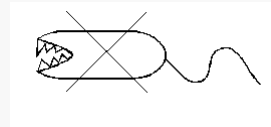


Einführung in die Mikrobielle Ökologie



Biogeochemische Kreisläufe

5

www.pmbio.icbm.de

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Alle Kreisläufe

Dogma der **biologischen Unfehlbarkeit**

Was auf biologischem Wege gebildet wurde, kann auch biologisch (**mikrobiell**) wieder abgebaut werden.

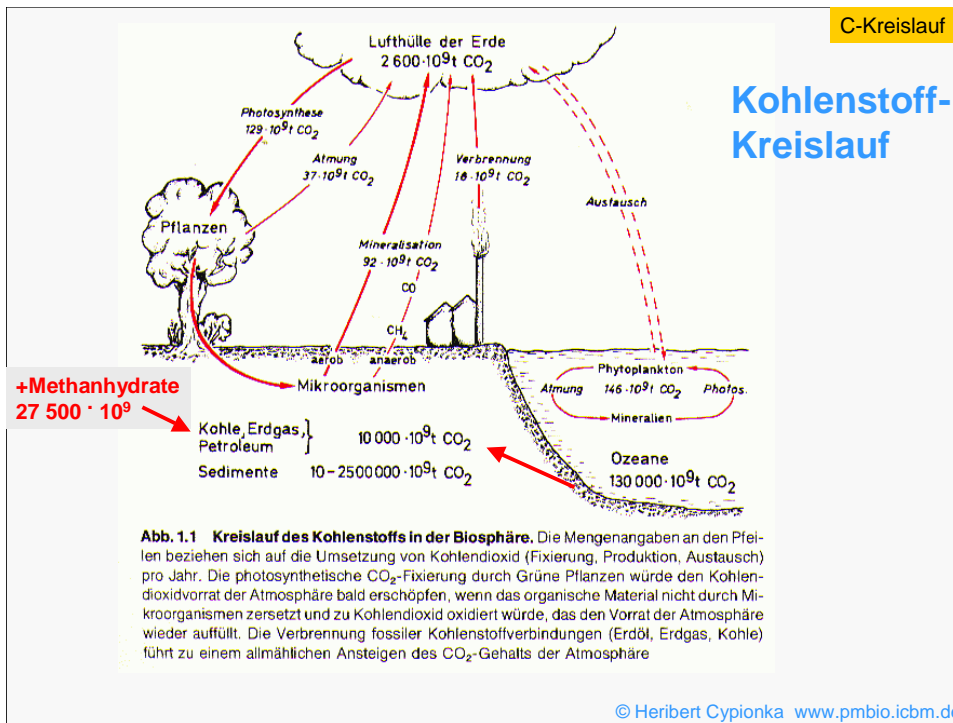
'mikrobiell' oder 'mikrobiologisch'?

'biotisch' oder 'biologisch'?

'**Mikrobiell**': durch Mikroben bewirkt
'**Mikrobiologisch**': die Wissenschaft M. betreffend

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Kohlenstoff-Kreislauf



Wie gut sind die biogeochemischen Kreisläufe?

 CO_2 -Umsatz global

CO_2 -Umsatz global		(10^9 t/a)
Photosynthese CO_2 -Fix. (< CH_2O >)	Land	129
	marin	146

Reservoirs

Reservoirs	(10^9 t CO_2)
Luft	2 600 (=0.034 Vol.%, steigend)
Ozeane	130 000
C_{red}	
Kohle, Öl, Gas	10 000
Sedimente, Methanhydrat	27 500
Lebende Biomasse (50 % Bakterien)	2 000

