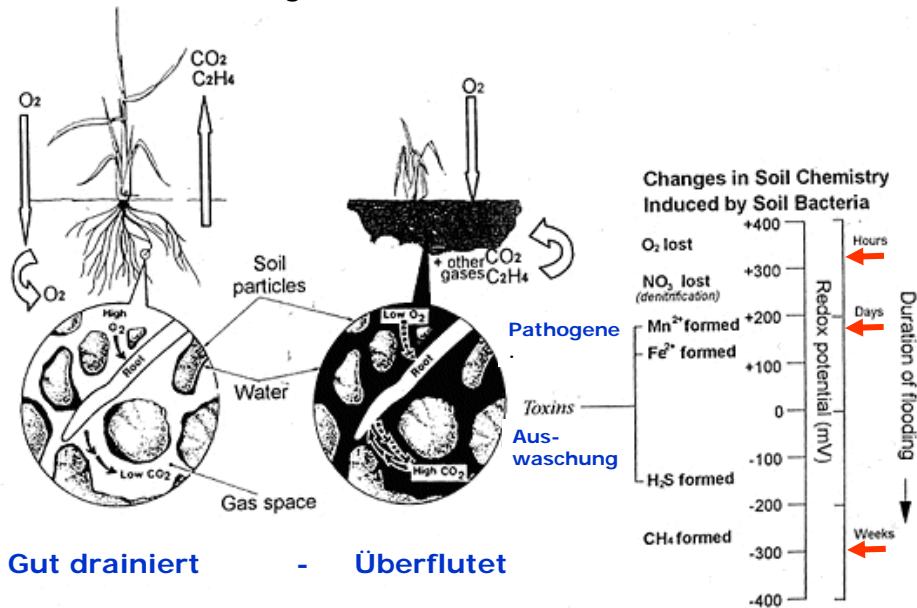


Stoffwechsel der Bodenorganismen Effekt einer Überflutung / Staunässe



<http://www.plantstress.com/Articles/>

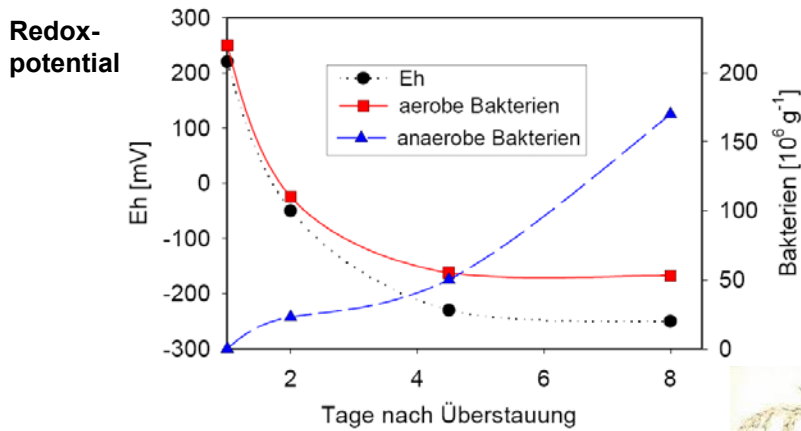
Gley-Bildung

- **G_o-Horizont:**
 - G = Grundwasser,
 - o = oxidiert,
 - im Schwankungsbereich des Grundwassers
 - → periodische Durchlüftung.
 - → Rostfleckige Färbung durch Eisen³⁺ Verbindungen
- **G_r-Horizont:**
 - r = reduktiv (O₂ Armut)
 - ständig wassergesättigt
 - blau-graue Färbung
 - Fe²⁺ und Mn²⁺



Quelle: Schwartz R. (2001): Die Böden der Elbaue bei Lenzen und ihre möglichen Veränderungen nach Rückdeichung. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 48, 391 S.

