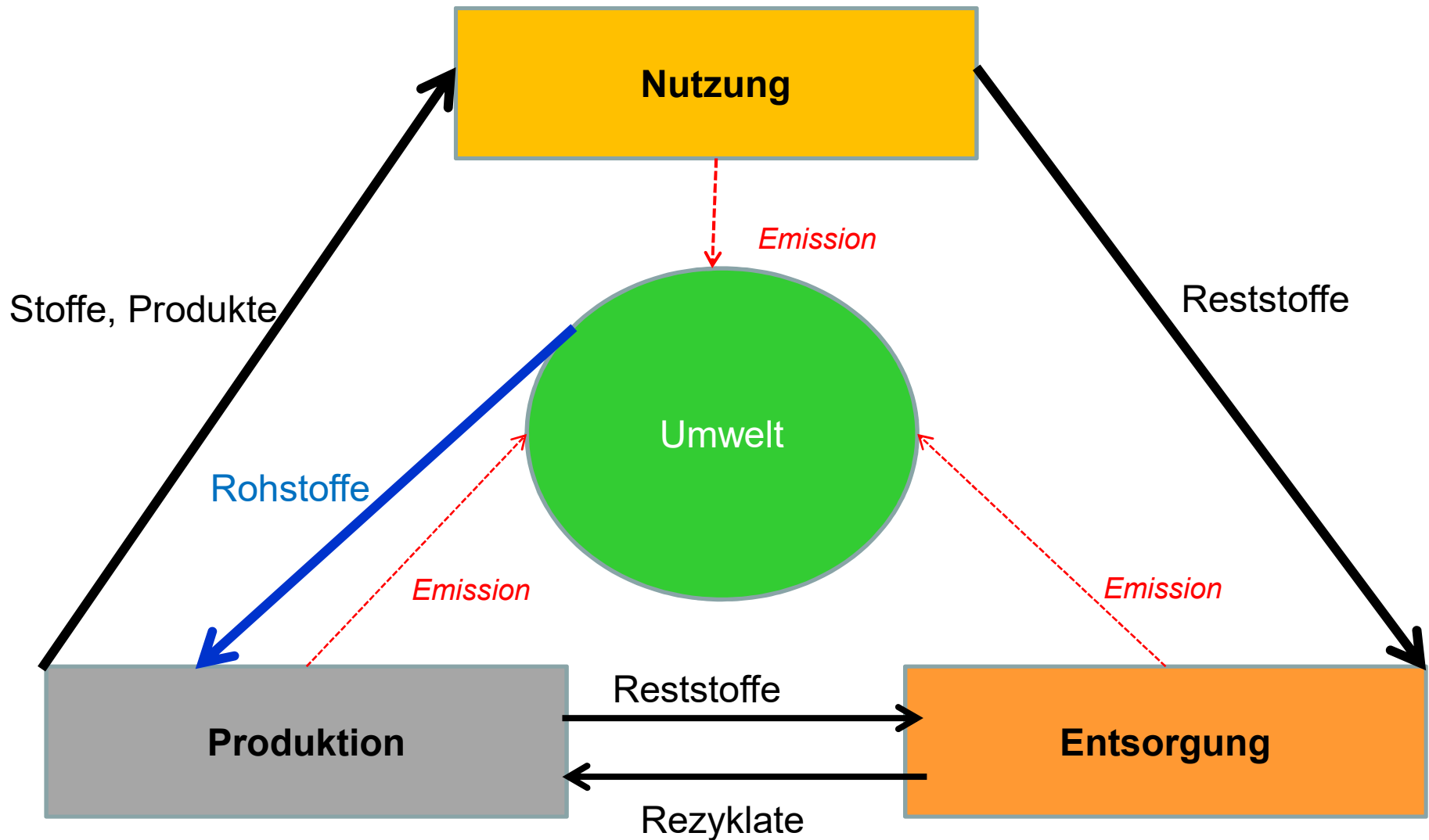


UC-09

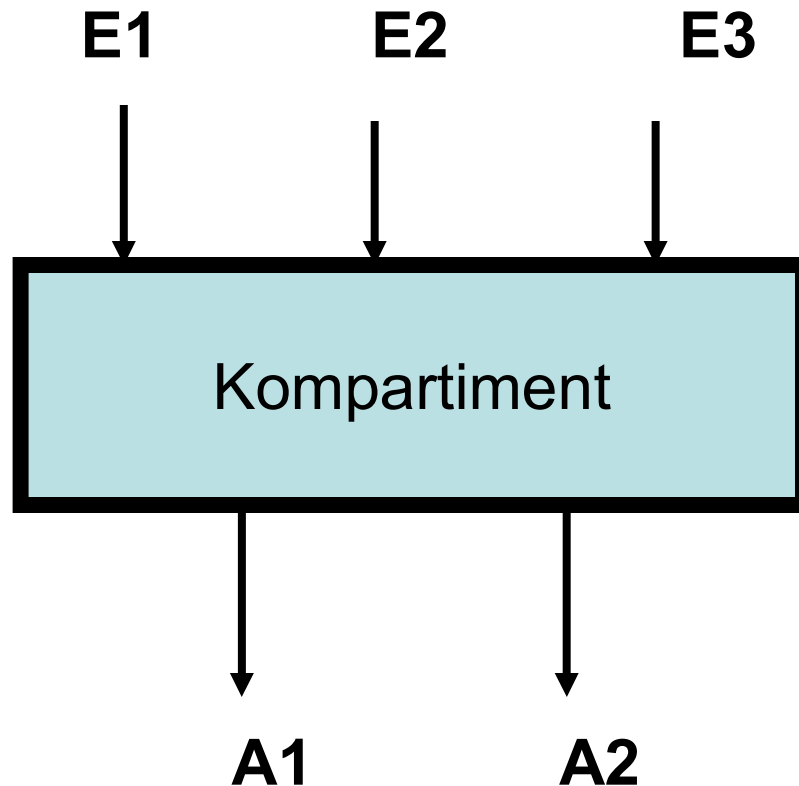
## **5.3 Stoffeintrag und Transport**

*Umweltchemische Prozesse unterliegen stark vernetzten Kreisläufen.*

## Schadstoffeinträge in die Umwelt



# Globale Stoffkreisläufe



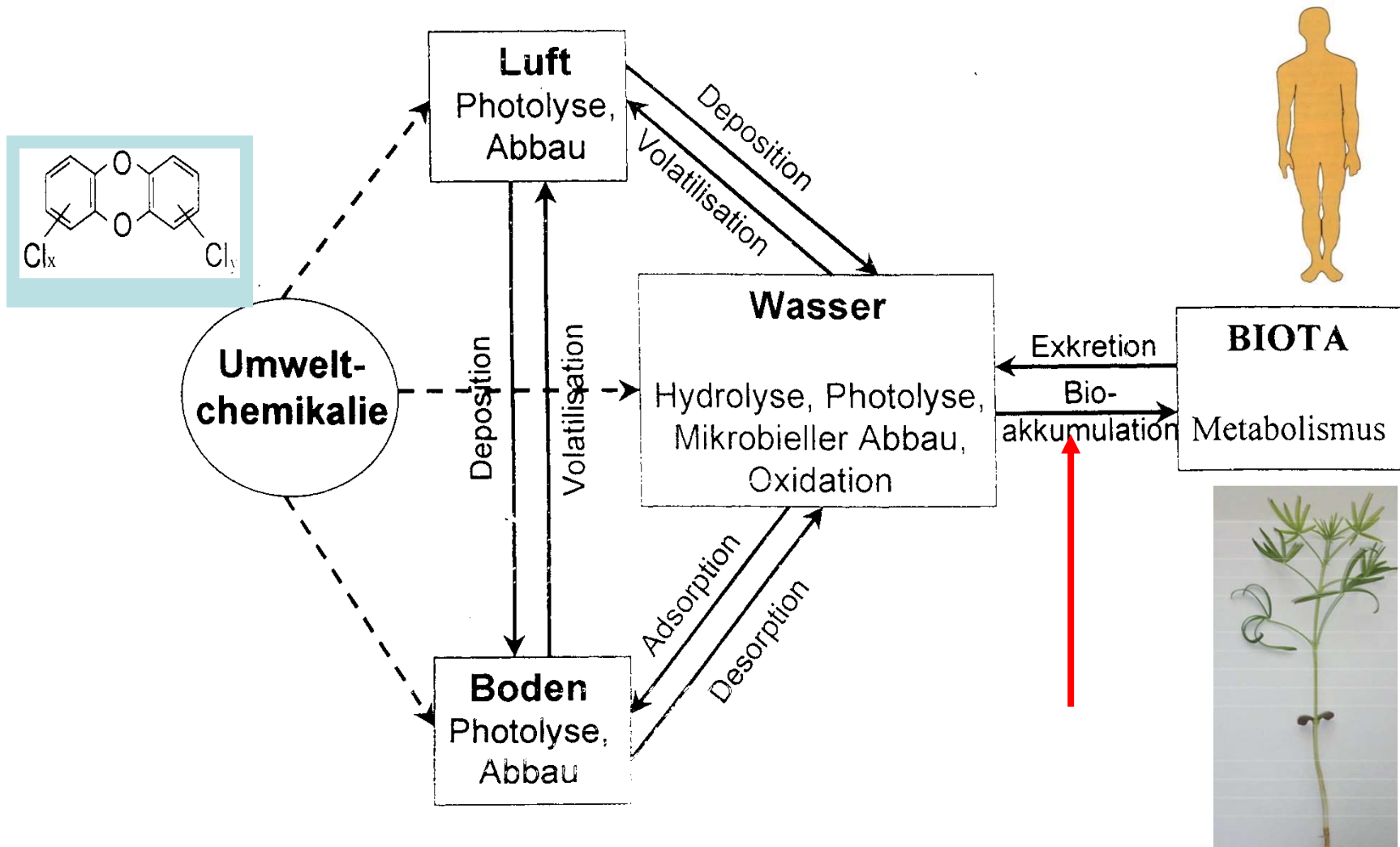
*Stoff- und Energiebilanzen sind die Grundlage, um Stoffkreisläufe beschreiben zu können.*

*Umfassende Analytik (auch satelliten-gestützt) ist unabdingbar.*

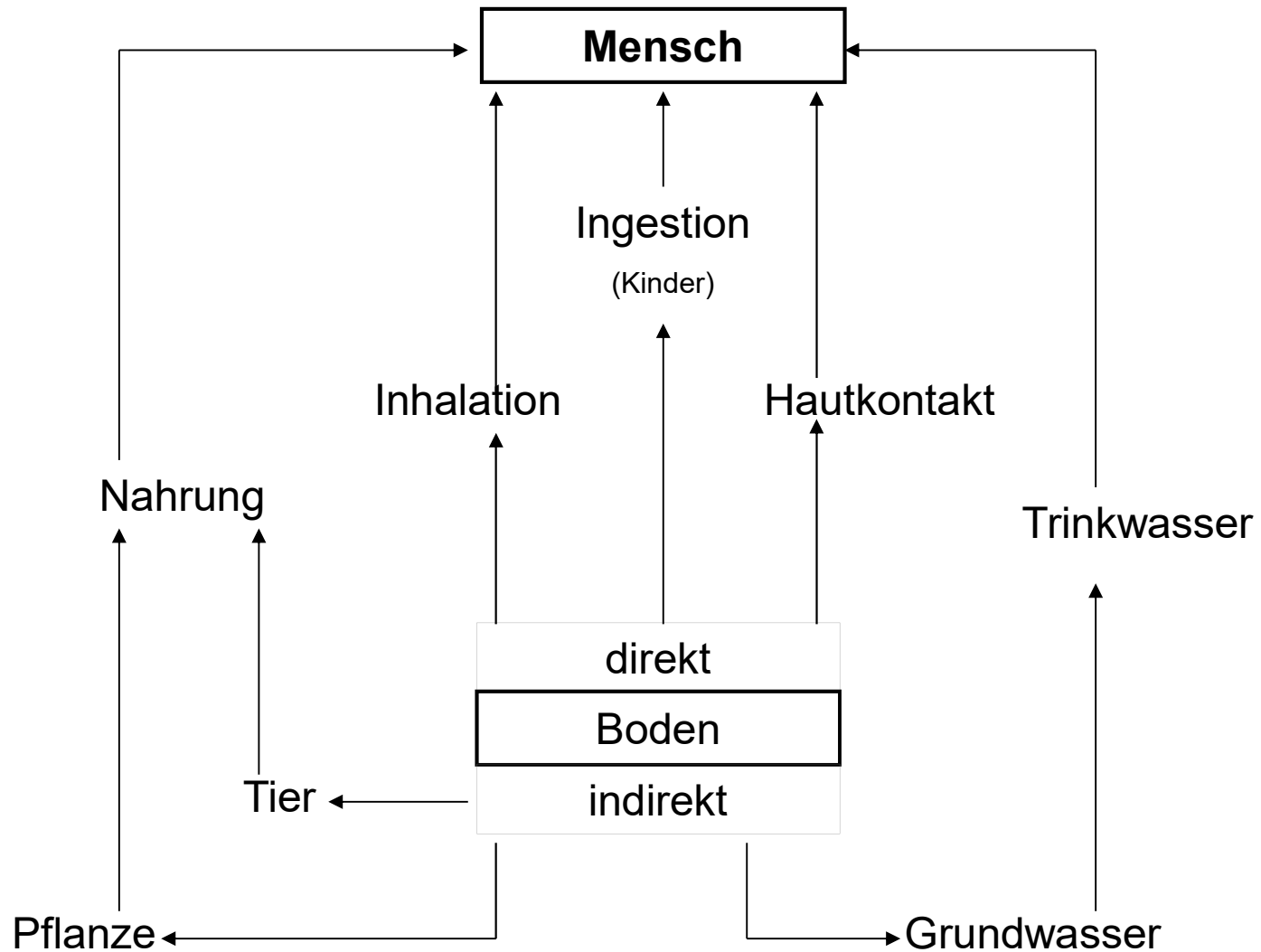
*Zugehörige physikalisch-chemische-biologische Prozesse müssen aufgeklärt werden, um Auswirkungen vorhersagen zu können.*

