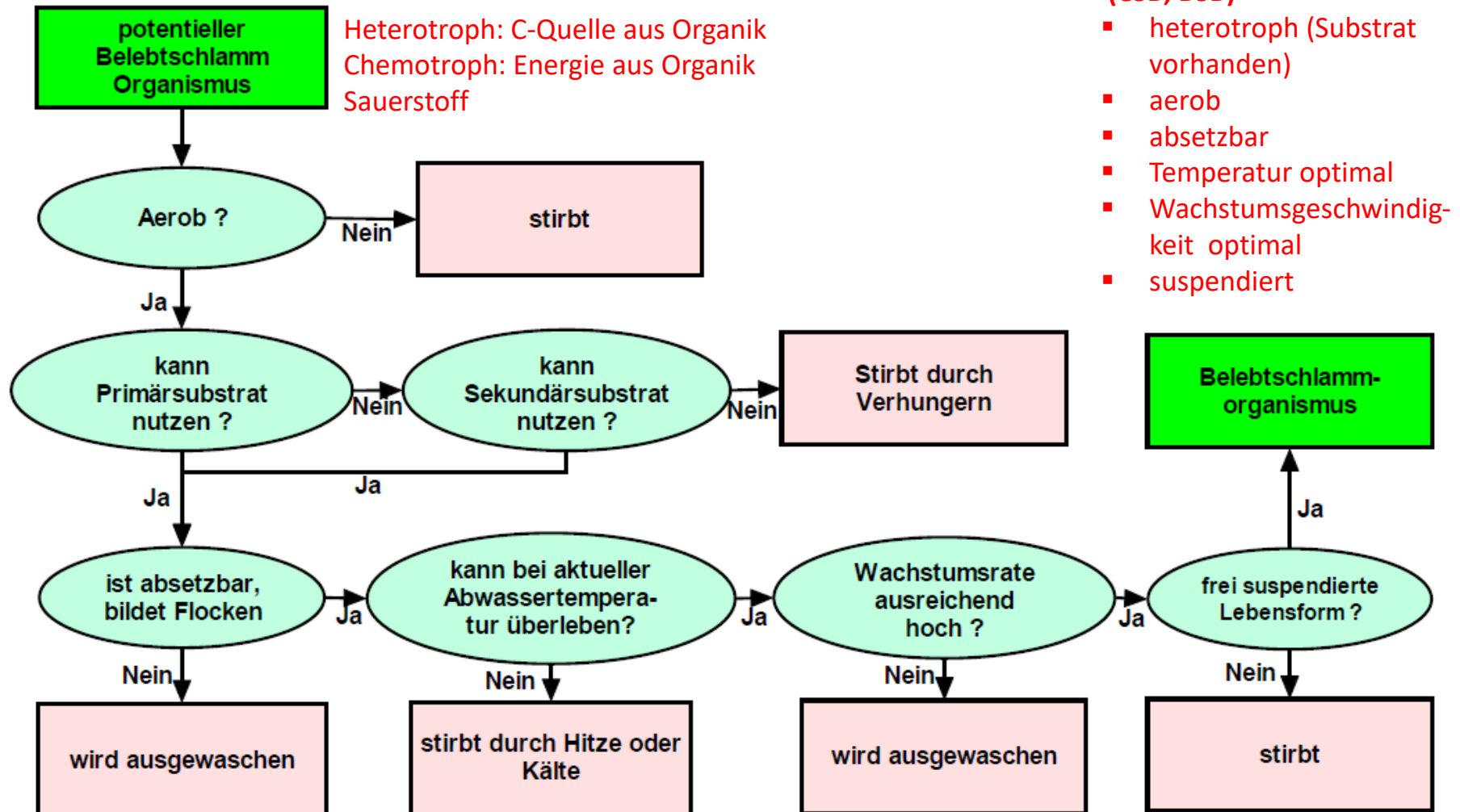
Biologie/ Wachstum

Monod-Kinetik: Wachstumsgeschwindigkeit μ



Naturwissenschaftliche Grundlagen

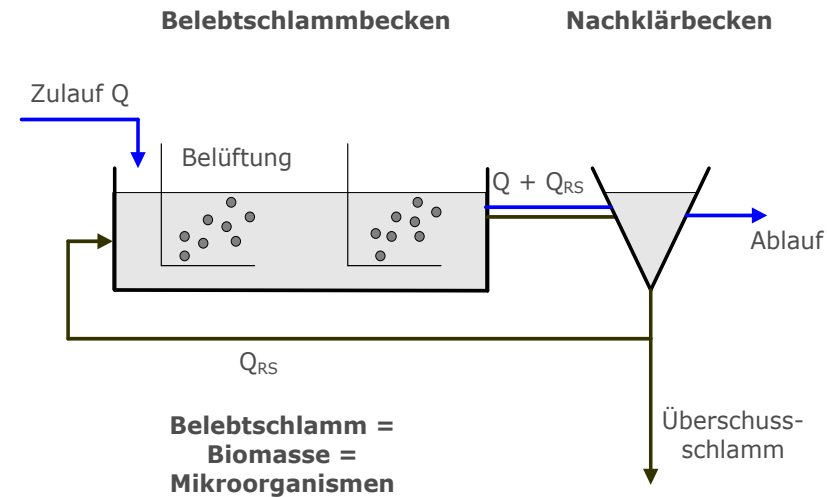
Biologie



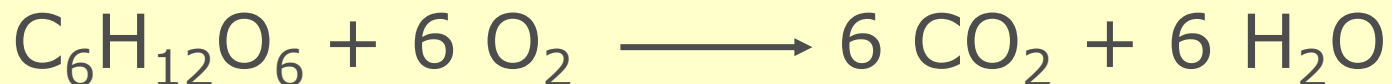
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

- **organische Substanzen** (BSB₅, CSB) sind **biologisch abbaubar**
- **aerobe biologische Behandlung**
Standardmethode und „**zweite Stufe**“ der Abwasserreinigung
- **Mikroorganismenwachstum**
(Überschussschlammproduktion und Rückführung)
- **Sauerstoffverbrauch**



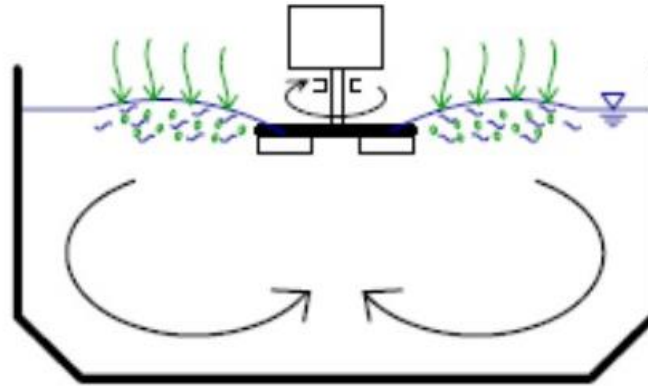
Beispiel: Glucoseabbau (Oxidation mit Sauerstoff)



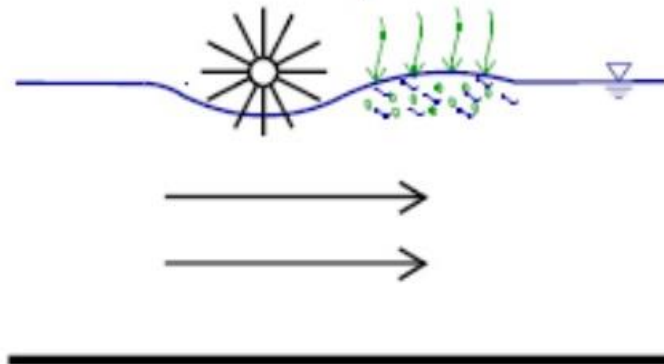
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