Bakterienentwicklung bei Staunässe

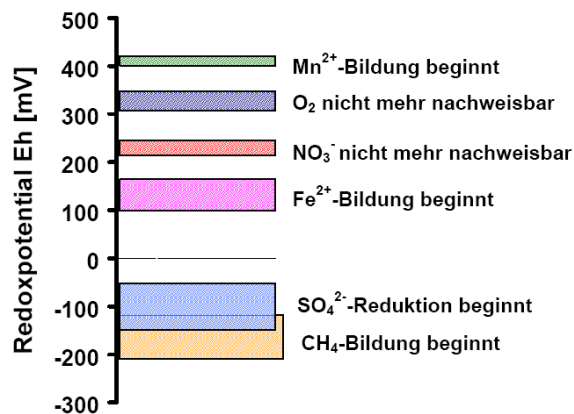


- Mit zunehmendem O₂ Mangel:
 - Anaerobe Bakterien wachsen stark an:
 - Anaerobe Atmung → Denitrifikation,
 - Chemolithotrophie: Fe, Mn-Reduktion → Fe²⁺, Mn²⁺ → bis zur Toxizität
 - Aerobe Bakterien nehmen ab:
 - Aerobe Atmung (z.B. keine Nitrifikation mehr)



Das Redoxpotential: Eh in [mV]

- Redox-Reaktionen sind mit pH-Veränderungen verbunden:
 - H⁺ Anreicherung, z.B. bei der Oxidation von Fe²⁺ zu Fe³⁺:
 - $\text{Fe}^{2+} + 3 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{H}^+ + \text{e}^-$



!

Einprägen!

Redoxpotential im Boden

- **Normal: Eisen meist als Festsubstanz Fe³⁺,**
 - bei Vernässung (**Redoxpotential ↓**) als Fe²⁺ Ion gelöst
 - → bleiche Auswaschungs- und rostige (Fe) / schwarze (Mn) Anreicherungshorizonte!
- Auf Böden mit hohem O₂-Gehalt: Löslichkeit des Fe, Mn bereits im Sauren Milieu
 - in nassen Böden (**Redoxpotential ↓**) schon viel früher!!!
- **Konsequenzen:**
- In **nassen** Böden: Fe²⁺, Mn²⁺ u.U. in grosser Konz. gelöst → **toxisch** (Nassreis-Felder).
- Humusabbau und Wassersättigung im Frühling
 - → Redox-Reaktionen
 - → jahreszeitlich schwankender pH.
- **Düngung mit NO₃⁻**
 - NO₃⁻ dient bei O₂-Mangel (anaerobe Bed.) als e- Akzeptor,
 - → Reduktion des NO₃⁻
 - → Denitrifikation zu N₂O, N₂.
 - Besser bei trockener Witterung
 - auf nicht durchnässten Böden.

Überblick: Zell-Metabolismus

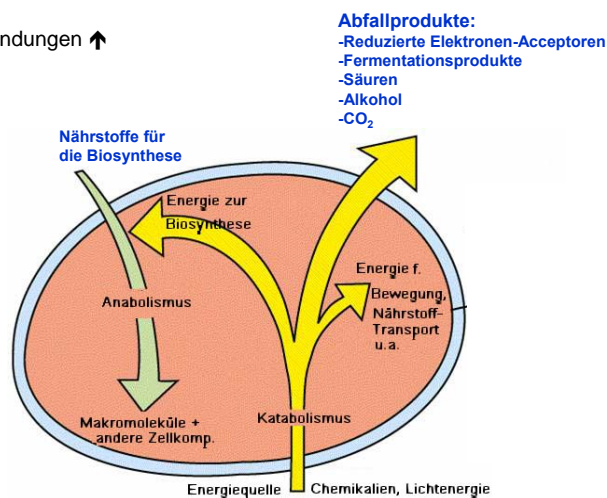
- **Metabolismus**= Summe **aller** chemischen Prozesse, die innerhalb einer Zelle ablaufen:

- 1. **Anabolismus:**
 - Synthese komplexer Verbindungen ↑
 - und **Energie-Verbrauch** ↓