- **Produktion** aus >100 Jahren, die noch nicht recycled ist

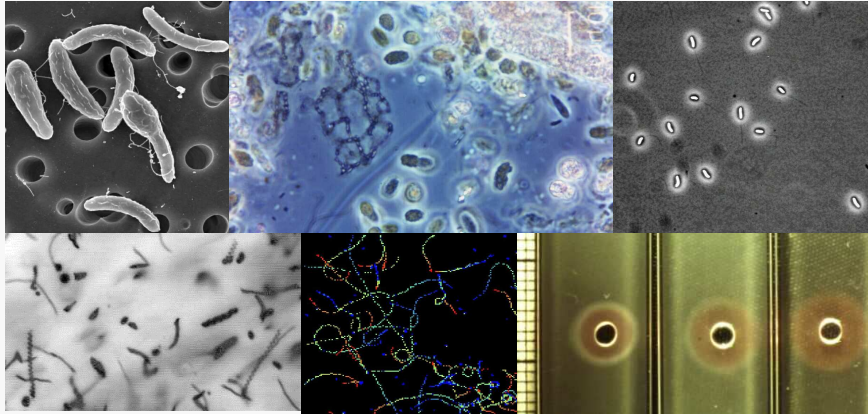
Aber

- Leben seit $3.5 \cdot 10^9$ Jahren, Entwicklung größerer Pflanzen an Land $\approx 0.5 \cdot 10^9$ a

> 99 % ist wieder abgebaut

- Der Luftsauerstoff (und noch mehr Oxidationkraft) stammt aus der verbleibenden Spur der nicht mineralisierten Biomasse
- Fossile Energievorräte ebenso

Uns gibt es nur, weil das
Dogma der biologischen
Unfehlbarkeit nicht ganz
verzögerungsfrei erfüllt wird.



© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Formeln für die Biomasse

Tabelle 2.2. Chemische Zusammensetzung einer Bakterienzelle

Komponente	Prozent der Trockenmasse	Pro Zelle ($\approx 10^{-15}$ l)	
		Anzahl Moleküle	Verschiedene Moleküle
H ₂ O	500	10 ¹¹	1
Proteine	50	10 ⁶	1000
Zellwand	20	1	1
RNA	15	10 ⁵ (Ribosomen)	1000 (mRNA)
DNA	3	1	1
Lipide	5	10 ⁶	50
Kl. org. Verbindungen (Aminosäuren, ATP...)	5	10 ⁶	200
Anorg. Ionen (K ⁺)	1	10 ⁸	20
H ⁺ (pH≈8)	0	6	1

<CH₂O> (für die Vorlesung)

C₁₀₆ H₂₆₃ O₁₁₀ N₁₆ P₁ (S₁)

Redfield 1963

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

C-Kreislauf (heute)

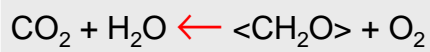
Photosynthetische Primärproduktion



Stöchiometrie
1:1:1:1

↑
Es handelt sich um eine
große **syntrophe**
Beziehung aller
Lebewesen
↓

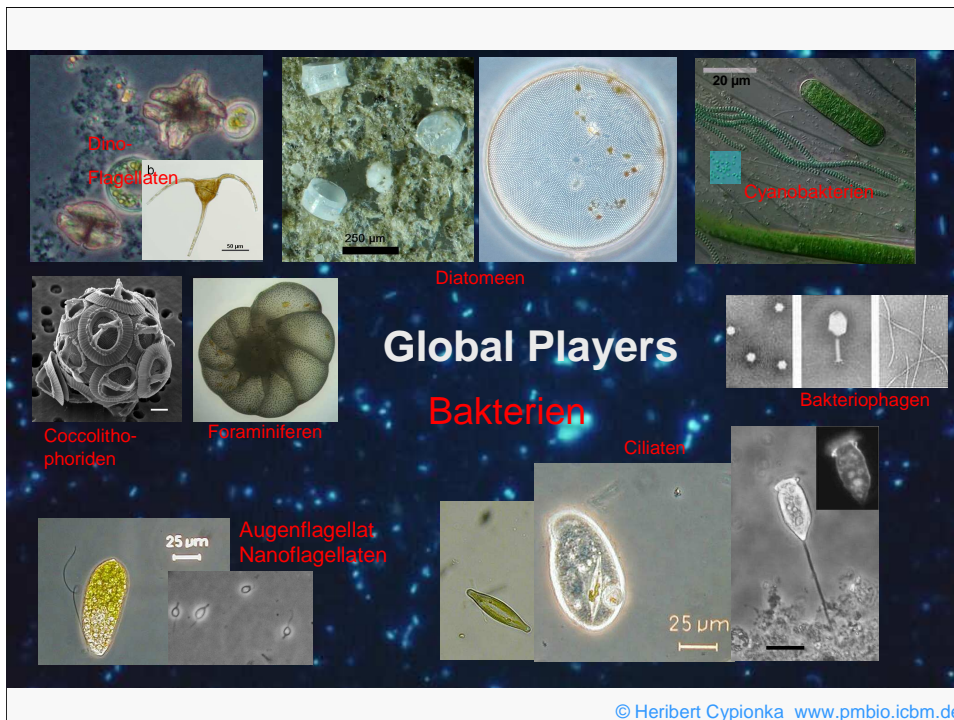
verläuft
natürlich über
biologische
Umwege...