# Chemikalien in der Umwelt

Beziehung Umweltchemikalie - Umweltkompartiment - Biosystem (Mensch)

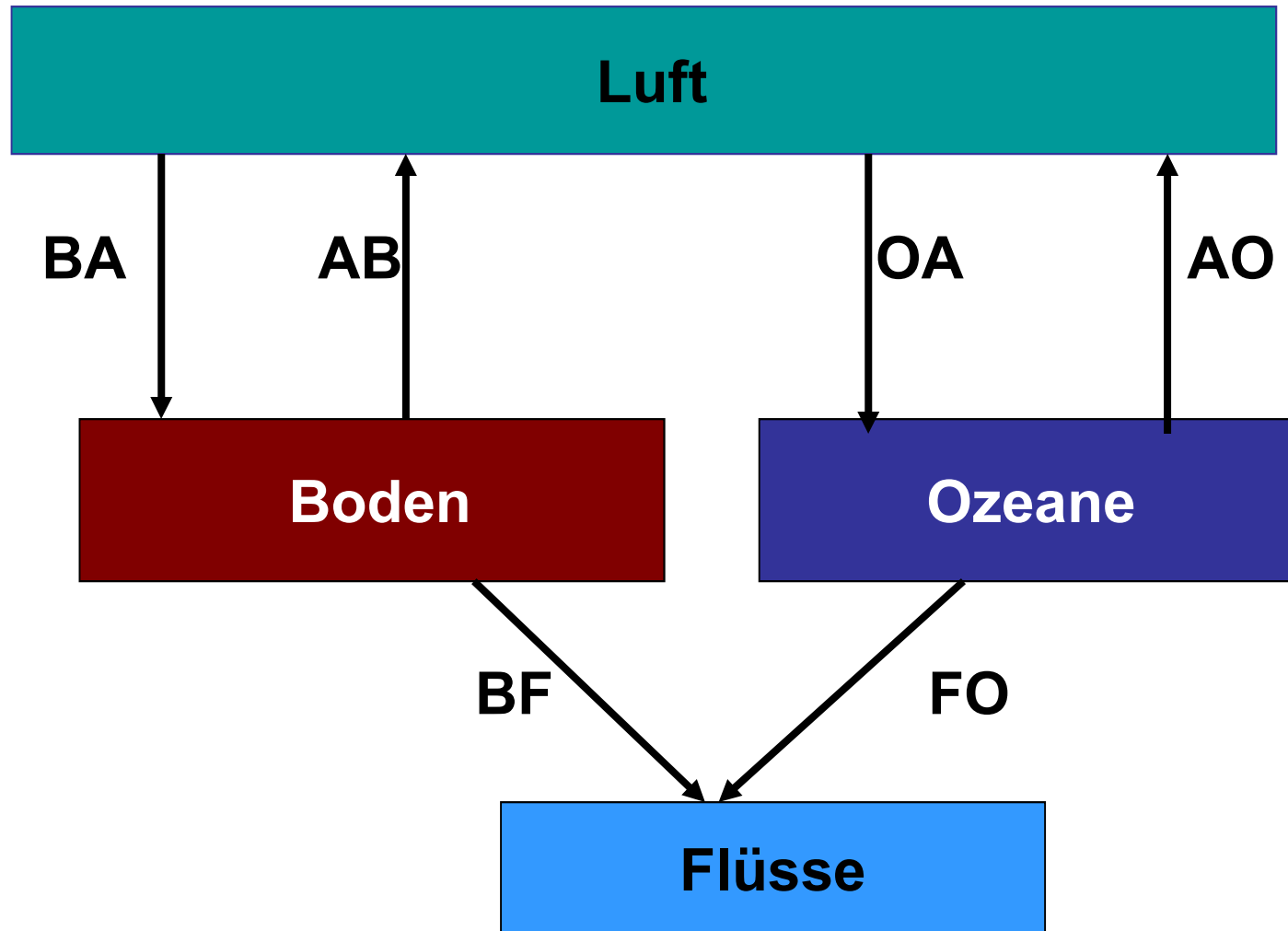


# Schadstoffkreislauf



### **5.3.1 Stoffkreisläufe**

## Modell zum Kreislauf von Stoffen





Was sind die Ursachen für das unterschiedliche Auftreten von Schadstoffen?

- Zivilisatorische Gründe,
- Gründe aus den Eigenschaften der Schadstoffe,
- Gründe aus den natürlichen Bedingungen.

## **Konzentrationsvergleich (Summenwerte) von persistenten organischen Schadstoffen (POPs) in Blutproben werdender Mütter aus unterschiedlichen arktischen Regionen in $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$**

<b>Schadstoffgruppe</b>	<b>Kanada (Nunavik)</b>	<b>Grönland</b>	<b>Norwegen (Kirkenes)</b>	<b>Russland (Nikel)</b>
PCB	10,0	14,8	3,6	4,2
DDT+	4,6	4,0	0,7	3,4
Abbauprodukte				
Chlordan-Isomere	1,4	1,6	0,1	0,1
HCB	0,7	0,2	0,2	0,5
HCH-Isomere	0,1	0,1	0,1	1,7

*PCB... polychlorierte Biphenyle*

*HCB... Hexachlorbenzol*

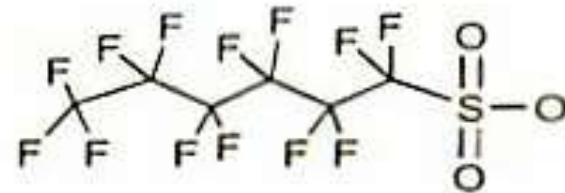
*HCH... Hexachlorcyclohexan-Isomere*

## Wichtigste perfluorierten Stoffe, die in der arktischen Umwelt nachgewiesen wurden:

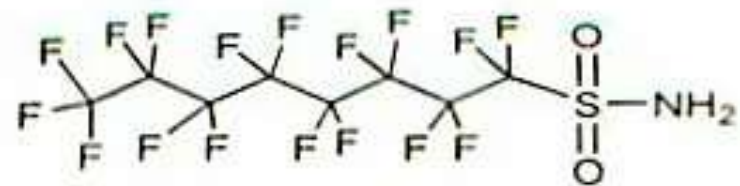
PFOS: Perfluoroktansulfonat,  $C_8F_{17}SO_3^-$



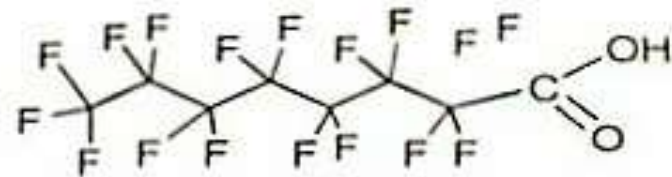
Perfluorhexansulfonat,  $C_6F_{13}SO_3^-$



PFOSA Perfluoroktansulfonylamid,  
 $C_8F_{17}SO_2NH_2$



PFOA: Perfluoroktansäure,  
 $C_8F_{17}COOH$ .



**- Kohlenstoffkreislauf**

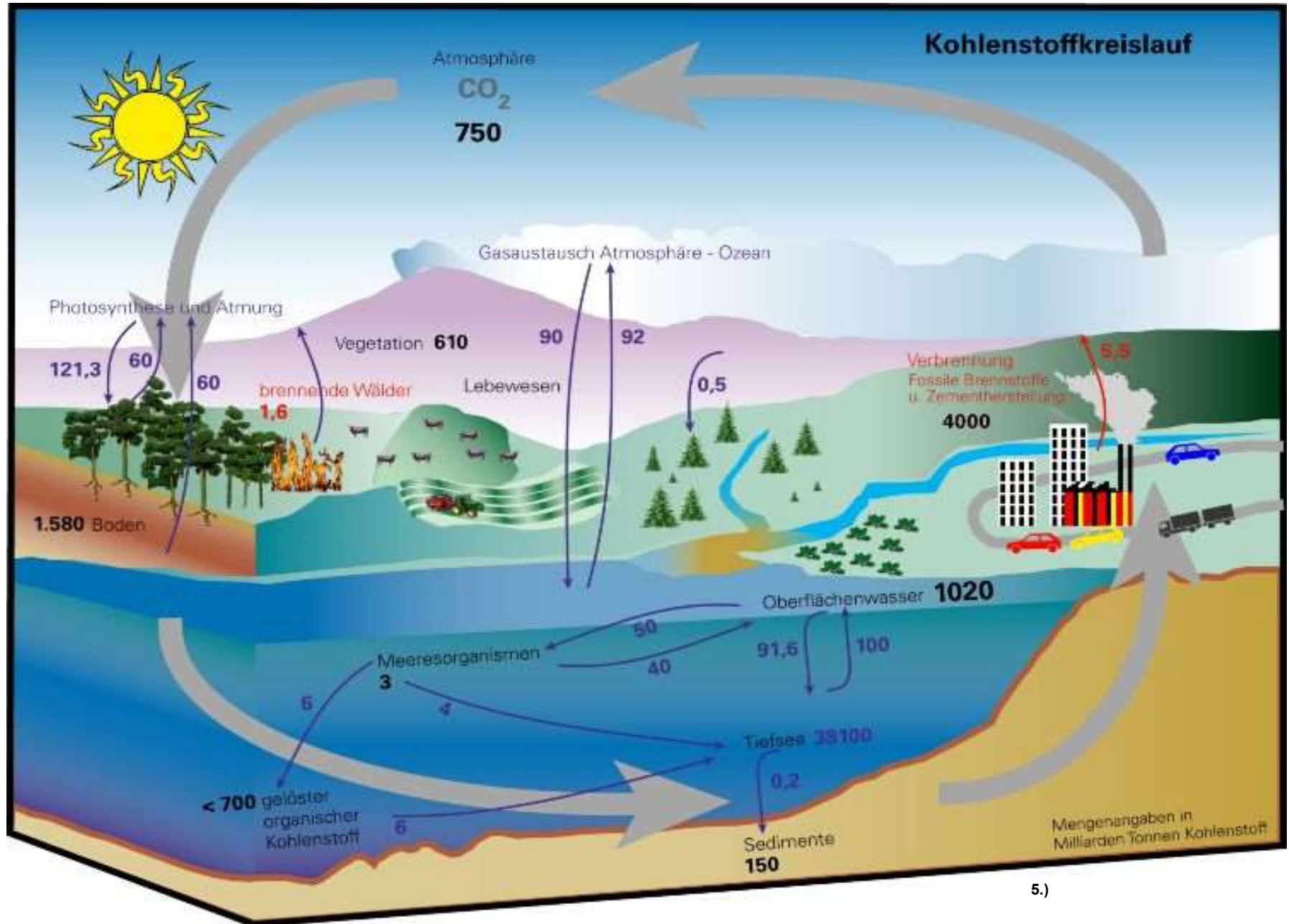
# Kohlenstoffkreislauf

- \* **Überlagerung eines kleinen Kohlenstoffkreislaufs**  
(Biosphäre)  
**mit einem großen Kohlenstoffkreislauf**  
(Geosphäre)
- \* **Nur Holz wird als fossiler Brennstoff natürlich nachgebildet**  
(Endlichkeit von Erdöl, Erdgas, Kohle)
- \* bedeutendstes Aufnahmesystem für Kohlenstoff: Ozean  $\Rightarrow$  ca. 38 Mrd. t  
(Hydrogencarbonate)
- in Atmosphäre Zuwachs von Kohlenstoff zu verzeichnen  $\Rightarrow$  ca. 3 Mrd. t ( $\text{CO}_2$ )
- \* Die Lithosphäre ist der weitaus größte Kohlenstoffspeicher im System Erde.  
Etwa 99,95 % des Kohlenstoffs auf der Erde ist im Sedimentgestein enthalten,  
in Form von Carbonat und Kerogen, das hauptsächlich aus im Gestein vorhandenen  
organischen Stoffen wie Ölschiefer  
Kohlenstoff in der Lithosphäre auch in organischer Form als Erdgas, Erdöl und Kohle  
und in elementarer Form als Graphit oder Diamant vor.