- 2. **Katabolismus:**
 - Substrat-Abbau ↓
 - und **Energie-Gewinn** ↑

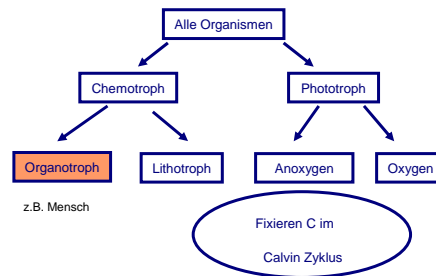
- Dazu sind notwendig:

- 1) **Kohlenstoff-Quelle**
- 2) **Elektronen-Donor (=Energiequelle)**
- 3) **Elektronen-Akzeptor**



1. Kohlenstoff-Quelle

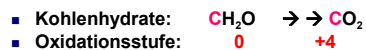
- Kohlenstoff **C** zum Aufbau der Biomasse nötig
- **C** kann entweder aus
 - CO₂ oder aus
 - org. Kohlenstoff geliefert werden (oft C₆H₁₂O₆)
- Wenn CO₂:
 - → 'autotroph'
 - basierend auf Lichtenergie: → photoautotroph
 - basierend auf chemischer Energie → ChemoAutotrophie o. Lithotrophie
- Wenn organischer C:
 - → 'heterotroph'
 - → ChemoOrganotrophie



2. Elektronen-Donoren (Energiequelle)

- Elektronen-Donor
 - = Reduktionsmittel
 - wird oxidiert
 - → seine Oxidationszahl wird größer (z.B.: +4)
 - reduziert seinen Redoxpartner

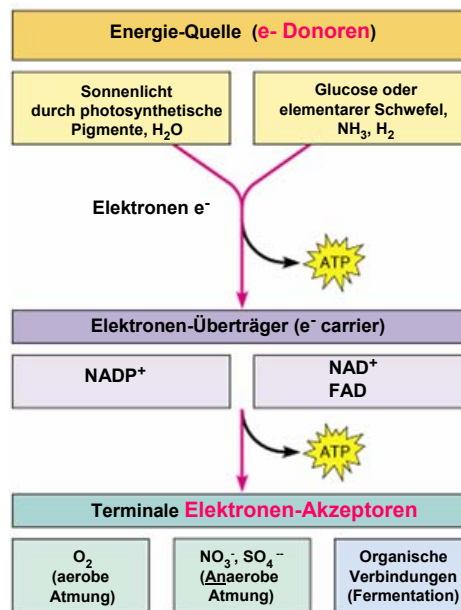
- e⁻ - Donatoren werden benötigt zur ATP Synthese



NH ₃	Nitrifizierer
CH ₄	Methanotrophe
S, H ₂ S	Schwefel-Oxidierer
H ₂	Wasserstoffbakterien: Acetogene, Methanogene
Fe	Eisen-Oxidierer
CO	Kohlenmonoxid-Oxid.

- Heterotrophe nutzen organischen C als Elektronen-Quelle
- Autotrophe nutzen verschiedenste Substrate als Energiequelle,
 - um CO₂ selbst zu fixieren und ATP zu generieren
 - Licht
 - → phototrophe Organismen (Pflanzen, Algen, Photosynthetische Bakterien)
 - Anorganische Verbindungen
 - → lithotrophe, chemoautotrophe Bakterien..

Einteilung der Stoffwechselltypen nach..