Konsumtion, Mineralisation

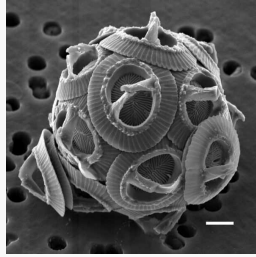
MM (CO₂) = 44 g
Primärprod.: 275 * 10⁹ t CO₂/Jahr = 275 * 10¹⁵ g CO₂/Jahr
= 6 * 10¹⁵ mol CO₂/Jahr = 3.6 * 10³⁹ CO₂-Moleküle/Jahr

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de



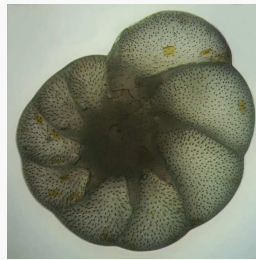
© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Einzeller mit Kalkschalen



Coccolithophoriden

Emiliana huxleyi-Blüte vor Cornwall und *Gephyrocapsa oceanica* (Wikipedia)



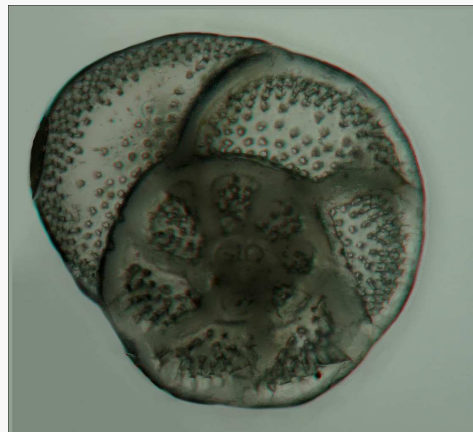
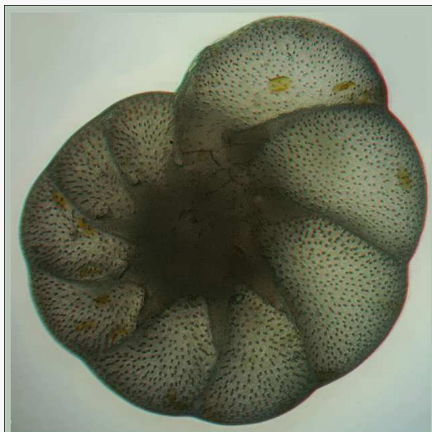
Foraminiferen

Strand von Rhodos und Schale von *Ammonia spec.*

www.picolay.de

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Schalen von Foraminiferen



Dreidimensionale Bilder für die **Cyan-Rot-Brille** erstellt mit **PICOLAY**

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

N-Kreislauf

N ≈ 10 % der Trockenmasse

Assimilation + Dissimilation entsprechend wichtig im Vergleich zum C-Kreislauf

viele Reaktionen nur von **Prokaryoten** katalysiert

viele Reaktionen nur über **Umwege** umkehrbar

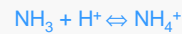
Nitrat (NO₃⁻) als oxidierteste Form

Ammonium (NH₄⁺ bzw. Ammoniak, NH₃) als reduzierteste Form

Nitrit (NO₂⁻) als (toxisches) Intermediat

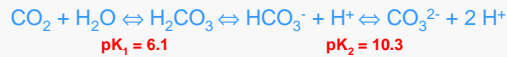
NO und **N₂O (Lachgas)** als weitere Intermediate