## **Chemische Formen des Kohlenstoffs**

- Elementarer Kohlenstoff (Russ, Graphit...)
- Carbonate, Hydrogencarbonate
- Gase (Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, flüchtige KW)
- Feste und flüssige Kohlenwasserstoffe...Organika

# Der Kohlenstoffkreislauf



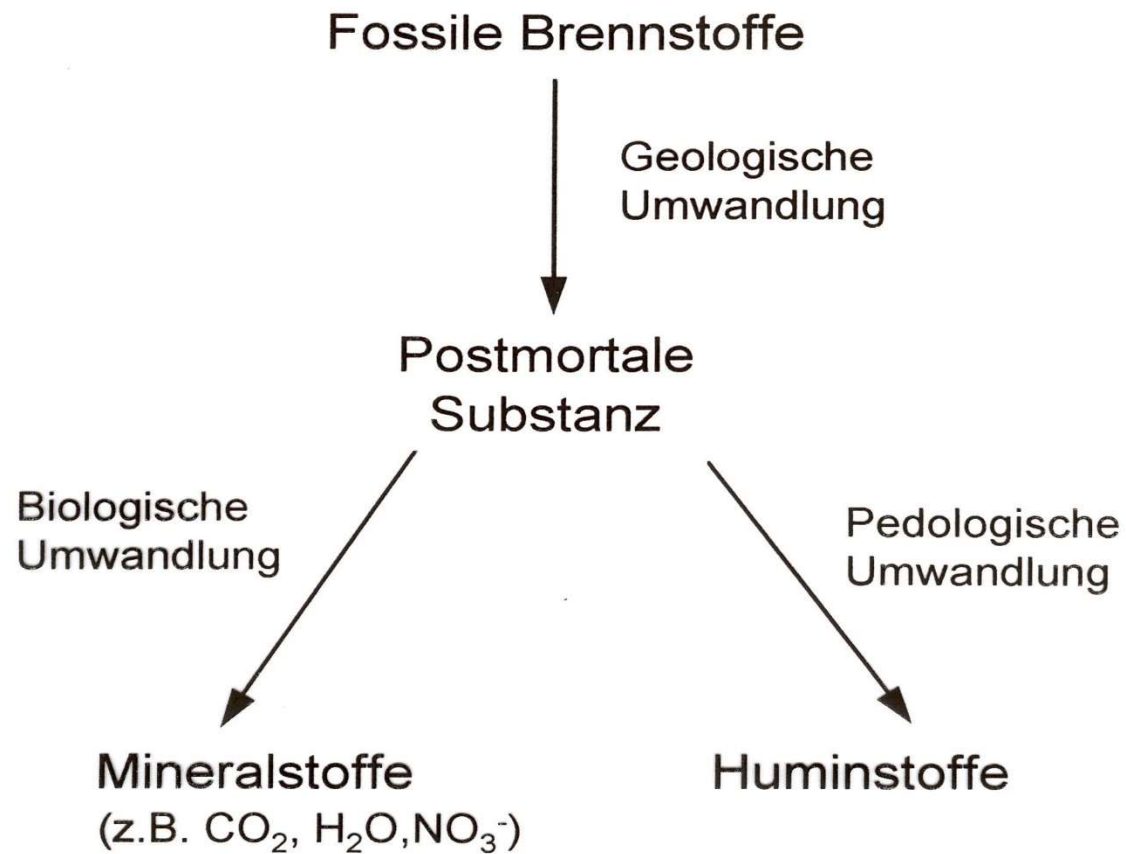
# Kohlenstoffkreislauf

- **Hauptprozesse:**

- CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei Verbrennungsprozessen
- CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei Atmung (biologisch)
- CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch Gesteinsverwitterung
- CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch Vulkanismus
- CO<sub>2</sub>-Verbrauch bei Photosynthese (biologisch)
- CO<sub>2</sub>-Lösung (physikalisch) in Wasser
- Einlagerung von Carbonat und organischem Kohlenstoff in maritime Sedimente

**CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen Biosphäre und Atmosphäre ist schnell und bestimmt kurzzeitige Schwankungen**

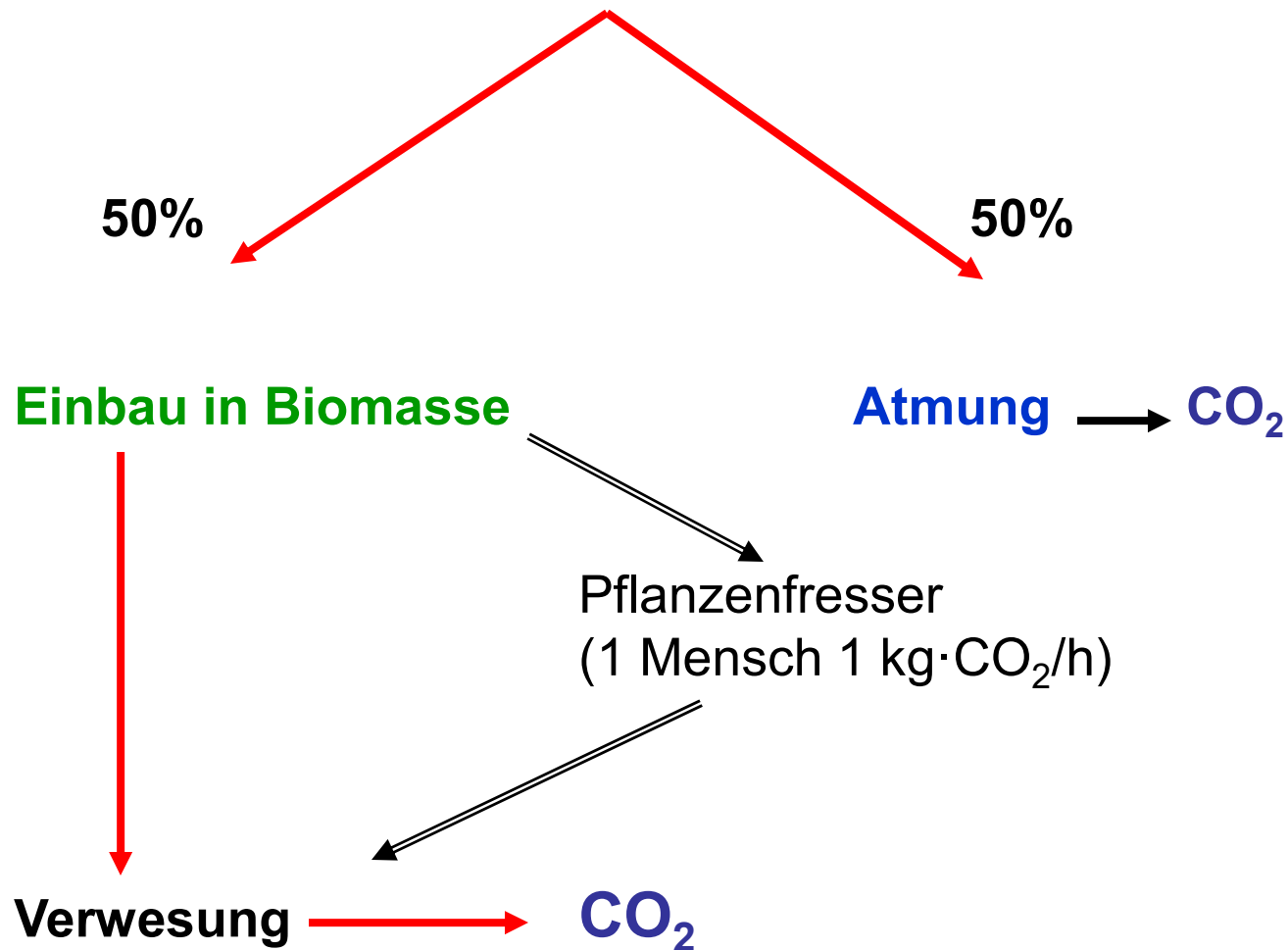
# Umwandlungswege postmortaler Substanzen





# Kohlenstoff und Photosynthese

- jährlicher Umsatz bei Photosynthese: ca. 120 Mrd. t C



- Sedimentierung (nur etwa 0,1 Mrd. t/Jahr)