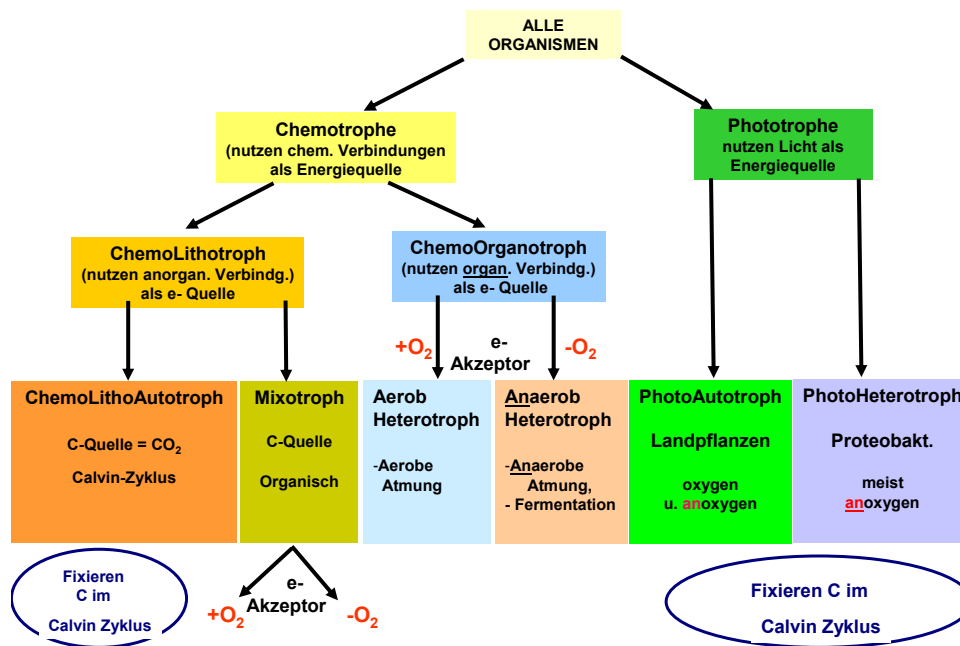
Unterscheidung nach Stoffwechsel-Strategien

Klassifikation der Organismen [nach der Weise](#), wie sie ihre Energie und den Kohlenstoff für den Zellaufbau gewinnen

Beispiele:

- **Phototrophie: Photosynthese**
 - z.B.: Oxygene Photosynthese: $6 CO_2 + 6 H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6 O_2$
- **Lithotrophie: Oxidation/Reduktion anorganischer Verbindungen**
 - z.B.: Ammonium-Oxidation: $NH_4^+ + 1\frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_2^- + 2 H^+ + H_2O$
- **Organotrophie: Oxidation organischer Verbindungen**
 - z.B.: Glucose-Oxidation: $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$

Kombinierte Einteilung d. Organismen nach Energie- und C-Quellen



3. Elektronen-Akzeptoren

- Das, was ein Organismus 'atmet'
- Elektronen-Akzeptor
 - wird reduziert
 - seine Oxidationszahl wird kleiner
 - = Oxidationsmittel
 - oxidiert seinen Redoxpartner
- Aufgeteilt in
 - **Aerobe** Atmung (nutzen $O_2 \rightarrow H_2O$)
 - Tiere, Pflanzen, und die meisten Protisten und Pilze
 - nutzen O_2 als Elektronen-Acceptor
 - **Anaerobe** Atmung (nutzen andere Verb.)
 - Bakterien und Archaea (Archebakterien) zeigen höhere Diversität:
 - Z.B: Siehe nächste Folie ..

3. Elektronen-Akzeptoren Fortsetzung...

.. was ein Organismus 'atmet'

Bakterien und Archaea nutzen:

O_2	(Aerobe Bakterien – viele Species)
CO_2	(Methanogene, Acetogene)
SO_4^{2-}	(Sulfat-Reduzierer)
NO_3^-	(Denitrifizierer)
NO_2^-	(Denitrifizierer)
Fe^{3+}	(Eisen-Bakterien, einige Denitrifizierer)
S^0	(Schwefel-Reduzierer) und viele andere mehr

um diese Stoffe zu reduzieren.