(Di-)Stickstoff (N₂) als inerteste Form, **Nitrogenase** als (sauerstoffempfindliches) Schlüsselenzym



pK = 9.2

(bei pH = 7 ≈ 99% NH₄⁺) pK = 9.2

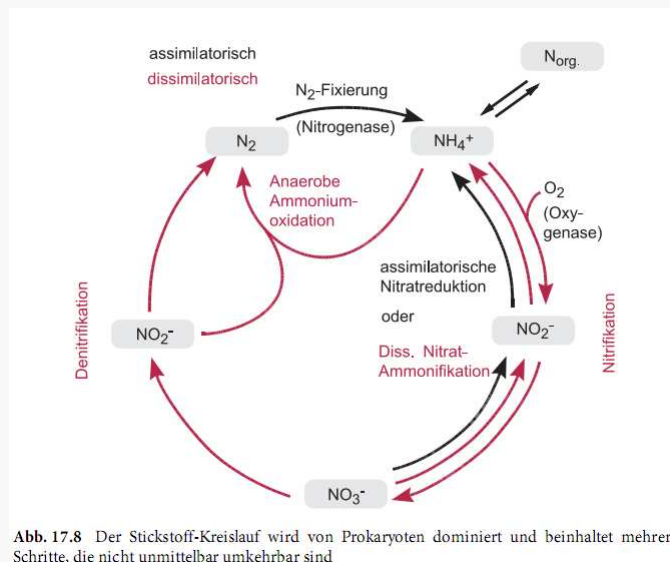


pK₁ = 6.1

pK₂ = 10.3

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

N-Kreislauf



Oxygenasen bauen direkt O₂ in ihre Substrate ein

Abb. 17.8 Der Stickstoff-Kreislauf wird von Prokaryoten dominiert und beinhaltet mehrere Schritte, die nicht unmittelbar umkehrbar sind

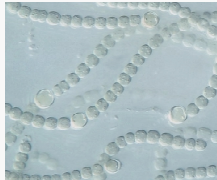
© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Beispiele von Mikroben aus dem Stickstoffkreislauf

N-Kreislauf

Pseudomonas denitrificans reduziert Nitrat zu Stickstoff (wenn kein Sauerstoff zur Verfügung steht) → **Denitrifikation, Anaerobe Atmung**

Viele **Cyanobakterien** (z.T. in **Heterocysten**) und Bakterien reduzieren Stickstoff zu Ammoniak. Wichtige symbiotische Stickstofffixierer sind die **Rhizobien** in den **Wurzelknöllchen** von Pflanzen.



Cyanobacterium
Nostoc mit
Heterocysten



Wurzelknöllchen des
Hornklees

Nitrosomonas (Bakterium) und *Nitrosopumilus* (Archaeon) oxidieren Ammoniak zu Nitrit (erster Schritt durch Oxygenase katalysiert und O_2 als Elektronenakzeptor) → **Lithotropher Prozess**

Nitrococcus oxidiert Nitrit zu Nitrat (O_2 als Elektronenakzeptor) → **Lithotropher Prozess**

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de



Schlammprobe aus dem Vareler
Hafen nach 2 Monaten Inkubation auf
der Fensterbank

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

S-Kreislauf

S \approx 1 % der Trockenmasse

Dissimilatorische Prozesse relativ wichtiger als assimilatorische

viele Reaktionen nur von **Prokaryoten** katalysiert

Sulfat (SO_4^{2-}) als oxidierteste Form (Meer 28 mM)

Schwefelwasserstoff (H_2S , 'Sulfid') als reduzierteste Form (toxisch)

Schwefel (S), **Sulfit** (SO_3^{2-}), **Thiosulfat** ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) und **Tetrathionat** ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$) als wichtige Intermediate

Reduzierte S-Verbindungen dienen auch als Elektronendonatoren für **anoxygen phototrophe Bakterien**



Es gibt kein freies Sulfid im Wasser!

Von den meisten Gasen löst sich bei Atmosphärendruck etwa 1 mM in Wasser. Gase mit Säure-Base-Gleichgewichten lösen sich viel besser:

CO_2 30 mM

H_2S 100 mM

$\text{NH}_3 > 1\text{M}$

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Wichtige Schwefelverbindungen

H-S-H, H-S $^-$ "Sulfid"

$^- \text{S}-\text{S}-\text{S}-\text{S}^-$ Polysulfid

$\begin{array}{c} \text{S}-\text{S}-\text{S} \\ | \quad | \\ \text{S} \quad \text{S} \\ | \quad | \\ \text{S}-\text{S}-\text{S} \end{array}$ S8-Schwefel