⇒ **Kreiselbelüfter:**



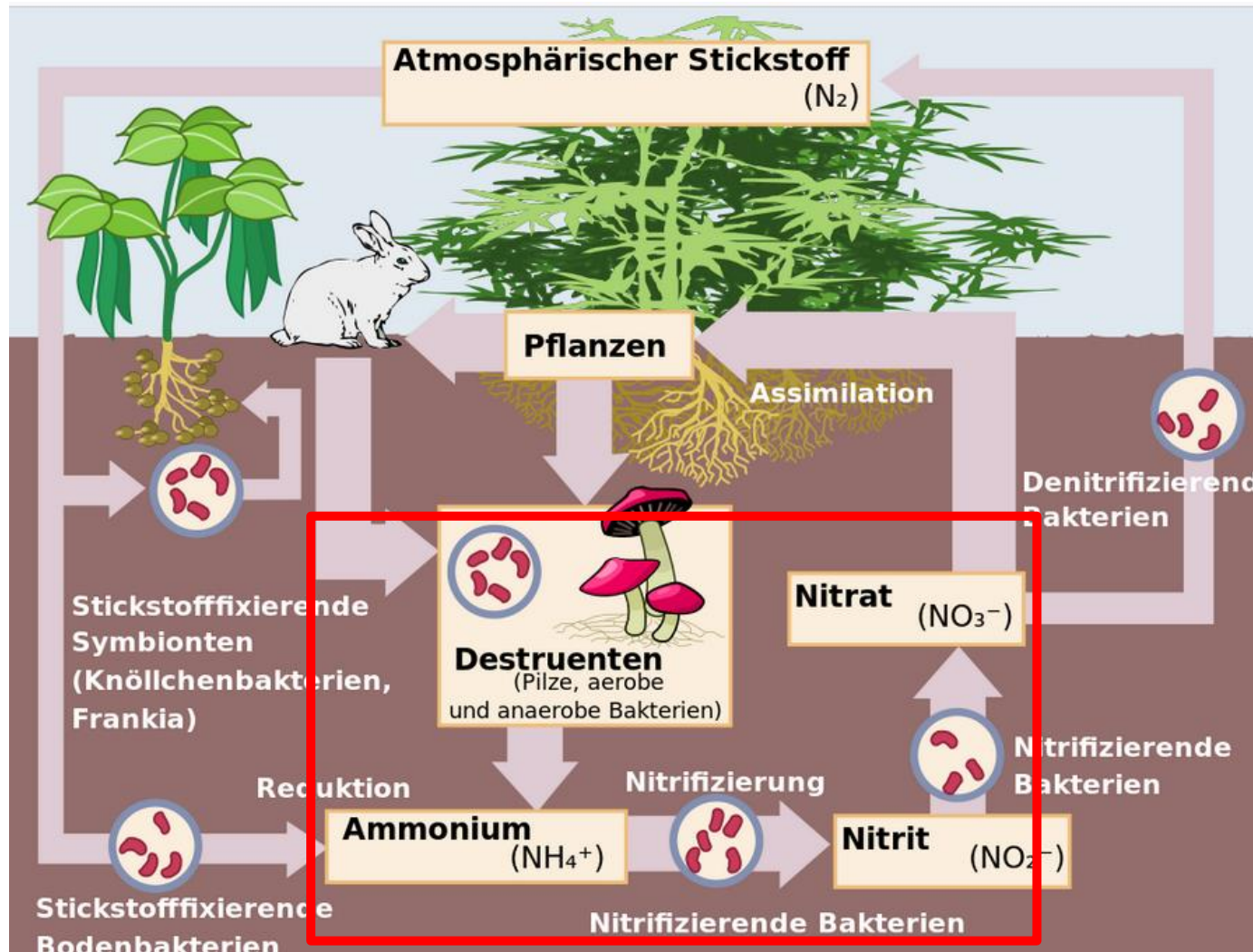
⇒ **Walzenbelüfter (Mammutrotoren):**



Belüftung kostet viel **Energie!**

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Biologie/ Stickstoffkreislauf



Naturwissenschaftliche Grundlagen

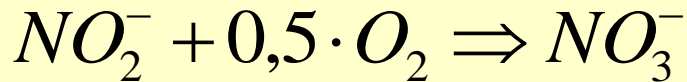
Umweltchemie - Abwasser

Nitrifikation ist die **autotrophe** Oxidation von Ammonium (NH_4) zu Nitrat (NO_3) durch spezialisierte **Mikroorganismen** in zwei Schritten:

Nitritation (Nitrosomonas)



Nitratation (Nitrobacter)



Gesamter Prozess



Naturwissenschaftliche Grundlagen

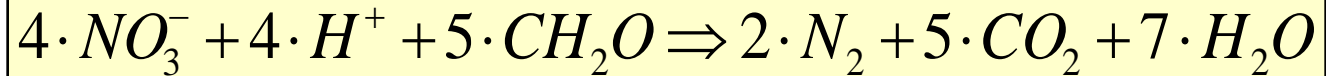
Umweltchemie - Abwasser

- **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 H^{+} → Eigenhemmung bei gering gepufferten Wässern)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

Denitrifikation ist die Reduktion von Nitrat (NO_3^-) in gasförmigen Stickstoff (N_2), der in die Atmosphäre entweicht, durch **heterotrophe Mikroorganismen**



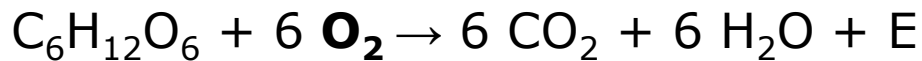
- leicht abbaubares **organisches Material** muss als Substrat zur Verfügung stehen
- es darf kein **gelöster Sauerstoff (O_2) vorhanden sein (anoxische Bedingungen, Nitratatmung)**, ansonsten würden die Bakterien diesen vorziehen.
- Nebenprodukt **Lachgas (N_2O)**
- **„Verbrauch“ von H^+** (Abpufferung pH Wert)

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

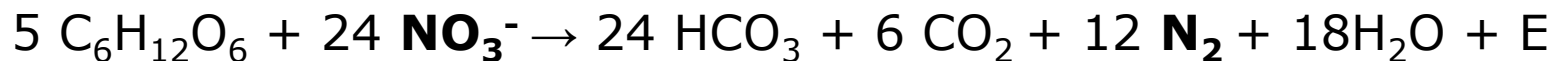
Biologischer Abbau erfolgt nur, wenn damit für beteiligte Organismen **Energiegewinn** einhergeht

aerobe Atmung (CSB/BSB-Abbau):



[2.900 kJ/mol Glukose]

Denitrifikation (NO₃⁻- Abbau):



[2.700 kJ/mol Glukose]

Denitrifikation erfolgt durch die gleichen Bakterien, wenn **kein gelöster O₂** vorhanden, da aerobe Atmung mehr Energie bringt.

Naturwissenschaftliche Grundlagen

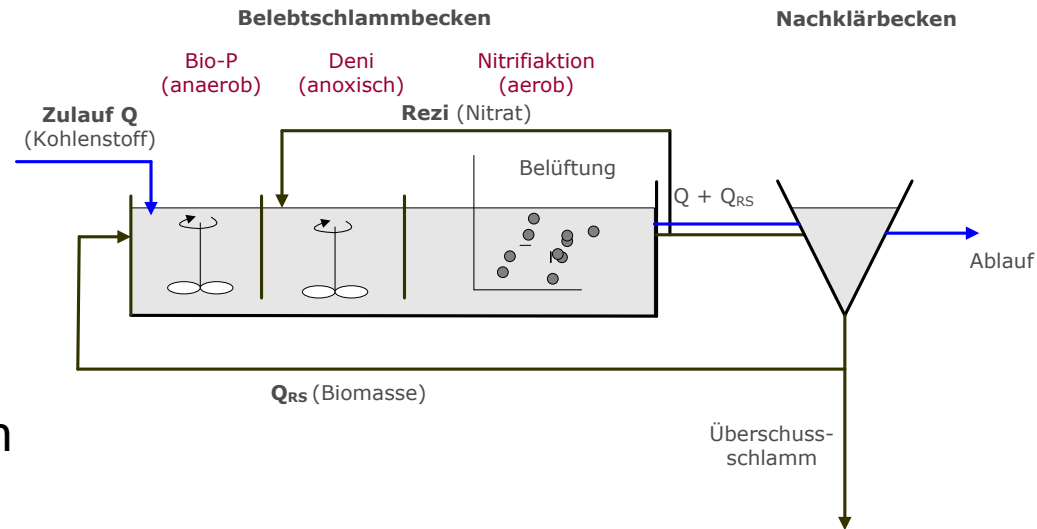
Umweltchemie - Abwasser

Nitrifikation

- autotrophe Mikroorganismen
- CO_2 Kohlenstoffquelle
- Substrat: Ammonium
- aerobe Bedingungen
- Entstehung $\text{H}^+ \rightarrow \text{pH}$ sinkt
Puffer wichtig
- Temperatur und Volumen