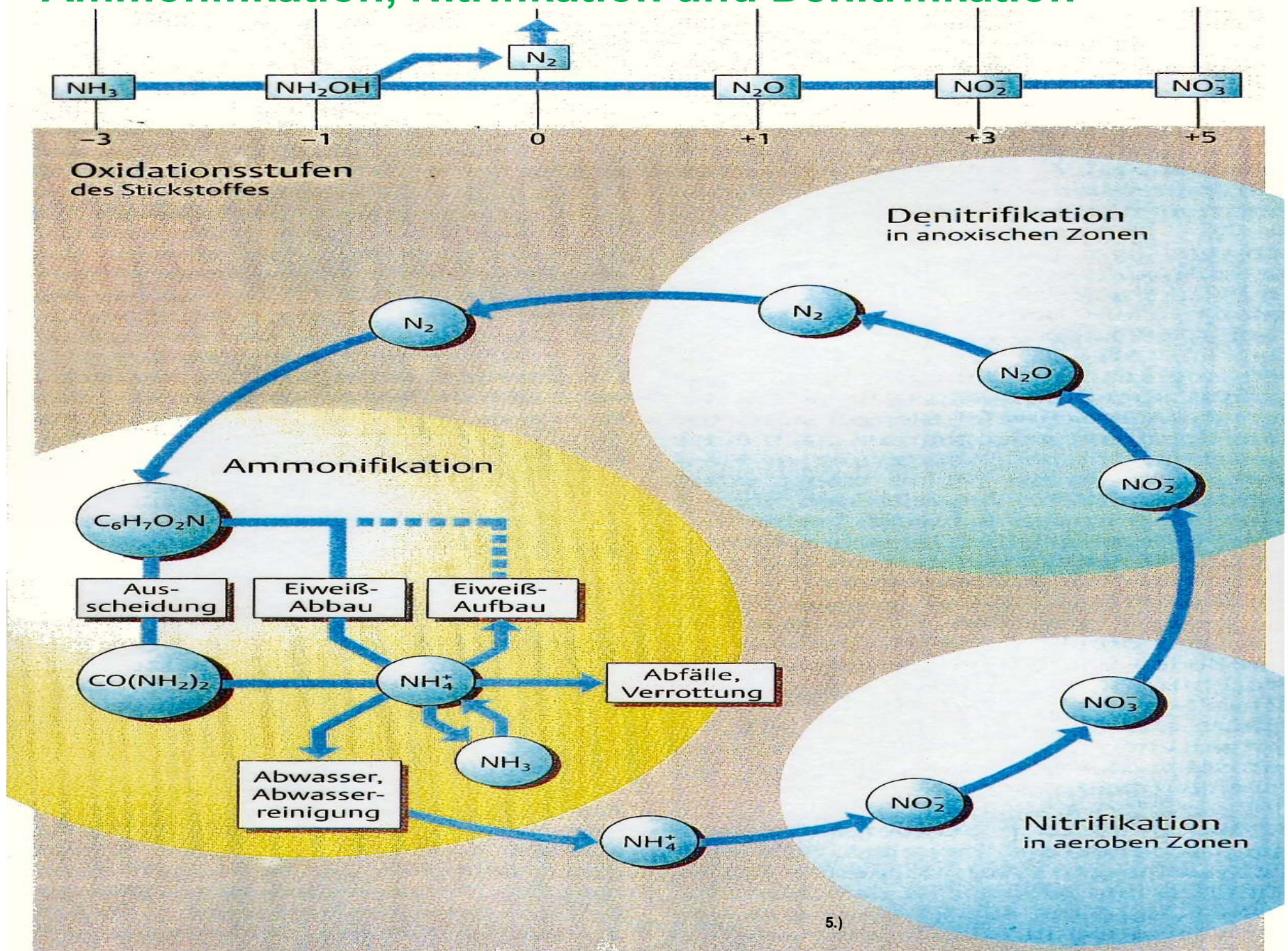
**- Stickstoffkreislauf**

# Der Stickstoffkreislauf

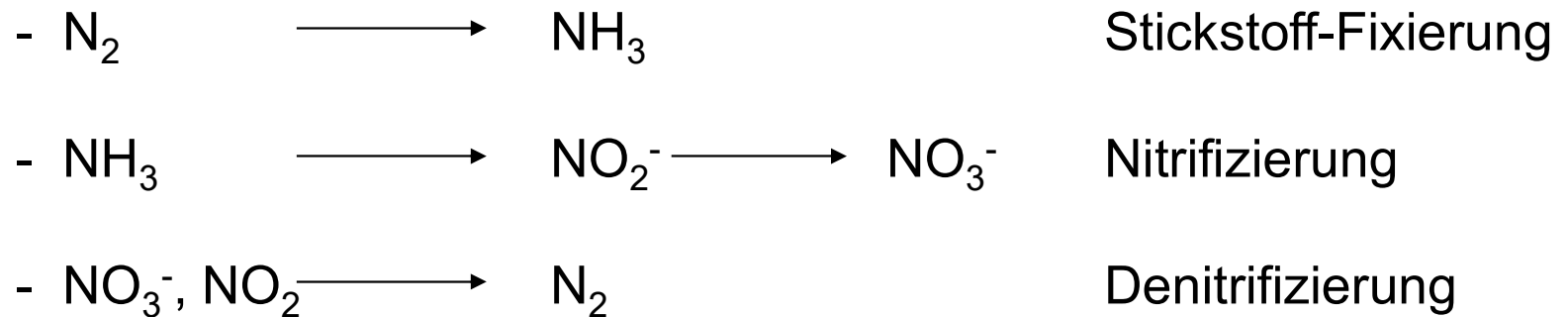
- wichtiges Grundelement für alle Lebewesen, in Eiweißmolekülen bis zu 17 % enthalten
- Stickstoffkreislauf ist komplex und die ablaufenden Reaktionen sind nicht alle im Detail bekannt
- **Besonderheiten des Stickstoffs:**
  - \* verschiedene stabile gasförmige Verbindungen in der Atmosphäre ( $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{NH}_3$ )
  - \* verschiedene Oxidationsstufen (+5 bis -3), die unter Energieumsatz ineinander umgewandelt werden können
- **Prozesse des Stickstoffkreislaufs:**
  - \*  $\text{N}_2$ -Freisetzung durch Bakterien und Einbindung in organische Verbindungen
  - \* Metallkatalyse in Enzymen (Nitrogenase)
  - \* Aufnahme von Stickstoffverbindungen durch Pflanzen (als  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )
  - \* Weitergabe von Stickstoffverbindungen in der Nahrungskette  
Pflanzen -> Tiere
  - \* Mineralisierung der toten organischen Substanz
  - \* Freisetzung anorganischer Stickstoffverbindungen
  - \* Übergang in molekularen Stickstoff ( $\text{N}_2$ )



# Ammonifikation, Nitrifikation und Denitrifikation



## Relevante Redox-Chemie des Stickstoffs

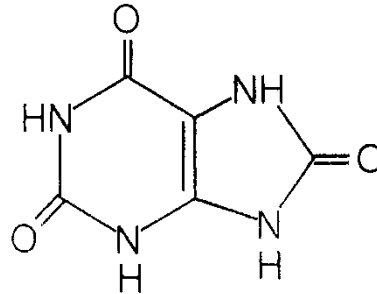
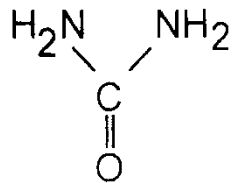


- Stickstoffgehalt der Atmosphäre: 78%  
allerdings fast ausschließlich als reaktionsträges  $\text{N}_2$



## Stickstoffumwandlung

- Pflanzen nehmen Stickstoff als  $\text{NH}_4^+$  oder  $\text{NO}_3^-$  auf; Nitrat wird sofort in den Wurzeln zu  $\text{NH}_4^+$  reduziert  $\Rightarrow$  Stickstoffassimilation
- Tiere können „anorganischen“ Stickstoff nicht verwerten, Aufnahme von Aminosäuren über pflanzliche oder tierische Nahrung
- Ausscheidung von Stickstoff in Form von Harnstoff bzw. Harnsäure

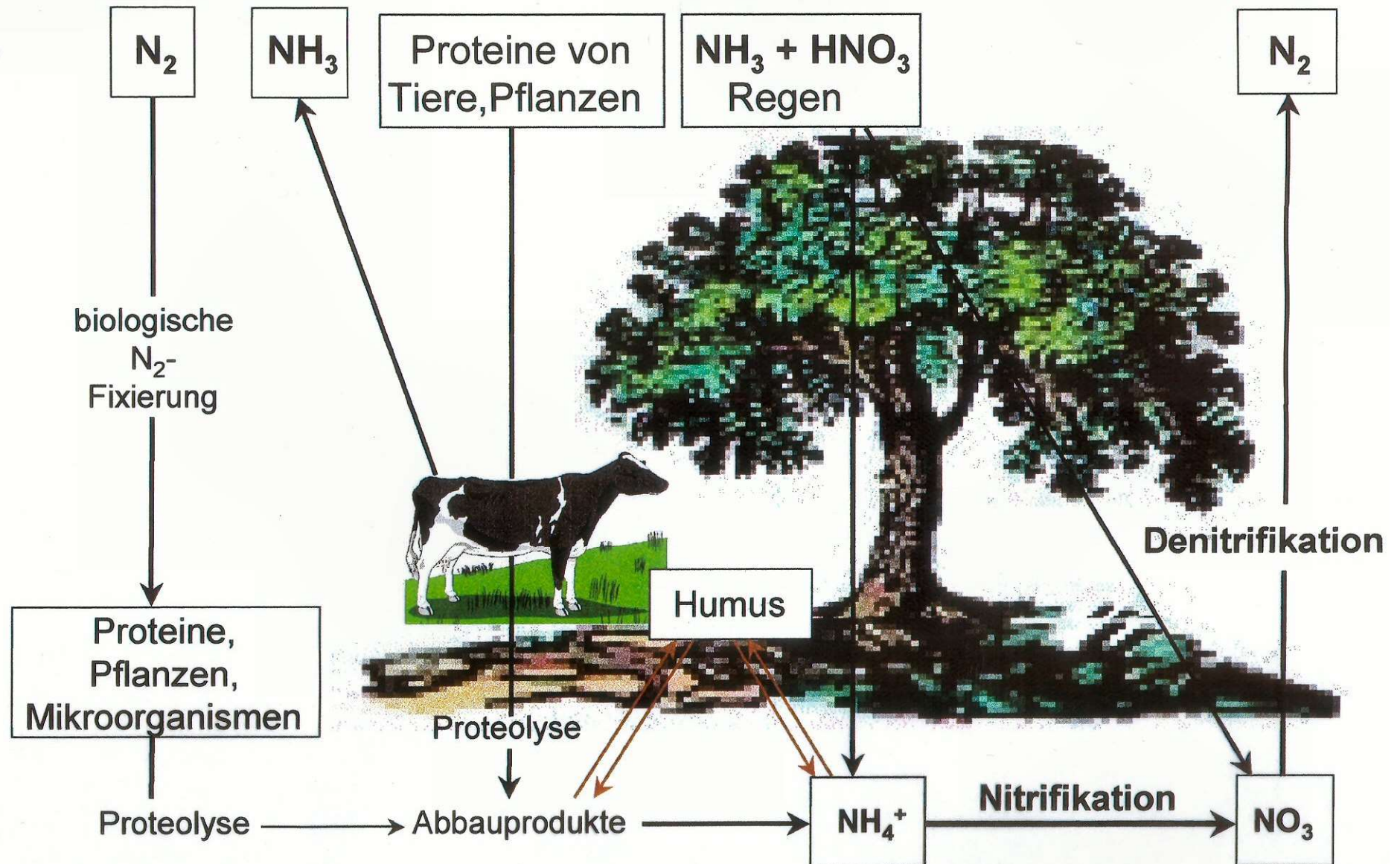


- Umwandlung von  $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$  in  $\text{N}_2$  durch Bodenbakterien (denitrifizierende Bakterien) schließen den Kreislauf; ansonsten wäre der  $\text{N}_2$ -Vorrat der Atmosphäre in ca. 20 Mio. Jahren verbraucht

## Stickstofffixierung

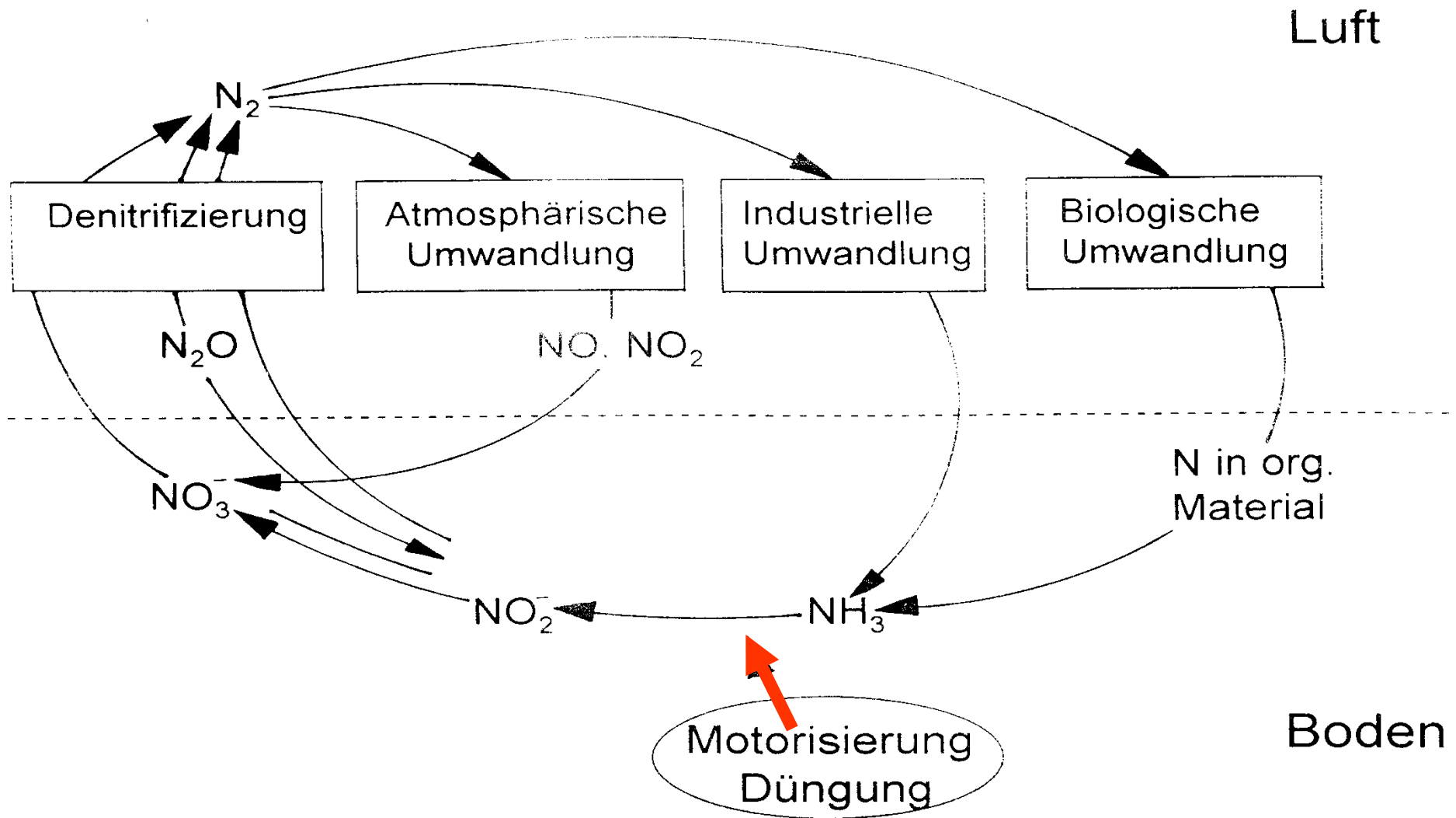
- Stickstoff-Fixierung durch Metallenzyme (Nitrogenase)
- in Mikroorganismen (Bakterien, Algen) durch Reduktion

# Stickstoffkreislauf



Kreisläufe können sich verändern durch z.B. verändertem industriellen oder/und landwirtschaftlichen Einfluss.