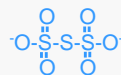
Sulfat



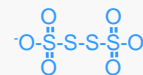
Thiosulfat



Sulfit

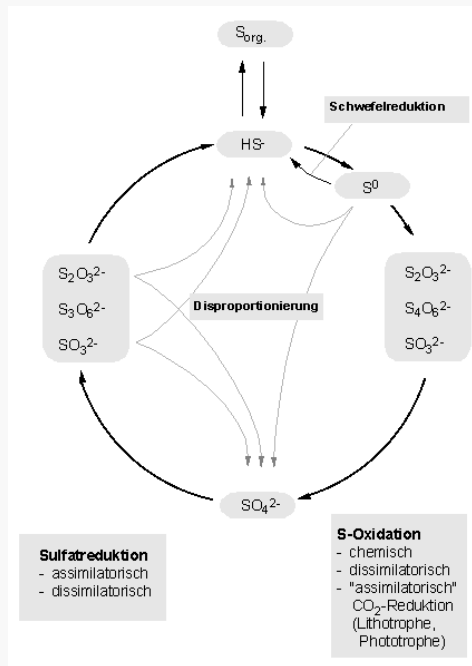


Trithionat



Tetrathionat

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

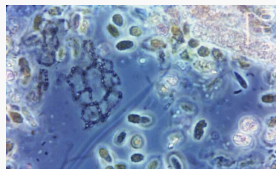
S-
Kreislauf© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Beispiele von Mikroben aus dem Schwefelkreislauf

Desulfovibrio desulfuricans reduziert Sulfat zu Sulfid →
Desulfurikation, anaerobe Atmung

Pyrobaculum reduziert Schwefel zu Sulfid (mit Peptiden als Elektronendonator) bei >100 °C → **Hyperthermophiles schwefelreduzierendes Archaeon, anaerobe Atmung (?)**

Chlorobium oxidiert Sulfid (über Schwefel) **im Licht** zu Sulfat und nutzt die Reduktionsequivalente zur Reduktion von CO₂ → **anoxygene Photosynthese, photolithoautotropher Prozess**

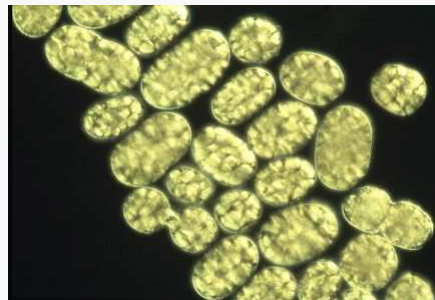
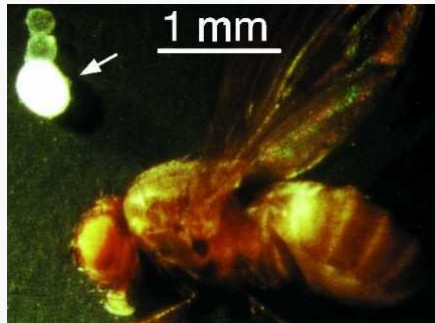


Probe aus dem Dagow-See mit anoxigen phototrophen Bakterien

Thiobacillus oxidiert Sulfid und andere reduzierte Schwefelverbindungen zu Sulfat (O₂ als Elektronenakzeptor) und reduziert CO₂ → **Lithoautotropher Prozess**

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Die größten Prokaryoten sind Schwefelbakterien



Oben: *Thiomargarita namibiensis*
Links: *Achromatium oxaliferum*

***Thiomargarita* oxidiert Sulfid mit Nitrat als Elektronenakzeptor. Nitrat wird in einer Vakuole gespeichert**

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Kreisläufe von Metallen

Viele Metalle mit geeigneten Redoxpotentialen werden durch Mikroben reduziert und oxidiert

Die wichtigsten: $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ und $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{4+}$



Durch die Umsetzungen wird die Löslichkeit verändert (Fe^{3+} und Mn^{4+} sind viel schlechter löslich als die reduzierten Formen)

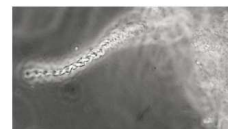


Abb. 3.6. Stiel von *Gallionella* an einer Eisenflocke aus einem Graben mit eisenhaltigem Wasser

Cypionka, Grundlagen der Mikrobiologie, 3. Aufl.