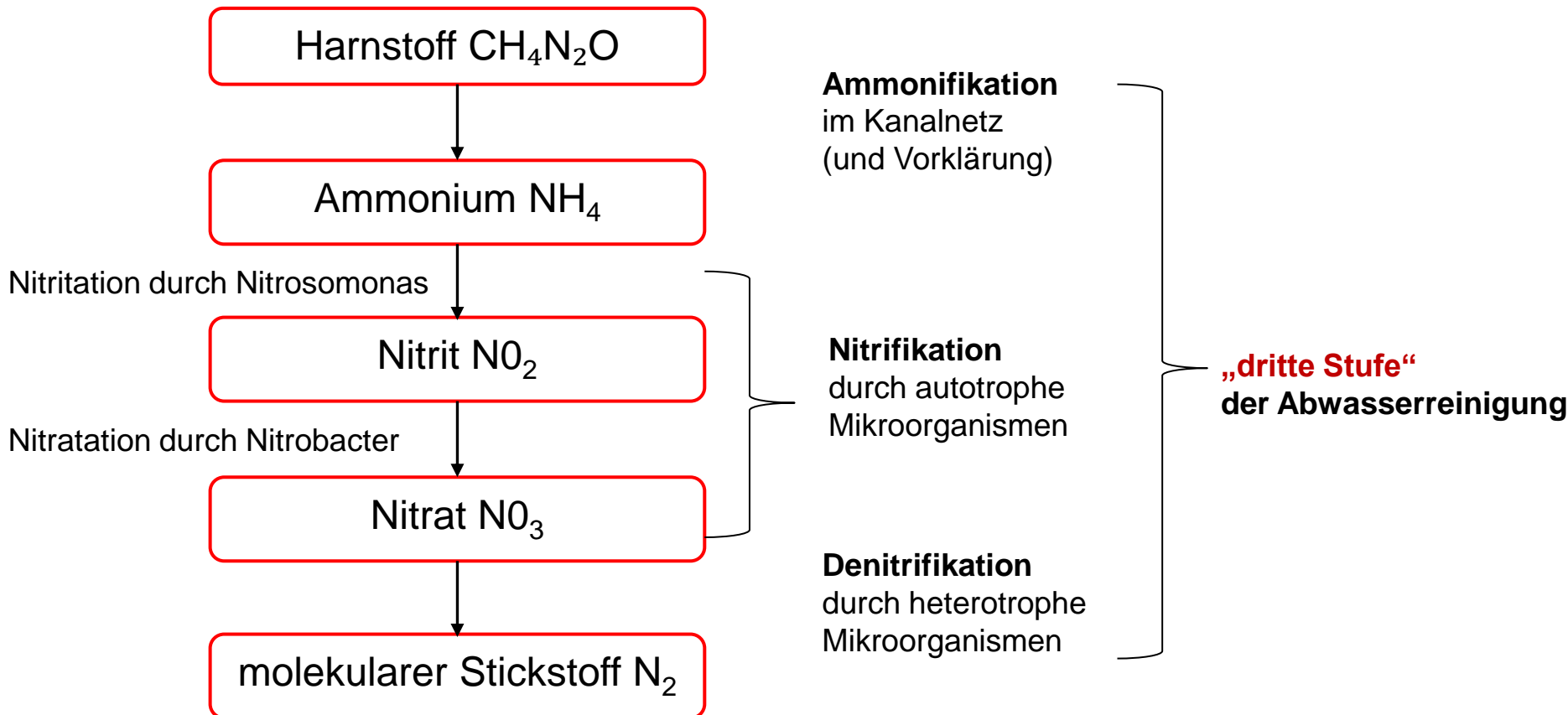
Denitrifikation

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



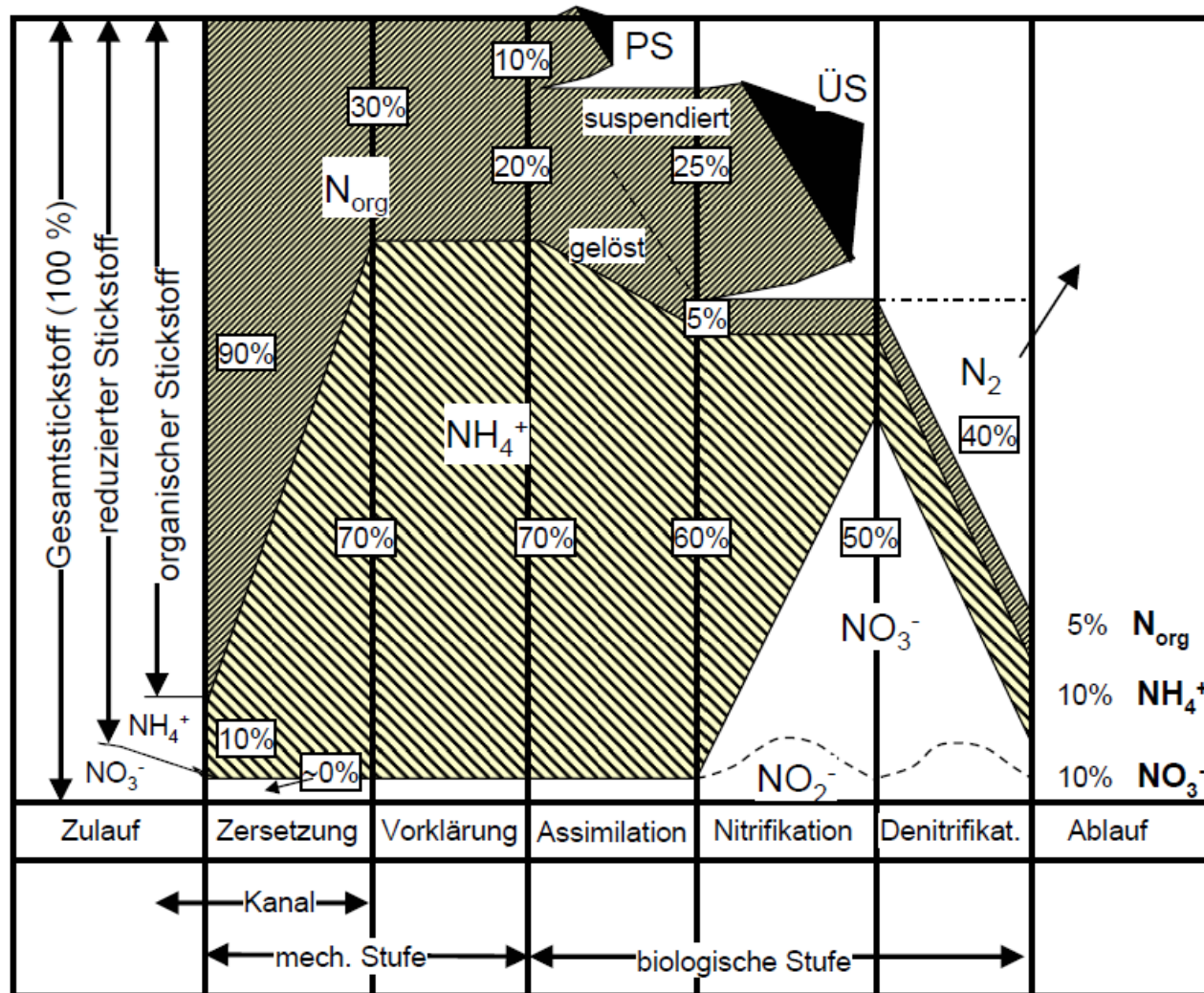
Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