Chemoautotrophe Organismen

- nutzen anorganische Moleküle als Energie-Quelle
 - analog dazu, wie Licht von den Pflanzen genutzt wird.
- Beispiel: Schwefel-oxidierende Bakterien
 - → **Reaktion liefert Energie, um CO_2 zu fixieren:**
 - $H_2S + O_2 \rightarrow 2S^0 + 2H_2O$
- e- Akzeptoren: Einige Bakterien nutzen O_2 aus der Luft, um
 - anorganische Verbindungen zu oxidieren, und
 - ATP zu erzeugen
 - $CO_2 \rightarrow$ org. Verbindungen
- Beispiele:
 - Thiobacillus (Schwefel S) → S → H_2SO_4
 - Nitrosomonas (Ammoniak) → Nitrifikation
 - Nitrobacter (Nitrit) → Nitrifikation

2 Typen des chemotrophen Stoffwechsels

Elektronen Donator	Elektronen-Akzeptor	Kohlenstoff-Quelle	Beispiele
ChemoLithotrophie (Autotrophie)			
H ₂	O ₂	CO ₂	Knallgasbakterien
H ₂ S, S	O ₂	CO ₂	<i>Thiobacillus</i>
NH ₃	O ₂	CO ₂	<i>Nitrosomonas</i>
NO ₂ ⁻	O ₂	CO ₂	<i>Nitrobacter</i>
H ₂	CO ₂	CO ₂	Methanogene
H ₂	CO ₂	CO ₂	Acetogene
H ₂	S	CO ₂	Hyperthermophile, Archaeobakterien
H ₂	SO ₄ ²⁻	CO ₂	Sulfatreduzierer

ChemoOrganotropher Stoffwechsel

Elektronen Donator	Elektronen Akzeptor	Kohlenstoff-Quelle	Beispiele
ChemoOrganotrophie (Heterotrophie)			
Organ. Subst.	O ₂	Organ. Subst.	<i>Pseudomonas</i> <i>Bacillus</i> , Eukaryoten
Organ. Subst.	NO ₃ ⁻ / NO ₂ ⁻	Organ. Subst.	Denitrifikanten
Organ. Subst.	SO ₄ ²⁻	Organ. Subst.	Sulfatreduzierer
Organ. Subst.	S	Organ. Subst.	S-Reduzierer
Organ. Subst.	Organ. Subst.	Organ. Subst.	Clostridien, Milchsäure- Bakterien Eukaryoten
Organ. Subst.	Fe ³⁺	Organ. Subst.	Fe-Reduzierer

ChemoLithotrophe *en detail*

■ Wasserstoffbakterien

- $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- *Hydrogenomonas*

■ Schwefelbakterien

- $\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{S}$
- $\text{S} + 1\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- *Thiobacillus*

■ Eisenbakterien

- $2 \text{Fe}^{2+} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{3+} + 2 \text{OH}^-$
- *Gallionella*

ChemoOrganotrophe

- ..können ihre Energie auf folgende Arten gewinnen:

■ Aerobe Atmung

- Glycolyse,
- Citrat-Zyklus, und
- oxidative Phosphorylierung mit O_2 als terminalen e^- Akzeptor.

■ Anaerobe Atmung

- Glycolyse,
- Citrat-Zyklus, und
- oxidative Phosphorylierung mit Alternativstoff zu O_2 als terminalen e^- Akzeptor.

■ Fermentation

- Glycolyse
- Substratkettenphosphorylierung

Energie aus der ChemoOrganotrophie

Effizienz aerober und anaerober Veratmung organischer Substanz:



Modus der Atmung		Oxidans	Reduziertes_Oxidans	ΔG_r° (kJ/mol)	gelieferte Energie
O ₂ Oxidation	(‘norm’: aerob)	O ₂	H ₂ O	-3190	
Mangan Reduktion	(Gley)	MnO ₂	Mn ²⁺	-3090	
Nitrat-Reduktion	(Denitrifizierung)	HNO ₃	N ₂	-3030	
Eisen-Reduktion	(siehe Bsp.)	Fe ₂ O ₃ FeOOH	Fe ⁺² Fe ⁺²	-1410 -1330	
Sulfat Reduktion	(siehe Bsp.)	SO ₄ ²⁻	S ₂ ⁻	-380	
Methanogenese	‘Biogas’	CO ₂	CH ₄	-350	