Eisenausfällungen in einem Bach auf dem Gelände der Universität Oldenburg

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

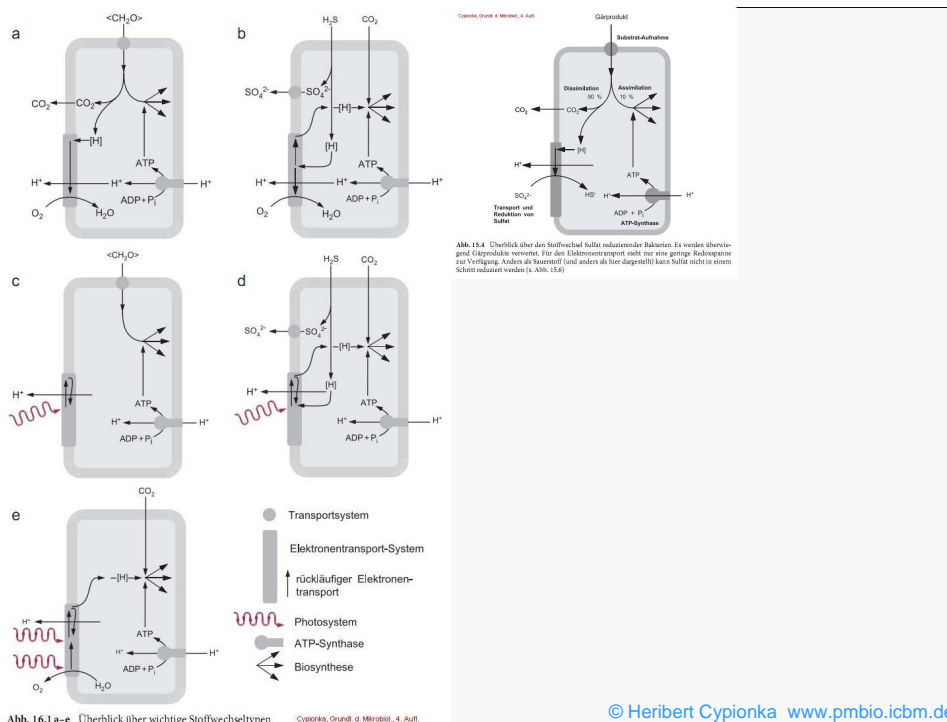
P-Kreislauf

Phosphat durchläuft nicht Redoxkreisläufe wie die zuvor genannten Elemente.

Die Verfügbarkeit von Phosphat wird aber von den Redoxverhältnissen bestimmt. Mit oxidiertem Eisen fällt Phosphat als schwerlösliches FePO_4 aus.

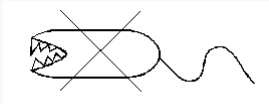
**Fällung von Phosphat
in der Kläranlage**

Gerät FePO_4 unter anoxische Verhältnisse, wird Fe^{3+} zu Fe^{2+} reduziert und wieder löslich und freigesetzt.



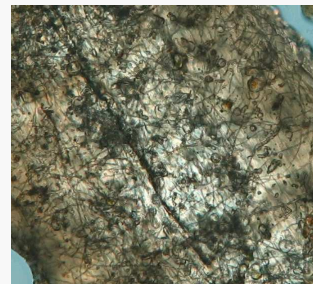
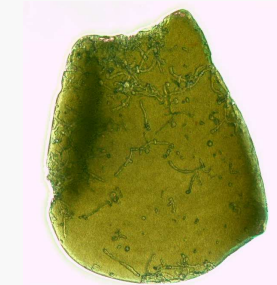
Abbau organischer Substanz

- Vorliegen als Polymere
- Überwiegend Kohlenhydrate



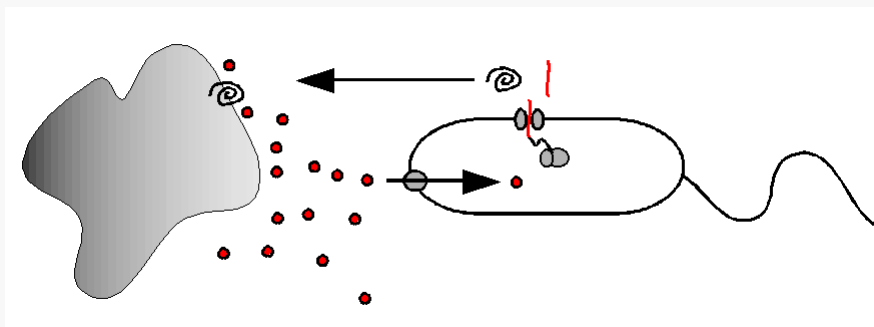
Bakterien haben keine Zähne.
Sie leben **osmotroph**.