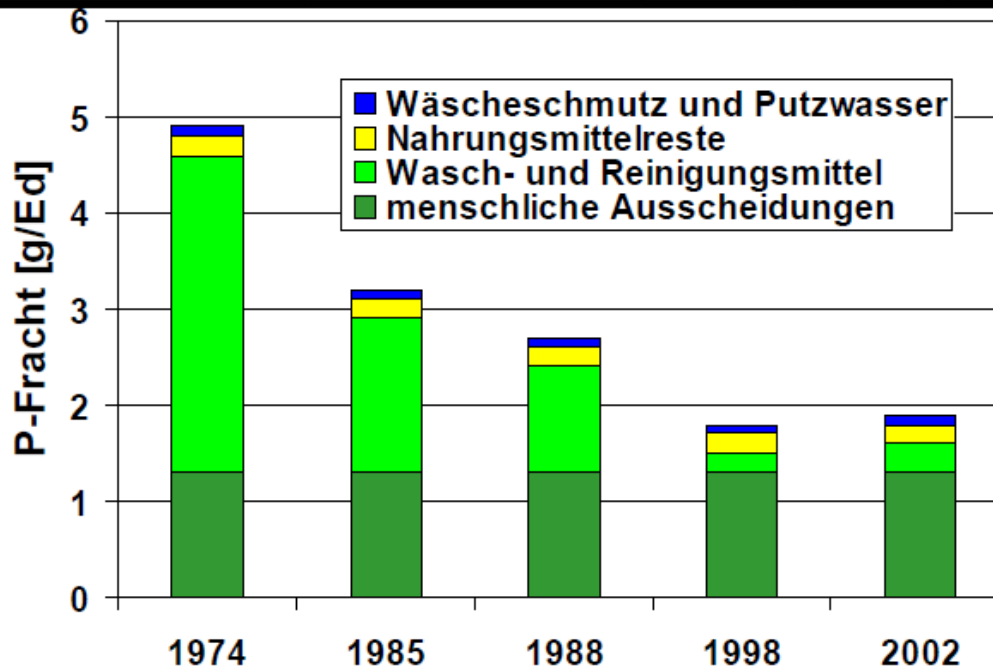


Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

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

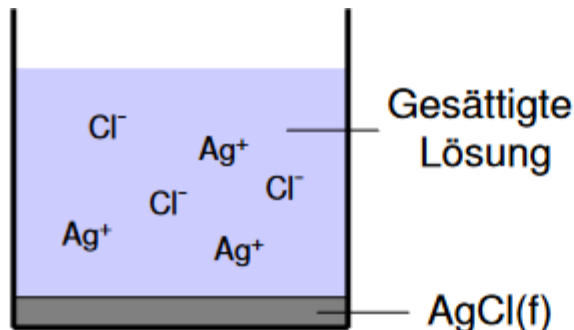
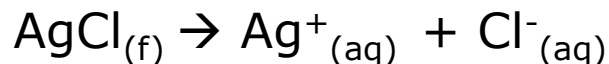
P-Frachten im Abwasser		1975	1985	1990	2005
aus menschl. Fäkalien:	ca. g P/(E·d)	1,9	1,9	1,9	1,8
aus Waschmitteln:	ca. g P/(E·d)	3,1	1,6	0,6	~ 0
insgesamt:	ca. g P/(E·d)	5,0	3,5	2,5	1,8



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...



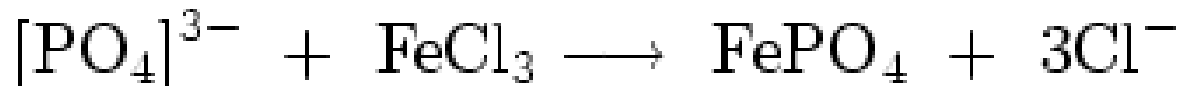
$$K = \frac{c(\text{Ag}^+) \cdot c(\text{Cl}^-)}{c[\text{AgCl(f)}]}$$

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 AlPO_4 bzw. FePO_4

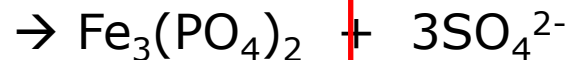
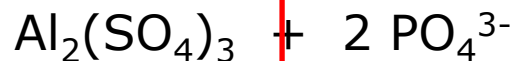
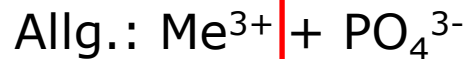


- **Salze** aus dem Fällungsmittel verbleiben im Abwasser → ggf. negative Aufsalzung Gewässer
- entstehende Mikrofloccen ballen sich durch Flockung zu **Makrofloccen** zusammen (**Flockung**) → Entfernung mit Sedimentation und Filtration

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

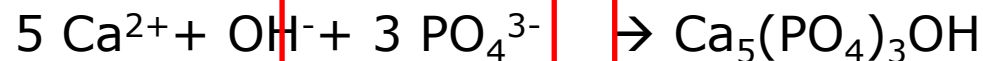
P – Fällung mit Metallsalzen Fe^{3+} ; Al^{3+}