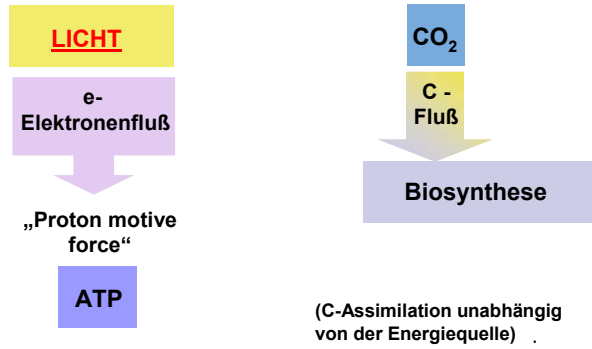


2 Typen des phototrophen Stoffwechsels

Elektronen-Donator	Elektronen-Akzeptor	Kohlenstoff-Quelle	Beispiele
PhotoOrganotrophie			
Organ. S.	z.B. N ₂ O	Organ. Substanzen z.B. Malat	<i>Rhodospirillaceae</i> (Nichtschwefel-Purpur-Bakterien, Proteobakterien)
PhotoLithotrophie			
H ₂ O	oxygen PS	CO ₂	Pflanzen, Algen, Cyanobakterien
H ₂ S, S, H ₂ (anoxigene Photosynthese)		CO ₂	<i>Chromatiaceae</i> <i>GrünBakterien</i> <i>Schwefel-Purpurbakterien</i>