Lösung: **Biologischer Umweg**



© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

Abbau organischer Substanz

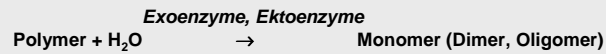


Freisetzung und Wirkung von Exoenzymen

- Ribosom erzeugt Peptid mit Signalsequenz ('Einfädelhilfe')
- Sekretionssystem exportiert Peptid
- Außen wird Signalpeptid abgeschnitten, Protein faltet sich endgültig
- Exoenzym setzt durch hydrolytische Wirkung Monomere frei
- Monomere werden durch spezifische Transportsysteme aufgenommen

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de

1. Schritt: Depolymerisierung durch Hydrolyse



- ◆ Spezielle Systeme zur Proteinsekretion
Ektoenzyme periplasmatisch, **Exoenzyme** freigesetzt (Hofbildung)
- ◆ Oberflächen-Anheftung, Koloniebildung => Kooperation
- ◆ Konkurrenz zwischen Bakterien und Pilzen
- ◆ Verfügbarkeit von Wasser, Bilanz für die Zellen
- ◆ Angriff nicht an einfache C-C-Bindungen sondern an Ester o.ä.

2. Schritt: Aufnahme gelöster Monomere

- ◆ **Osmotrophe Ernährung, spezifische Transportsysteme**
 - **Primärer** Transport (gekoppelt an chemische Reaktion)
 - **Sekundärer** Transport (Ausgleich von Gradienten)
 - **Eisenaufnahme** unter Verwendung hochmolekularer **Siderophore**

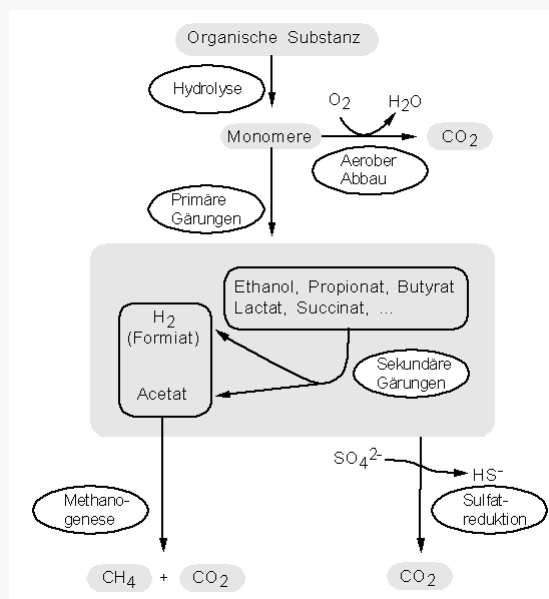
3. Schritt: Metabolismus (Katabolismus: konvergent, Anabolismus: divergent)

- **Aerober Abbau**
Dissimilation zu CO_2 durch einen einzigen Organismus
Assimilation von 30 - 50 % des Substrats
- **Anaerober Abbau**
 - **Anaerobe Atmung: Nitrat, Fe, Sulfat**
Prinzip wie aerob
Ertrag schlechter (weniger Assimilation möglich)

Ausnahmen:
 O_2 an der Oxidation einiger Substrate **direkt** beteiligt:
Oxygenase-Reaktionen (Monooxygenase 1 O_2 eingebaut, 1 H_2O , Dioxygenase beide O auf Substrat übertragen) nötig für **schwer angreifbare** Verbindungen:
 Aromaten (z.B. Benzol, Lignin), Alkane (CH_4 , Hexan), NH_4^+
 => nur aerober Abbau, oder mit O_2 sehr viel schneller

- **ohne anorganischen Akzeptor:**
Gärung = Disproportionierung, keine Oxidation
sehr geringer Ertrag, hoher Umsatz

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de



**Überblick über den
aeroben und anaeroben
Abbau organischer
Substanz**

**Wo gibt es syntrophe
Beziehungen**

**Wieviele Stufen hat
der Abbau mit O_2 ,
 CO_2 und SO_4^{2-} als
Elektronenakzeptor?**

© Heribert Cypionka www.pmbio.icbm.de