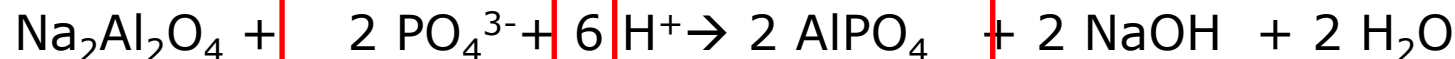
gelöstes Phosphor

ungelöstes Phosphor

Kalkhydrat



Natriumaluminat



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

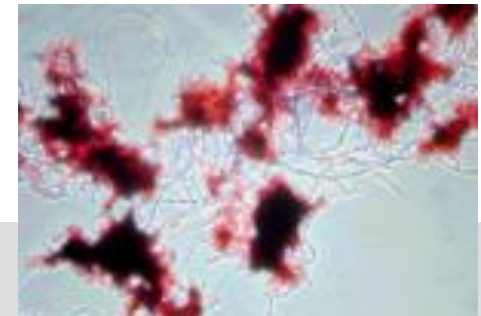


Flockungsmittelbehälter

Naturwissenschaftliche Grundlagen

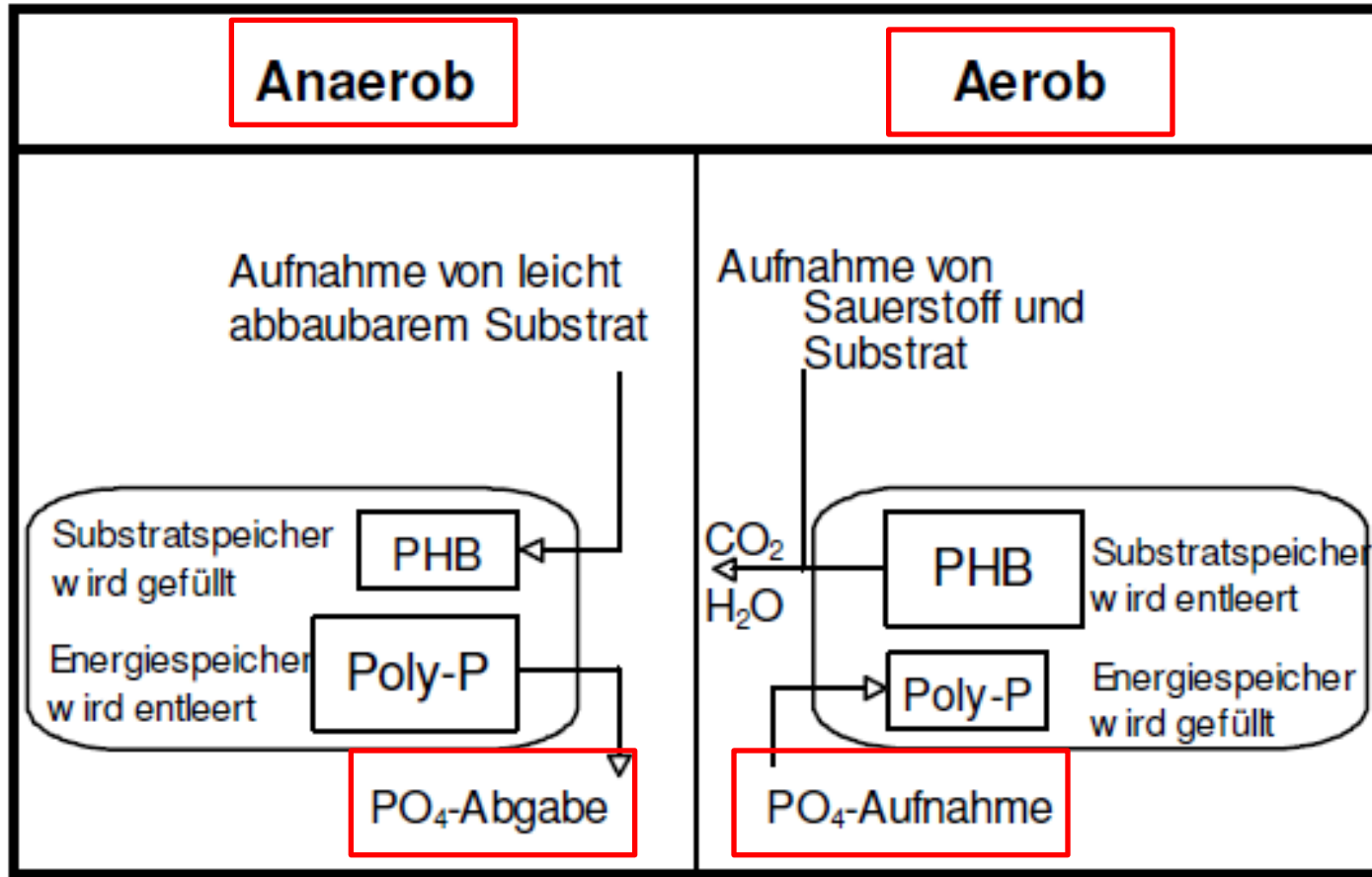
Umweltchemie - Abwasser

- **biologische P-Elimination:** Bakterien werden im **Wechsel anaeroben und aeroben Bedingungen** ausgesetzt:
- unter **anaeroben Bedingungen (Stress)** geben die Bakterien PO_4^{3-} ab, um ihren Energiestoffwechsel aufrecht zu erhalten.
- im anschließenden **aeroben Milieu nehmen die Bakterien vermehrt** 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

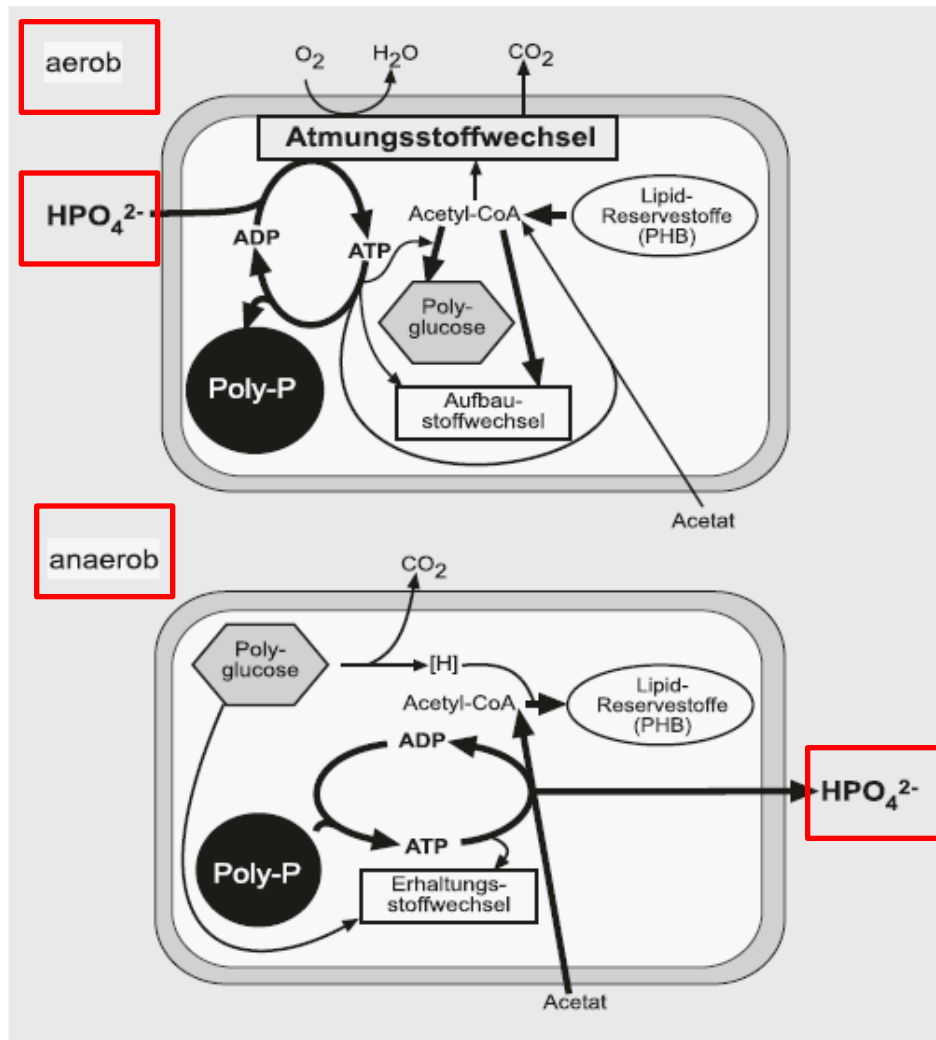
Umweltchemie - Abwasser



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

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



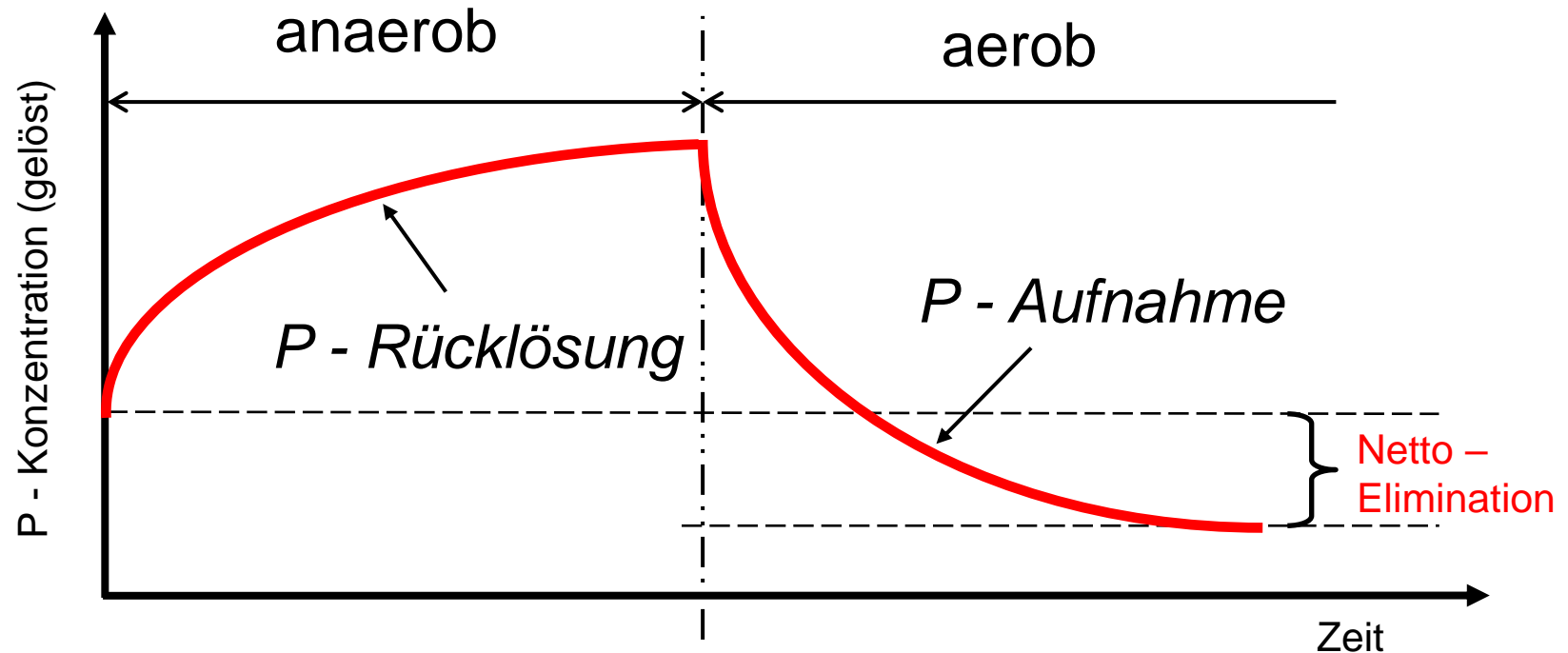
[Reineke und Schlömann, 2020]