## Stickstoffkreislauf





**- Schwefelkreislauf**

# Schwefelkreislauf I

- Störung des Schwefelkreislaufs durch anthropogene Oxidation  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Produktion, Abbau sulfidischer Erze oder elementaren Schwefels
  - natürliche Emission gasförmiger Schwefelverbindungen: 45 bis 100 Mio. t Schwefel/Jahr
    - \*  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}(\text{CH}_3)_2$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{COS}$  aus Lebensprozessen
    - \* 5 - 10 Mio. t S als  $\text{SO}_2$  aus Vulkanismus
  - anthropogene Emission ca. 90 Mio. t Schwefel/Jahr
- Reaktionen in der Atmosphäre
  - Oxidation zu  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$
  - Bildung von  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und Ausregnung
- **Schwefelzyklus ist kein kompletter Kreislauf**
  - $\Rightarrow$  gerichteter Prozess durch fortgesetzte Oxidation  $\text{S}^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$
  - $\Rightarrow$  Grund  $\text{O}_2$ -Gehalt der Atmosphäre

# Schwefelkreislauf

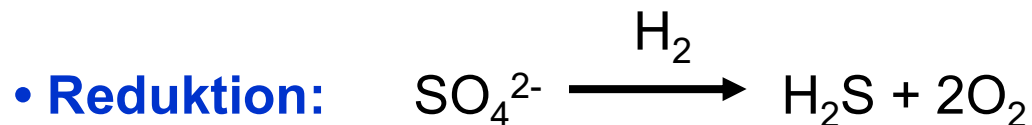
## II

- Schwefel ist ein wichtiger Bestandteil von Eiweißstoffen
- unlösliche Sulfate werden dem Kreislauf in großen Mengen entzogen

### Reaktionen im Schwefelkreislauf:

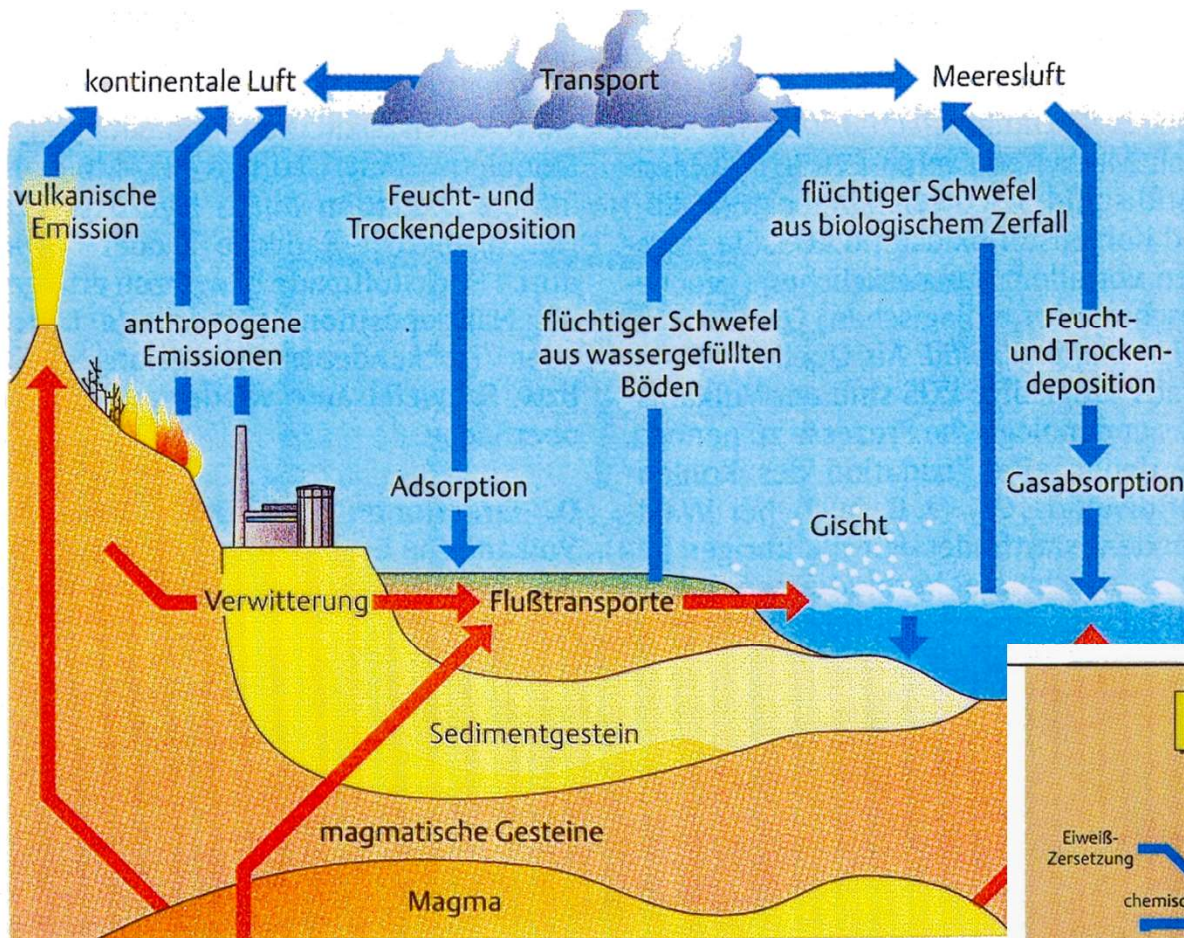


- Energiegewinn für anaerob lebende Bakterien
- $\text{S}_8$  ist dabei bis 95% der Masse der Bakterien



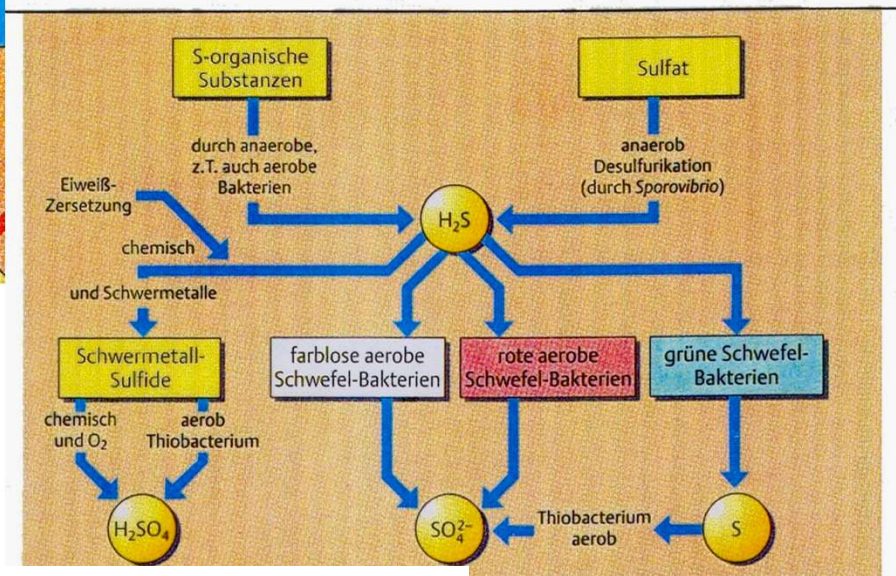
- Deckung des  $\text{O}_2$ -Bedarfs in sauerstoffarmer Umgebung
- Tiefsee, Faulschlämme

# Schwefelkreislauf



Globaler Kreislauf

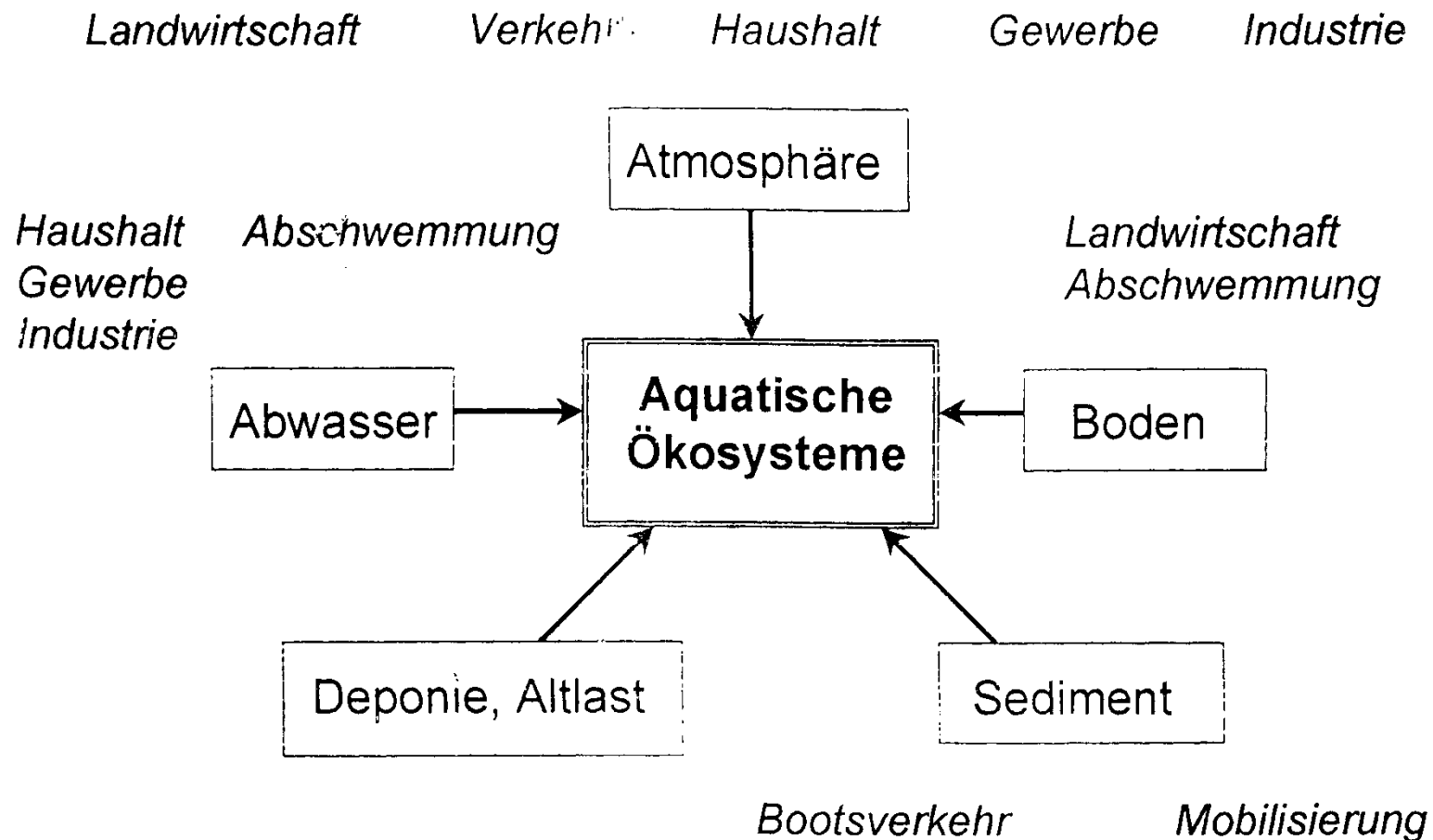
5.)