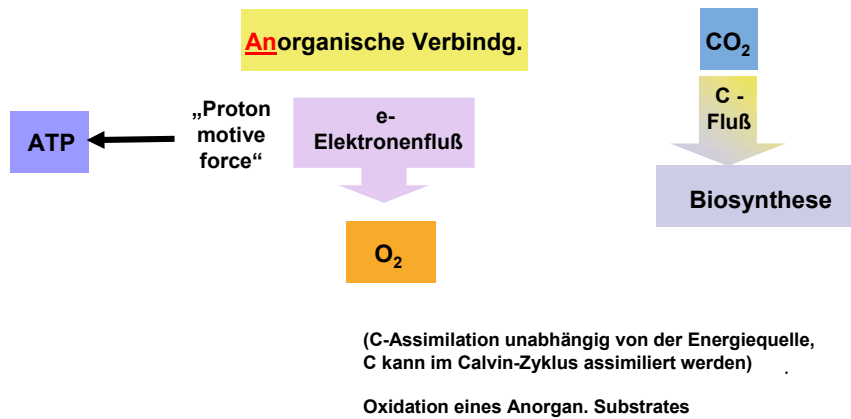
Phototropher Metabolismus

v.a. Pflanzen



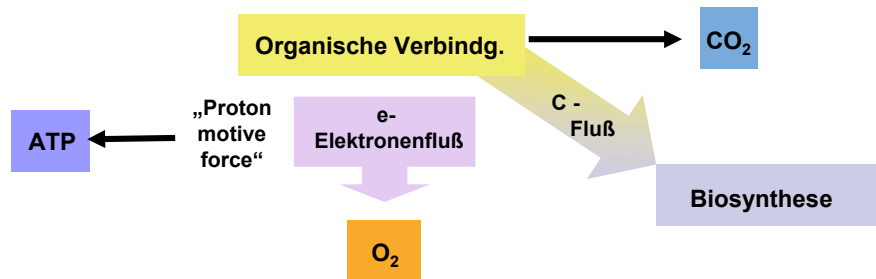
ChemoLithotropher Metabolismus

z.B. Nitrifikanten



Aerobe Atmung

z.B. Chemo**Organ**otrophie

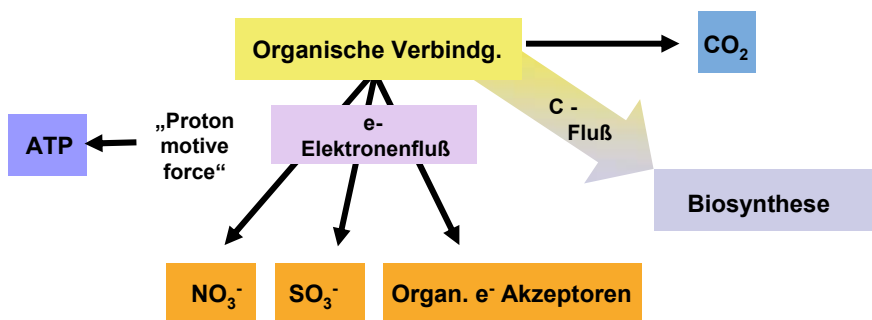


(=aerobe Respiration)
→z.B. Mitochondrien

- Oxidation eines Anorgan. Substrates
- Kopplung der C-Assimilation mit e- -Fluss

Anaerobe Atmung

z.B. Chemo**Organ**otrophie



Bsp.:

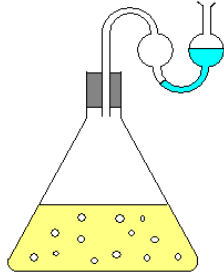
Denitrifikanten → N₂O, N₂

Sulfat-Reduzierer → H₂S
etc.

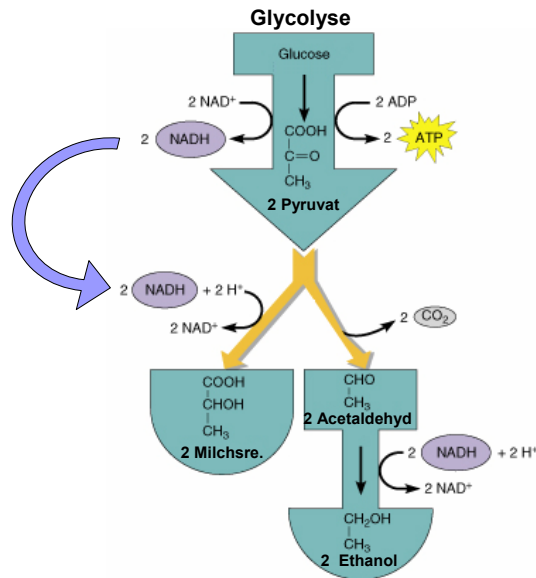
(= anaerobe Respiration)

- Oxidation eines Anorgan. Substrates
- Kopplung der C-Assimilation mit e- -Fluss

Fermentation = Anaerobe ChemoOrgantrophie



- Oxidation des NADH (aus der Glycolyse)
- Pyruvat oder Derivate als endogene Elektronen-Akzeptoren
- ATP durch Substratketten-Phosphorylierung



Gärungen oder Fermentationen

- Organ. Verbindungen als e- Donoren und e- Akzeptoren
- kein O_2 beteiligt
- Der Elektronenakzeptor ist ein oxidiertes Zwischenprodukt des tw. abgebauten Gärsubstrates.
- → reduzierte org. Hauptendprodukte z.B.:

- Alkoholische (Ethanol-) Gärung,
- Milchsäure-G.
- Propionsäure-G.
- Essigsäure-G.
- Methan G.
- Buttersäure-G.
- Ameisensäure-G.



- ‚Echte‘ Gärer:
 Verwertung org. Substrate mit ATP- Gewinnung direkt beim Abbau energiereicher organischer Zwischenverbindungen.
 - Substratketten-Phosphorylierung

..in diesem Kontext zur Chemolithotrophie
bei O₂ –Mangel:

SCHWEFEL im Boden:

→ Dissimilatorische Sulfat-Reduktion

- Sulfat ist e⁻ Akzeptor in einer Form der **anaeroben Atmung**
(Atmung= Respiration)
 - $(\text{CH}_2\text{O})_{106} (\text{NH}_3)_{16} (\text{H}_3\text{PO}_4) + 53\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 106\text{CO}_2 + 16\text{NH}_3 + 53\text{S}^{2-} + \text{H}_3\text{PO}_4$
 - Weiterreaktion:
 - $2\text{H}^+ + \text{S}^{2-} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HS}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S (Gas)}$
 - Reaktion v.a. durch **Anaerobe** (Archaea und delta-Proteobakterien)
- Ist das **H₂S** ein Umweltproblem?