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

Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

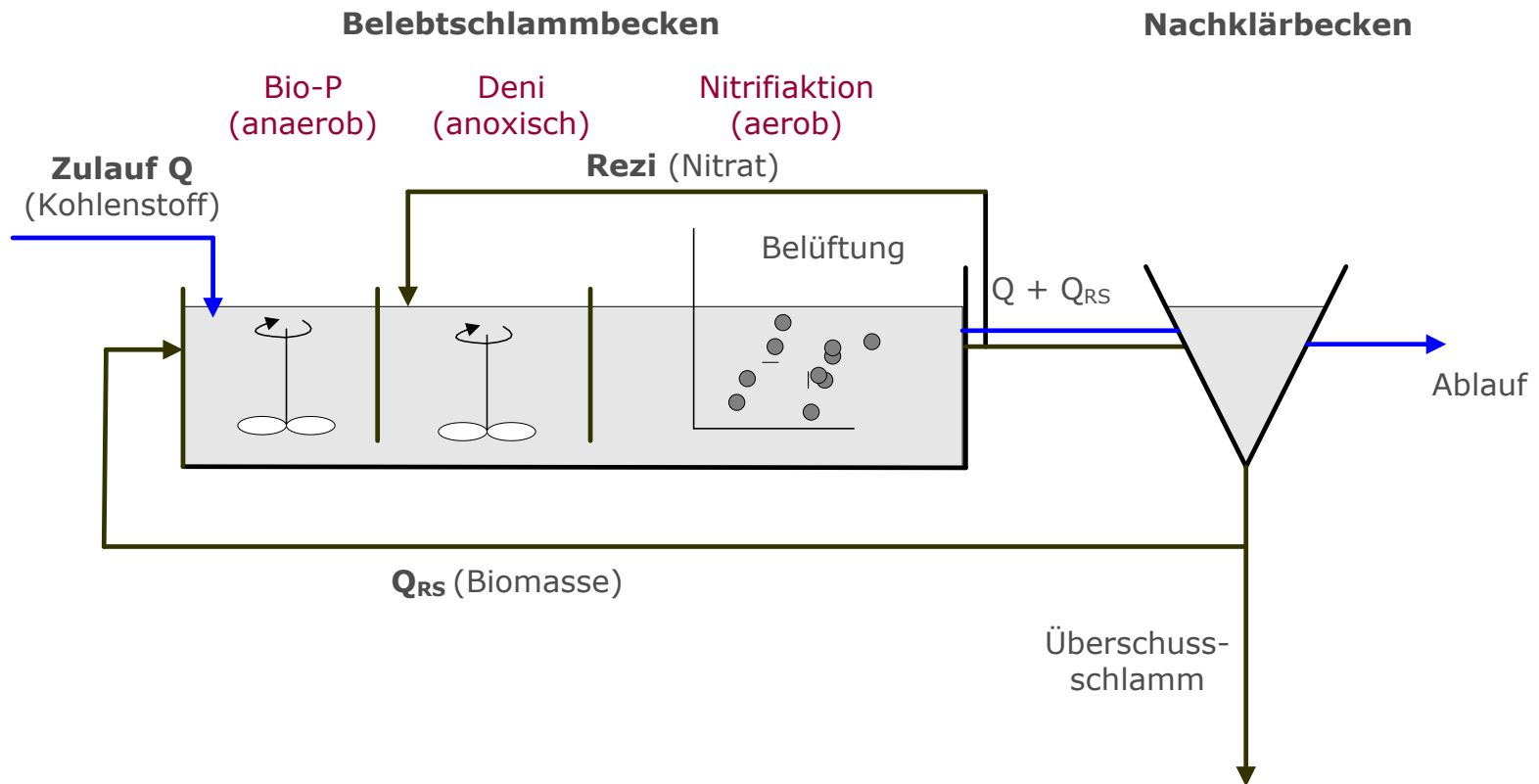
- **anaerobe Verhältnisse** (auch kein Nitrat!)
- leicht abbaubarer organischer Kohlenstoff (CSB/BSB) muss vorhanden sein (heterotrophe Organismen)
- Abwassertemperatur $> 18^{\circ}\text{C}$