Biochemischer Kreislauf

### **5.3.2 Natürlicher Abbau von Chemikalien**

# Quellen von Umweltchemikalien am Beispiel aquatischer Ökosysteme



# Senken von Umweltchemikalien

Prozesse, die zum Zersetzen der Chemikalie und somit zur Elimination aus der Umwelt führen:

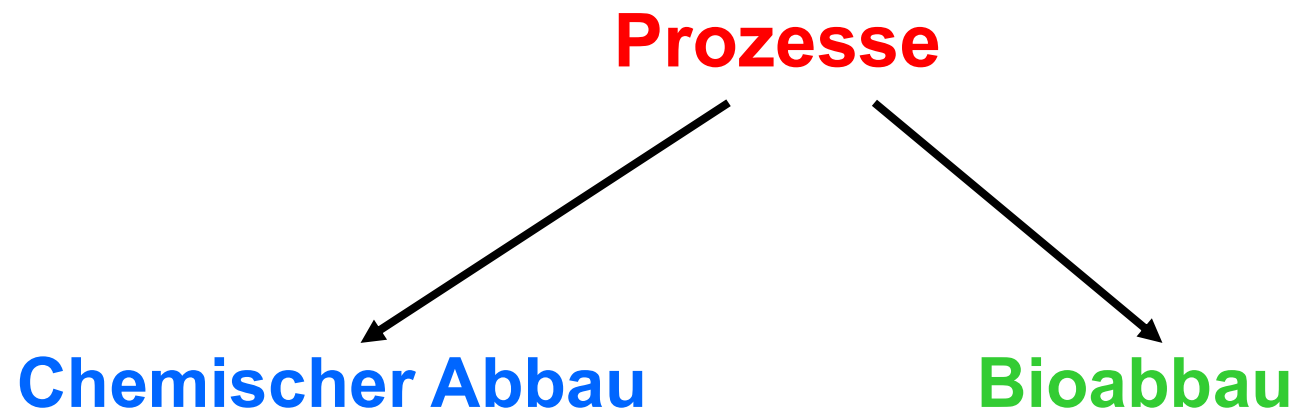
**- *Elimination durch chemische, photochemische und biologische Prozesse***

- \* kein Verteilen „Verschwinden“ durch Verdünnen
- \* nicht Übergang von einem in das andere Umweltkompartiment

Chemikalie auch dann als persistent zu betrachten, wenn das Umwandlungsprodukt selbst ein Schadstoff ist und nicht weiter abgebaut wird

- |   |                    |                                 |
|---|--------------------|---------------------------------|
| ⇒ | hohe Persistenz    | - Umwandlungsrate langsam       |
|   | geringe Persistenz | - Mineralisierung erfolgt rasch |

## Natürlicher Abbau von Umweltchemikalien:





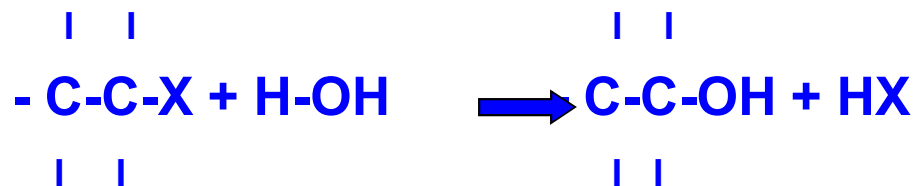
**- Chemischer Abbau**

# Chemischer Abbau

- es müssen geeignete **Energiequellen** und **Reaktionspartner** vorhanden sein
- dadurch unterschiedliche Prozesse in Luft, Wasser, Boden
- **Energiequellen:** Licht, Wärme der Umgebung
- **Reaktionspartner** / wesentliche chemische Prozesse des Abbaus:
  1. **Hydrolyse** (**Wasser**, Katalyse von Säuren oder Basen)
  2. **Oxidation** (photochemisch, radikalisch, angeregter **Sauerstoff**)
  3. **Reduktion** (Elektronenaufnahme,  
z.B. mittels Mikroorganismen in Sedimenten)
- *Chemischer Abbau oft Kombination Hydrolyse mit Oxidation/Reduktion*

# 1. Hydrolyse

- Spaltung einer C-X-Bindung unter Einbeziehung eines Wassermoleküls



- Katalyse von Säure (H<sup>+</sup>) oder Base (OH<sup>-</sup>)
- Reaktionsgeschwindigkeit pH-abhängig, alkalisches Reaktionsmilieu begünstigt Hydrolyse
- erhöhte Temperatur und Anwesenheit von Metallkationen steigert die Reaktionsgeschwindigkeit
- natürliche Metallkonzentration meist zu gering für katalytische Wirkung

## 2. Oxidation

- Reaktion mit reaktiven Sauerstoffspezies (atomar, molekular, angeregter Sauerstoff, Ozon, OH-Radikal)
- Bildung in Luft und Wasser photochemisch bzw. enzymatisch

\* z.B. Sauerstoffmolekül als Biradikal, Elektronen ungepaart, mit reaktionsfähigen organischen Molekülen Radikalbildung



⇒ Zusammentreffen zweier Radikale - Abbruch der Kettenreaktion  
(Ranzigwerden von Ölen/Fetten, Alterung von Kunststoffen)

⇒ Autoxidation von Vorläufern der Huminsäuren zu Huminsäuren

## - Reaktionen mit molekularem Sauerstoff (Autoxidation)

- Sauerstoffmolekül als Biradikal, Elektronen ungepaart, mit reaktionsfähigen organischen Molekülen Radikalbildung, über Peroxid wird die Reaktion in Gang gehalten



- Zusammentreffen zweier Radikale – Abbruch der Kettenreaktion (Ranzigwerden von Ölen/Fetten, Alterung von Kunststoffen)
- Autoxidation von Vorläufern der Huminsäuren zu Huminsäuren

## **- Reaktionen mit Sauerstoffatomen**

- Entstehen in höheren atmosphärischen Schichten durch Spaltung des Sauerstoffmoleküls unter dem Einfluss kurzwelliger UV-Strahlung, in niedrigeren Schichten (Troposphäre) ist Spaltung von  $\text{NO}_2$  durch UV-Strahlung wichtigste Quelle
- Reagiert mit Doppelbindungen zu Epoxiden, Epoxidbildung auch mit Aromaten – Folgereaktionen sind Ringöffnungen unter Bildung von  $-\text{CHO}$  und  $-\text{OH}$ -Gruppen

## **- Reaktionen mit Ozon**

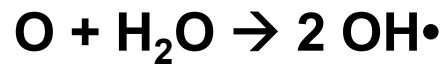
- Reaktion von Sauerstoffatom mit Sauerstoffmolekül (Quelle: Spaltung von  $\text{N}_2\text{O}$  zu  $\text{NO} + \text{O}$  unter UV-Strahlung z.B.)
- Reaktion von Ozon mit Doppelbindung von Olefinen zu Aldehyden, Ketonen, Carbonsäuren (natürliche Olefine Isoprene, Terpentine durch Wälder freigesetzt, anthropogen: Eintrag von Ethen, Propen z.B.)

## **- Reaktionen mit angeregtem Sauerstoff**

- ein Elektron des obersten antibindenden Orbitals geht unter Spinumkehr Elektronenpaarung mit dem zweiten anti-bindenden Orbital ein
- der Zustand ist relativ stabil (Konzentration des angeregten Zustandes in Wasser  $10^{-12}$  M bei 25°C)

## **- Reaktionen mit Hydroxylradikalen**

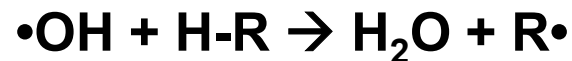
**→ Wichtigste Quelle ist die Reaktion von Sauerstoffatomen mit Wasser (Abbau von Spurenstoffen in der Troposphäre)**



**→ Lebensdauer von Hydroxylradikalen ca. 1 s**

**→ Wechselwirkungen mit organischen Substanzen**

**Wasserstoffabspaltung**



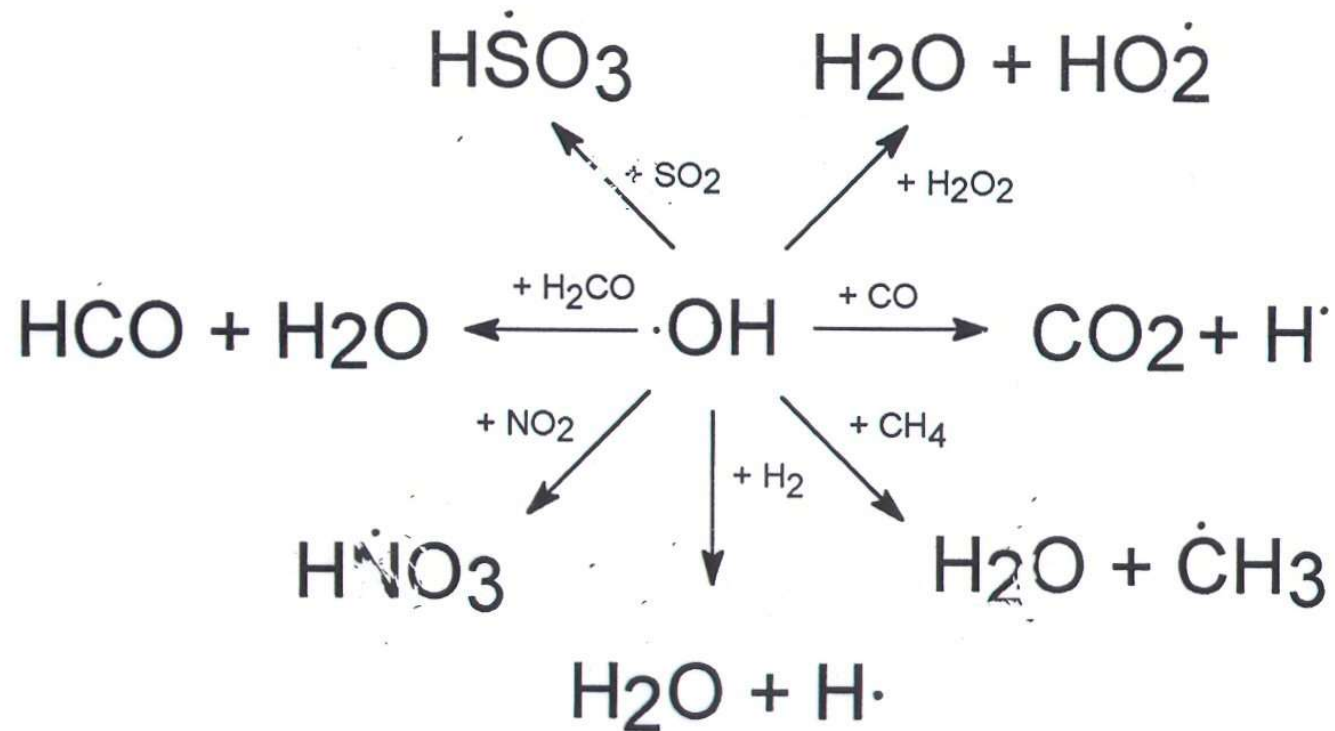
**Anlagerung an Doppelbindungen (Olefinen, Aromaten)**





# Reaktionen von Hydroxylradikalen mit verschiedenen atmosphärischen Spurenkomponenten

(aus Parlar und Angerhöfer 1991)



## **- Photochemische Reaktion**



Oder:



### 3. Reduktion

- unter anaeroben Bedingungen, die in vielen Sedimenten herrschen laufen **Reduktionen** von Umweltchemikalien ab
- erforderlichen Elektronen sollen beim Abbau von organischen Material direkt auf Schadstoffe/Umweltchemikalien übertragen werden
- es sind Mikroorganismen bekannt, die Elektronen direkt auf organische Moleküle übertragen können

**- Bioabbau**

# Bioabbau

- **Bioabbau** ist die Mineralisierung von organischen Stoffen vor allem durch Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Algen)
- Maß der Persistenz von organischen Stoffen (Schadstoffen) ist die Bildungsrate von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$
- Bioabbau ist an Wachstum der Mikroorganismen gekoppelt; „**Organisches Substrat kann Schadstoff selbst sein ...**“



Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen verbessern

## - Bedingungen für den Bioabbau I

- Elimination von Schadstoffen ist verbunden mit Zunahme der Bakterienbiomasse  
(z.B. in Gewässern und Böden, in Kläranlagen)
- Bakterien benötigen Kohlenstoff- und Energiequellen