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser

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

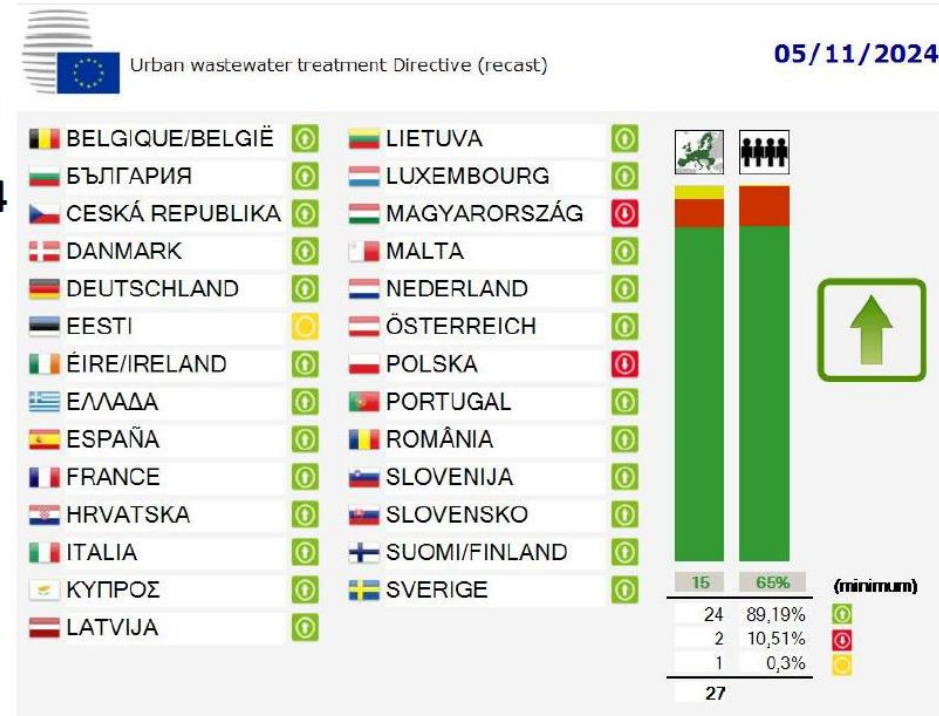


Naturwissenschaftliche Grundlagen

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



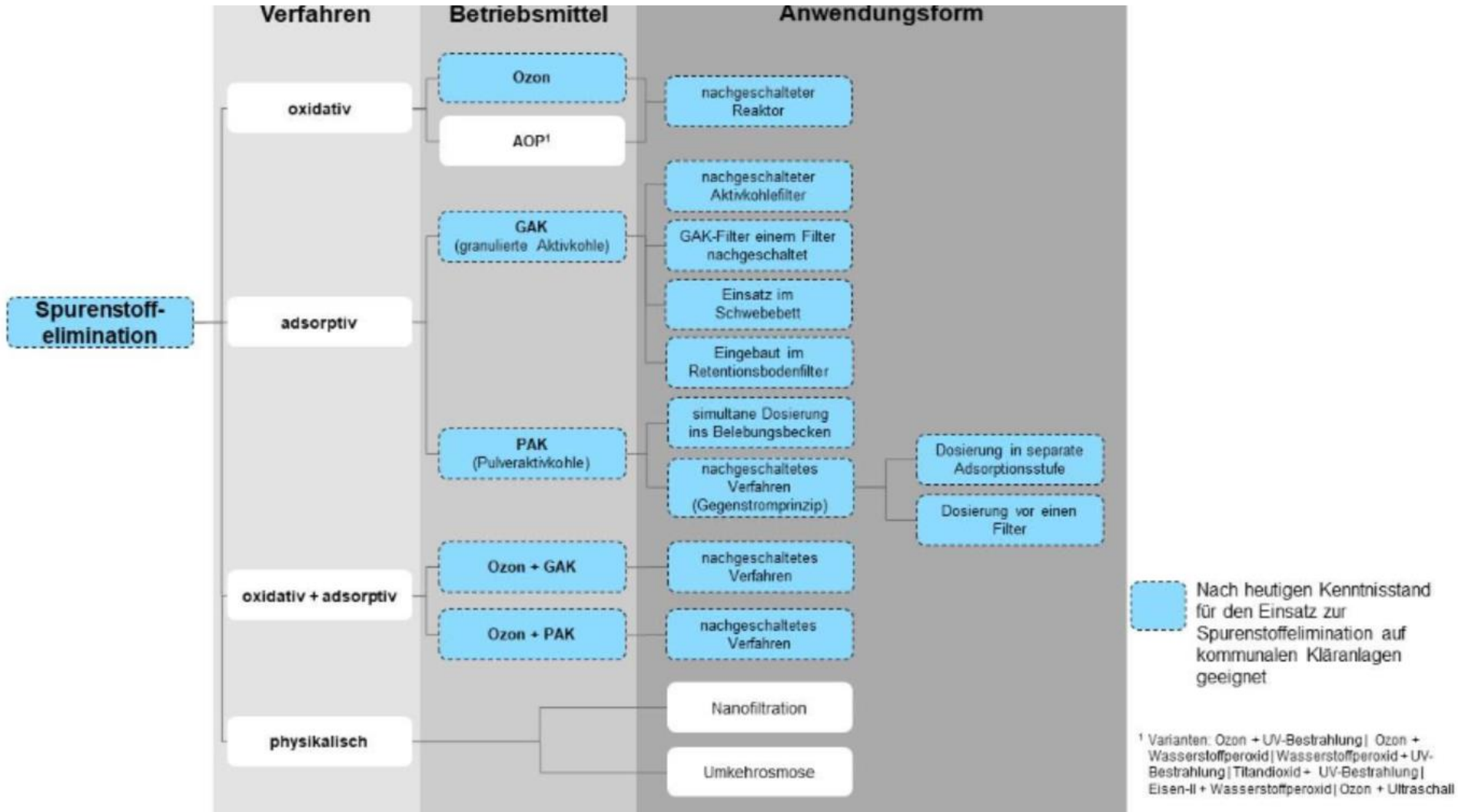
Naturwissenschaftliche Grundlagen

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)

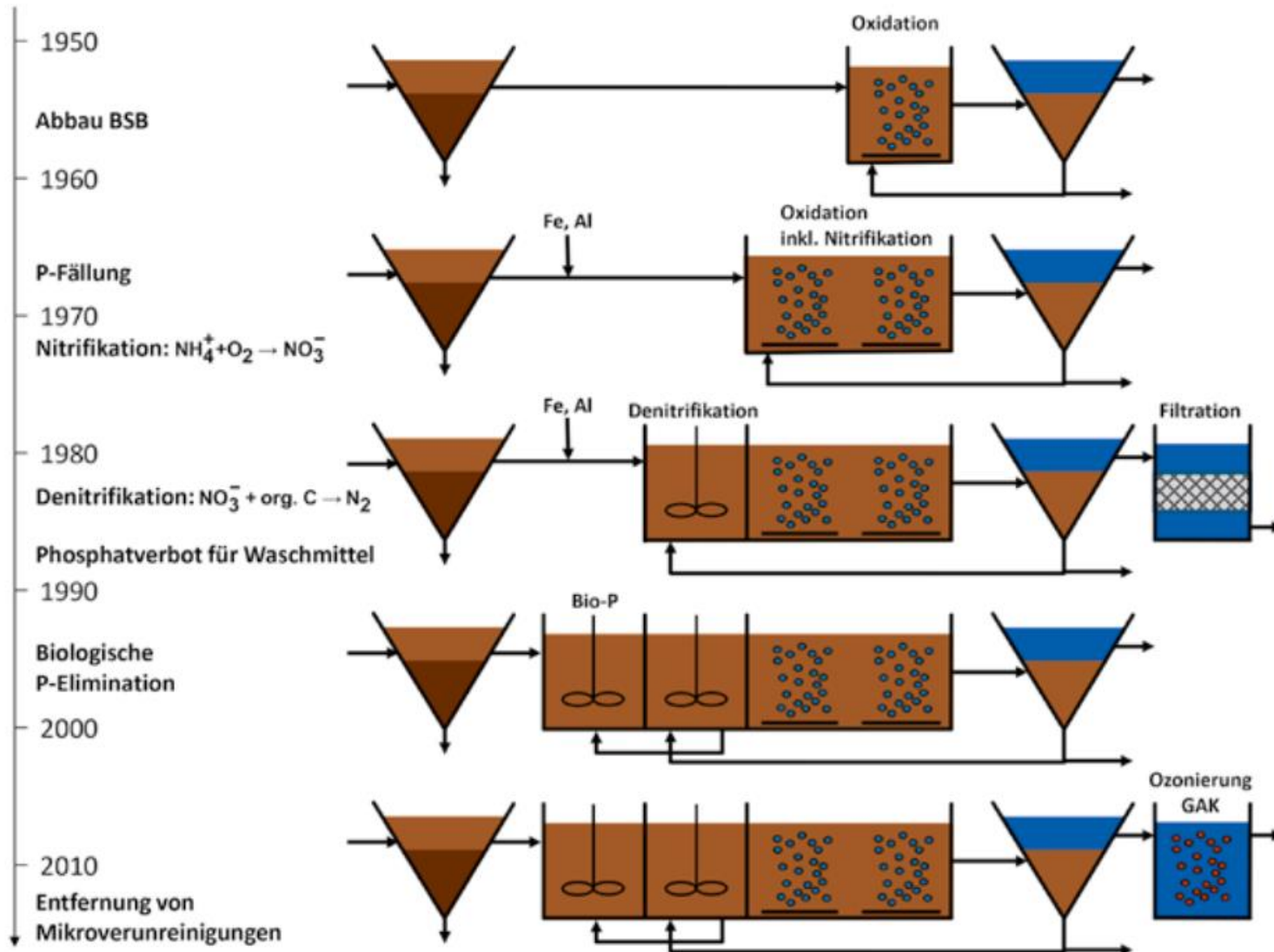
4. Reinigungsstufe

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



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



Naturwissenschaftliche Grundlagen

Umweltchemie - Abwasser



Primary treatment^{a, b, c}

Treatment of wastewater by a physical and/or chemical process involving settlement of suspended solids, or other process in which the BOD_5 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^{a, b, c}

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^{a, b, c}

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_5 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

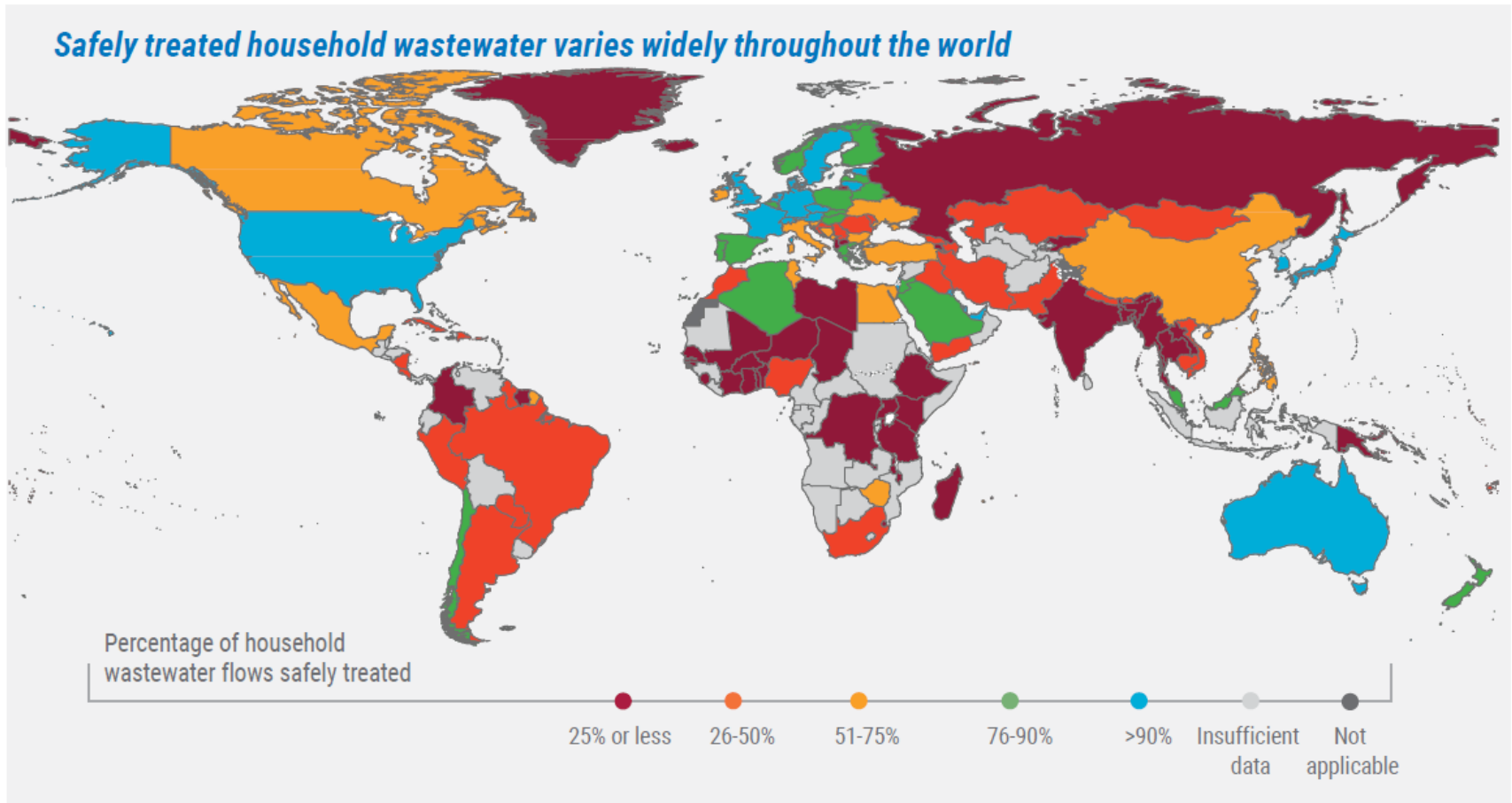
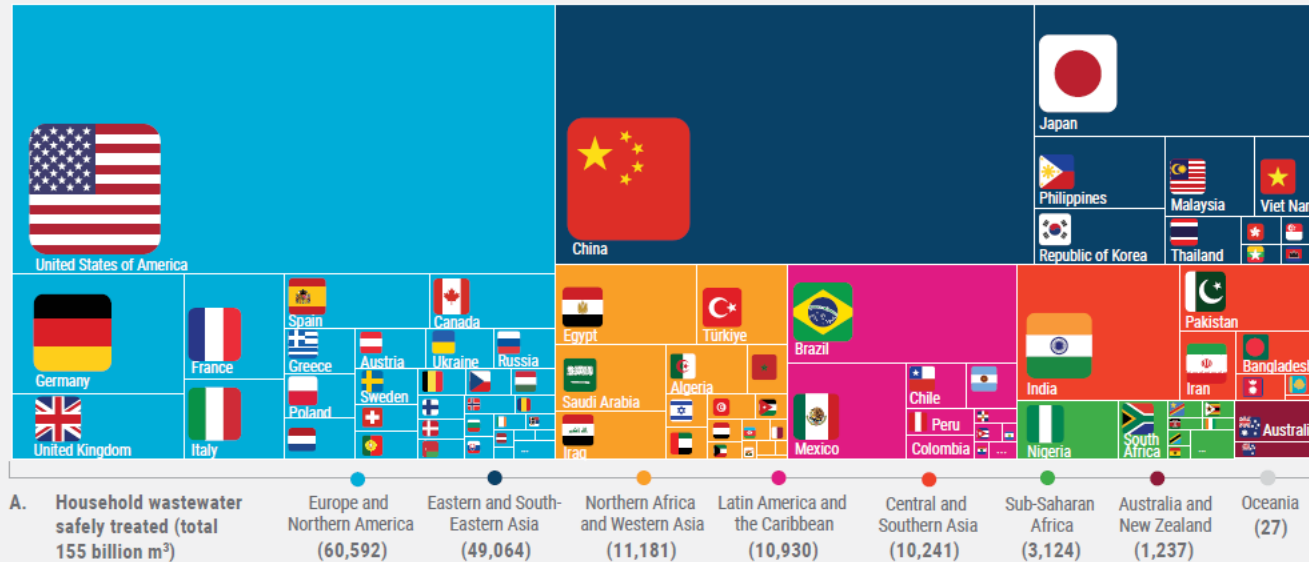
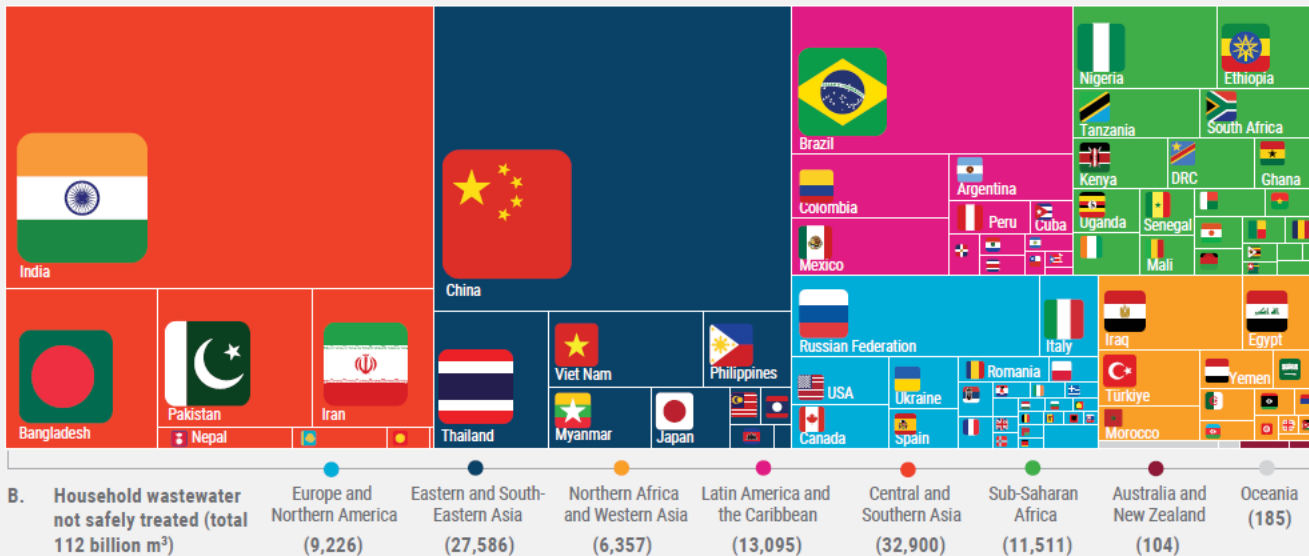


Figure 28. Estimated proportions of household wastewater safely treated by country (2022).

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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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 m³)	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“