### \* Energie:

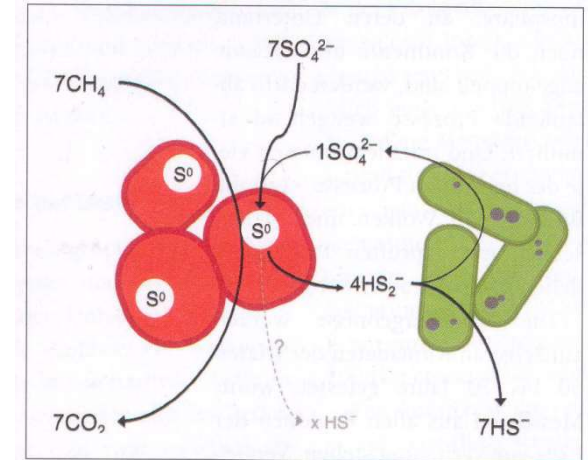
Energiegewinnung prinzipiell aus Oxidation anorganischer Verbindungen oder durch Photosynthese

### \* Kohlenstoff:

Bakterien benutzen  $\text{CO}_2$  – autotroph,  
Nutzung organischer Verbindungen – heterotroph

### - weitere Elemente:

- Schwefel:  $\text{S}_8$  wird als Sulfat aufgenommen,
  - Stickstoff:  $\text{N}_2$  in Ammonium- oder Nitratform
  - Sauerstoff: stammt aus  $\text{CO}_2$  oder organischer Substanz
- aerobe Organismen benötigen Luftsauerstoff  
anaerobe Organismen benötigen sauerstofffreies Milieu



M. Groß Nachrichten aus der Chemie 61, 2 (2013)

- pH-Wert: Bakterien wachsen am besten am Neutralpunkt
- Temperatur: zeigen temperaturabhängiges Wachstum

## **- Bedingungen für den Bioabbau      II**

- **Schadstoffelimination ist verbunden mit Zunahme der Bakterienbiomasse (in Gewässern und Böden, in Kläranlagen)**
- **neu gebildete Biomasse ist zugleich Adsorbens für zahlreiche, weniger gut abbaubare Stoffe (bei Abwasserreinigung schadstoffbeladene Biomasse bildet den Klärschlamm)**
- **im Boden bleiben Mikroorganismen als organische Substanz erhalten dadurch**
  - **Verzögerung des Schadstoffeintrags z.B. in das Grundwasser**
  - **Gleichgewicht Adsorption-Desorption (Änderung bei Änderung der Parameter)**
  - **adsorbierte Schadstoffe können anderen Mikroorganismen als Substrat dienen**
  - **auch Sorption, chem. Reaktionen mit Bodenbestandteilen, damit Entzug des Schadstoffes der Bioverfügbarkeit**
- **Prüfung der Abbaubarkeit durch Mikroorganismen (Testverfahren)**
  - **Abnahme der Substanzkonzentration**
  - **Bildung von CO<sub>2</sub> aus der Testsubstanz**
  - **Verbrauch von Sauerstoff beim Abbau der Testsubstanz**
  - **Chemikalienprüfung: ab welcher Konzentration der Prüfsbstanz eine Reduktion der bakteriellen Atmung um 50% auftritt**

## **- Bedingungen für den Bioabbau III**

### **- Nährstoffansprüche der Mikroorganismen**

- \* Spurenelemente wie Mn, Zn, Cu, Mo, Co, Ni, V, Se, W limitieren nur bei sehr hohen Konzentrationen das Wachstum**
- \* Angebot an organischem Substrat muß in günstigem Verhältnis zu Spurenelementkonzentration stehen**
- \* einige Mikroorganismen benötigen zusätzlich Vitamine, Aminosäuren oder Purine als Wachstumsfaktoren**



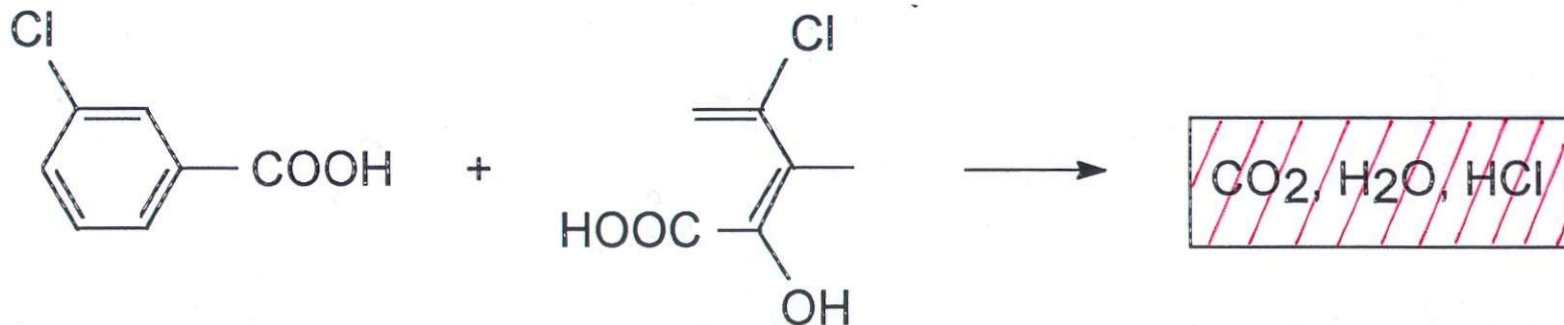
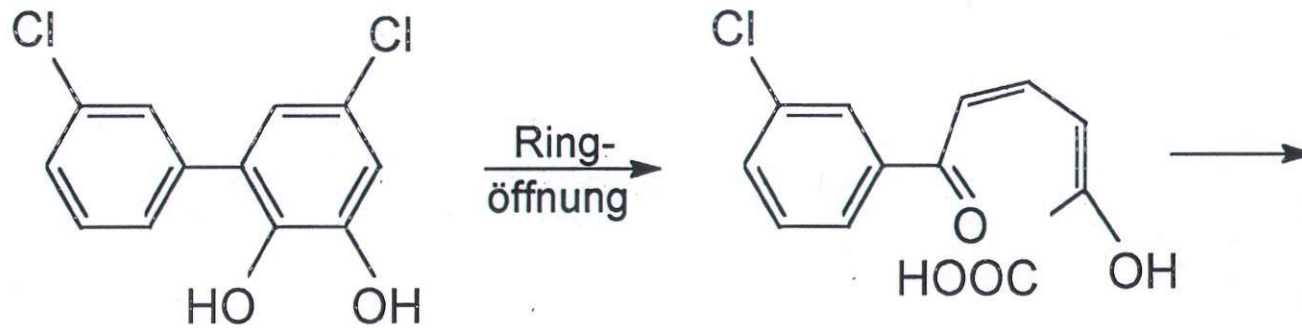
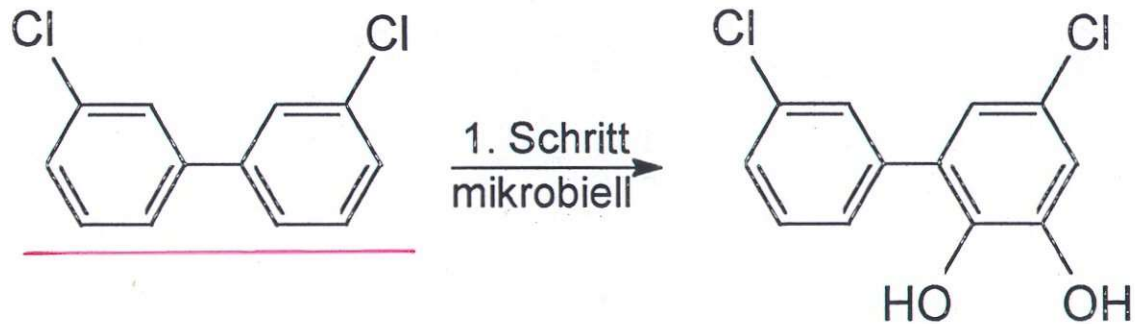
# Ausmaß der biologischen Mineralisierung einiger Chemikalien in einer Bodensuspension unter anaeroben Bedingungen

Das unter anaeroben Bedingungen gebildete Methan wurde nicht erfasst, so dass die tatsächliche Mineralisierung größer als angegeben sein kann.

(nach Parlar/Angerhöfer 1991, verändert)

Substanz	Versuchsdauer (d)	CO <sub>2</sub> nach 5 d (%)		CO <sub>2</sub> nach Versuchsende (%)		Rückstand im Wasser nach Versuchsende (%)	
		aerob	anaerob	aerob	anaerob	aerob	anaerob
<b>Harnstoff</b>	5	66,3	70,1	66,3	70,1	23,3	18
p-Chloranilin	56	1,5	-	3	2,3	14,6	22,1
Diethylhexylphthalat	56	5,6	2,9	11,6	8,1	14,4	14,3
Anthrazen	14	0,1	0,3	1,3	1,8	1,6	1,8
Trichlorethen	14	1,8	2,5	3,5	4,2	12,4	11
Lindan	42	0,4	0,4	1,9	3	3,1	2,2
<b>DDT</b>	42	0,1	0,3	0,8	0,7	2,4	2

## Abbauweg von PCB

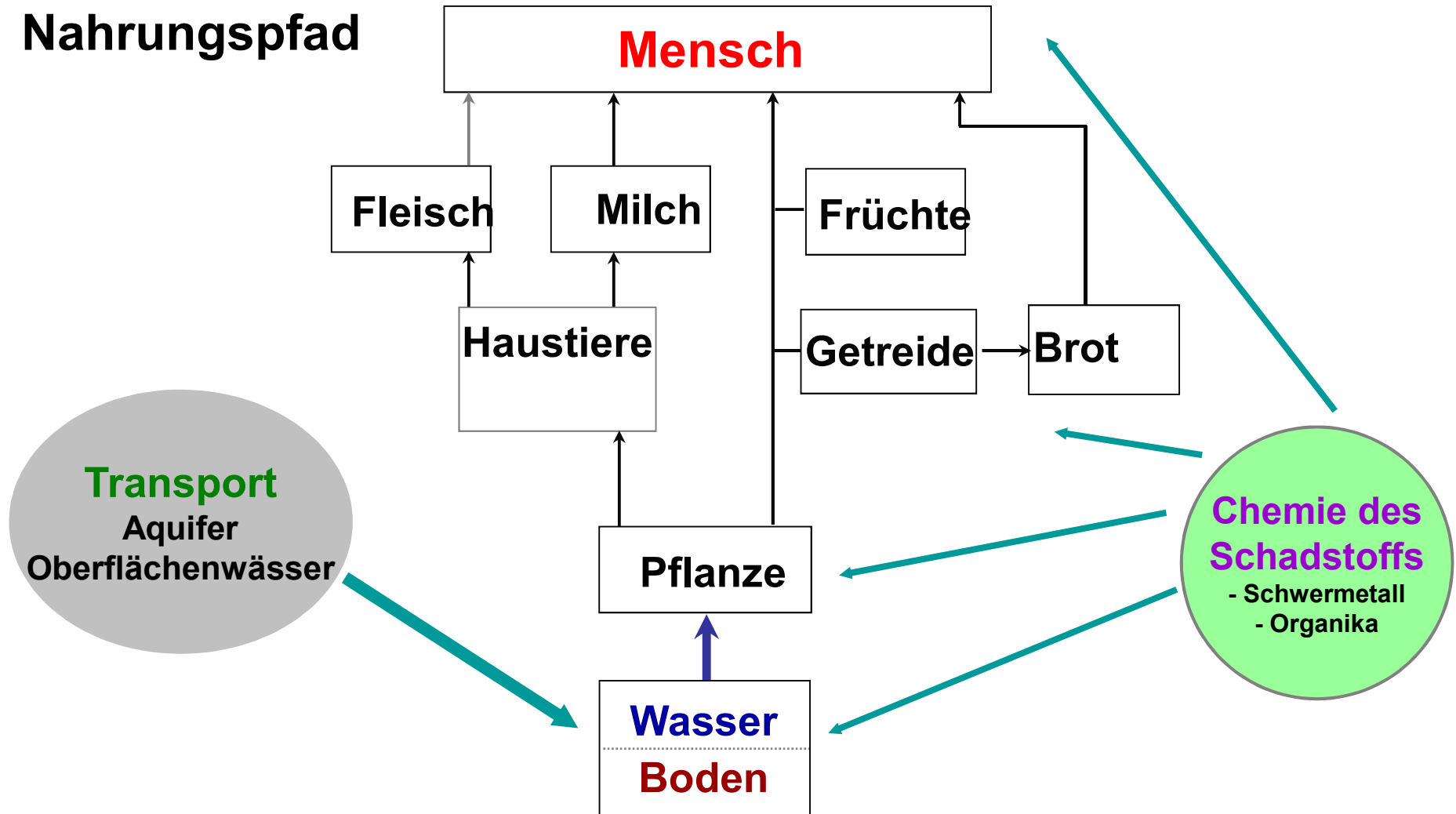


## **6.0 Schwermetalle und Biosysteme**

## **6.1 Nahrungspfad**

Welche Bedingungen und Eigenschaften dominieren die Verteilung der Schadstoffe (Schwermetalle) Innerhalb der verschiedenen Kompartimente des Nahrungspfad.  
Nahrungskette in Teilsysteme gliedern, summarische Transferfaktoren auf der Grundlage thermodynamischer Daten erklären.

## Nahrungspfad



***Für Bioverfügbarkeit, Toxizität und Transportverhalten nicht nur Konzentration an Metall, sondern auch dessen chemische Form wichtig!***

## **Chemische Speziation / Bindungsform**

### **Definition:**

**Chemischer Zustand eines Elementes unter definierten chemisch-physikalischen Bedingungen**

### **Einflussparameter auf die Speziesverteilung:**



# Chemische Speziation/Bindungsform

## Definition:

Chemischer Zustand eines Elementes unter definierten chemisch-physikalischen Bedingungen

## Einflussparameter auf die Speziesverteilung:

- Konzentration der Elemente
- Ionenstärke (Aktivitätskoeffizient)
- organische und anorganische Komplexbildner
- Temperatur, Druck (Gasgleichgewichte)
- pH-Wert
- Redoxpotential (Sauerstoffgehalt)
- vorhandene feste Phasen (Art, Struktur der Oberfläche)
- Kolloide
- Mikroorganismen, Pilze

## Methoden der Speziationsbestimmung (allgemein)

\* Unterscheidung nach indirekten und direkten Methoden zur Bestimmung der Speziation (Auswahl):

**indirekt:** *Beobachtung einer chemischen Reaktion und davon wird die Speziation abgeleitet:*

Solvent Extraktion, Ionenaustausch, Adsorption  
Co- Präzipitation

**direkt:** *Spektroskopische Methoden, die die Speziation bestimmen ohne die Ausgangsspeziation zu verändern:*

Absorptionsspektroskopie, Laser-induzierte  
Fluoreszenz- und Photoakustische Spektroskopie,  
Röntgenabsorptionsspektroskopie



## Transport / Migration

### **Migration = Wanderung**

- Verhältnis von Mobilisierung und Immobilisierung / Retardierung der Schwermetalle
- abhängig von Geschwindigkeit der wässrigen Phase
- abhängig von chemischen Zustand/Speziation der Schwermetalle
- Schwermetalle können gelöst und kolloidal transportiert werden

# Transport von Schwermetallverbindungen in Luft, Wasser, Boden

- Verteilung zwischen den Kompartimenten

**Transport - Transfer - Transformation**

- Luft:

Gasgelöst (Partialdruck), an Schwebstoffe/Aerosole gebunden

- Wässrige Phase:

Echt gelöst ( $<1$  nm Ø) und /oder kolloidal, partikulär

- Boden:

Transportmittel ist Wasser = mobile Phase,  
Boden/Gestein = Festphase  
(Sorption / Desorption / Ausfällung)

# Stoffkreislauf der Schwermetalle (SM) I

## Atmosphäre:

- SM gelangen durch Abluft in die Atmosphäre

Atmosphäre besitzt auch für die SM als Transportmedium Bedeutung!

*Beispiele: Globale Verbreitung von Blei (Blei-Tetraäthyl,  $C_8H_{20}Pb$ ) oder Edelmetalle (aus KfZ-Katalysatoren)*

- werden auf den Boden abgelagert
- geringer Teil der in den Boden gelangten SM wird von den Pflanzen aufgenommen
- Teil der SM gelangt über die Nahrungskette (über die Tiere oder auch direkt durch pflanzliche Nahrungen) in den menschlichen Körper,
- Pflanzen, Tiere und Menschen können die SM aber auch direkt aus der Luft aufnehmen

# Stoffkreislauf der Schwermetalle (SM) II

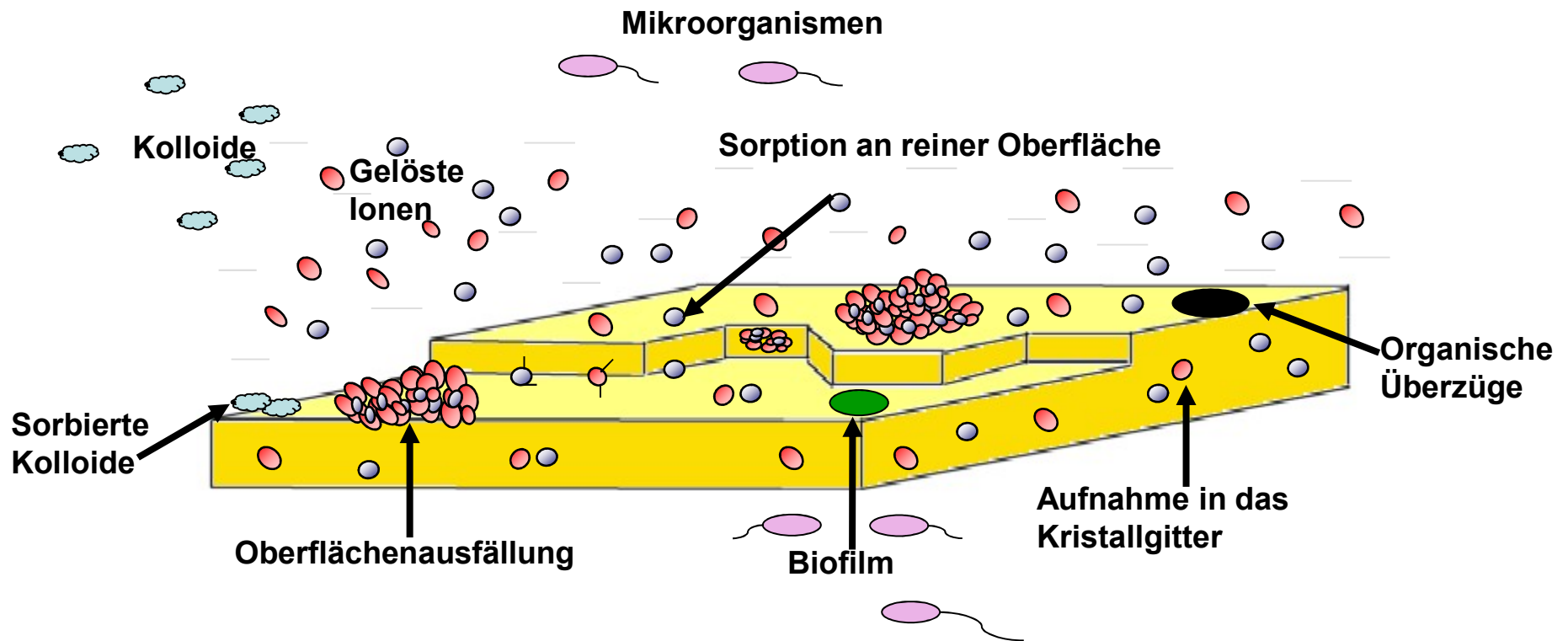
## *Oberflächengewässer:*

**SM gelangen in erster Linie aus Abwässern von Industrie und Haushalten in die Oberflächengewässer,**

- aber auch durch direkte Ablagerung SM-haltigen Staubes aus der Luft,**
- ein großer Teil der SM im Abwasser wird im Klärschlamm zurückgehalten,**
- Rest gelangt in Flüsse (evt. bis ins Meer),**

**Endstation: Sedimente von Flüssen, Seen und Meeren?**

# Metall - Wechselwirkungsprozesse im aquatischen System



## Schwermetallablagerung in Böden und Sedimenten

- Böden und Sedimente sind Senken für Schwermetalle, aber keine Endlager

## Prozesse zur Schwermetallausscheidung aus Wasser:

*\* Gleichgewichte beachten!*

- Ausfällung
- Mitfällung
- Sorption (Absorption, Adsorption, Chemisorption)
- Ionenaustausch (Tonminerale)
- Komplexbildung durch an Böden sorbierte Organika



*Parameteränderung: ...Auflösung, Desorption*

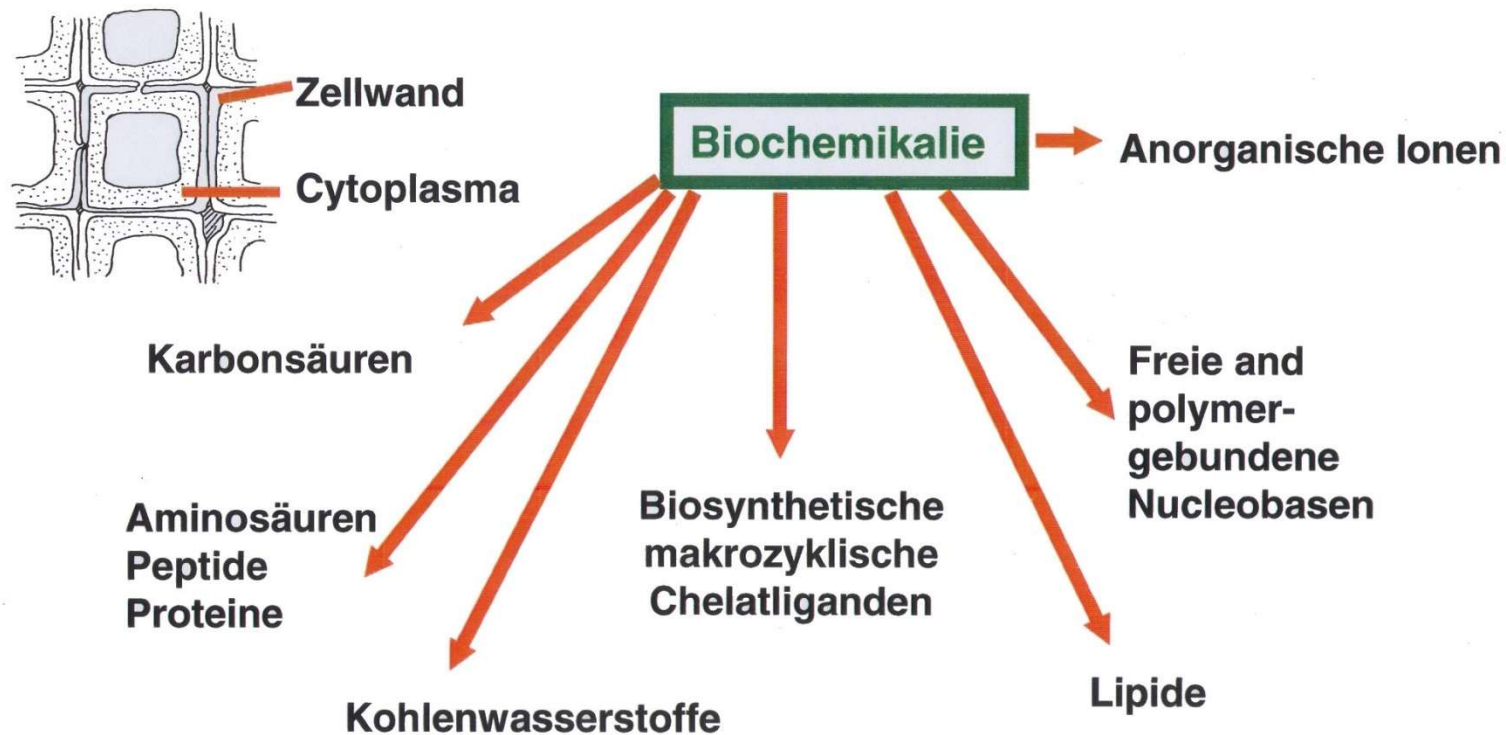
## **Geo-System**

### **Chemische Formen (Komplexe der Schwermetalle)**

- Carbonate
- Sulfate
- Silicate
- Chloride
- Phosphate
- Hydroxyl
  
- Gemischte Komplexe
  
- Komplexe mit Humin- und Fulvinsäuren
- Komplexe mit Holzabbauprodukten

# Bio-System

## Biorelevante Substanzen im Metabolismus der Pflanzen und bei der Wechselwirkung mit Schwermetallen







# Speziation vs. Migration

- umfassende Kenntnisse der Metallchemie notwendig