Was geschieht mit dem H₂S?

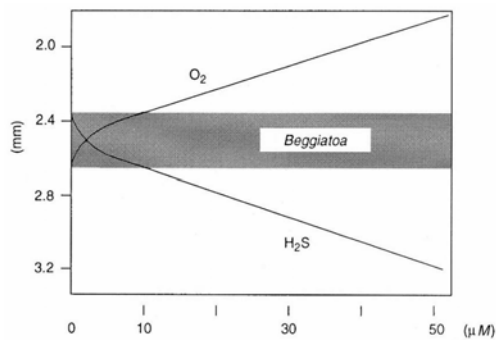


Warum besteht für Menschen, in der Nähe von Salzmarschen keine Gefahr?

1. Abiotische Reaktionen
Oxidation des H₂S durch O₂ (oft in Kombination mit Fe²⁺)
2. Weiterverbrauch des H₂S durch anoxygene phototrophe Bakterien.
3. Was noch?
..richtig, Nutzung durch **chemolithotrophe** Bakterien

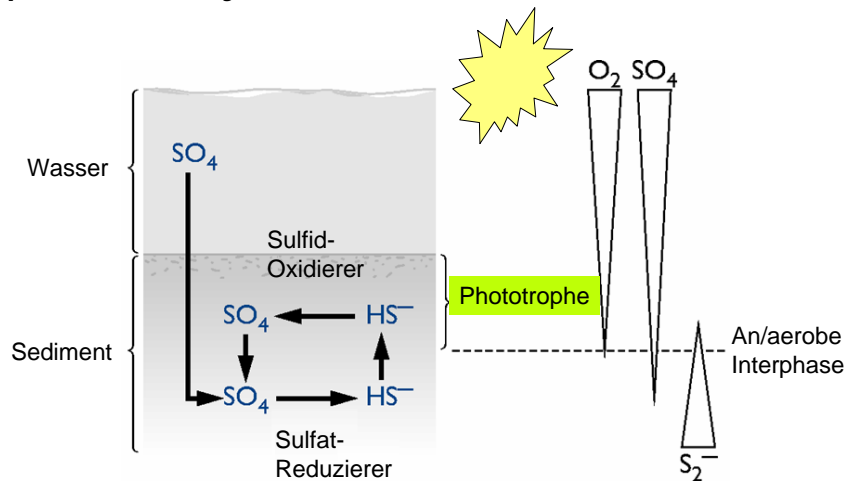
..und Schwefel im Boden

- Chemolithotrophe müssen an Interphasen leben:
- Habitat von *Beggiatoa* ist die Rhizosphäre von Pflanzen (Reis, Rohrkolben, Sumpfpflanzen)
- überflutete, → anaerobe Böden
- Pflanzen pumpen O_2 in die Wurzeln,
- → aerobe/anaerobe Grenze zwischen Wurzel / Boden.
- → *Beggiatoa* oxidieren H_2S → Entgiftung



Beggiatoa: H_2S Oxidierer

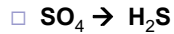
Bsp.: Schwefel-Zyklus im Boden und in Sedimenten



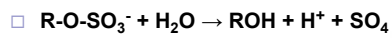
- Bei O_2 -Mangel: Zunahme der Sulfat-Reduzierer
 - = Dissimilatorische Sulfat-Reduktion

S Zyklus erweitert

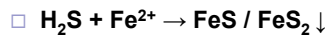
- **Dissimilatorische Sulfat-Reduktion:**
Desulfovibrio



- **Sulfatase:**

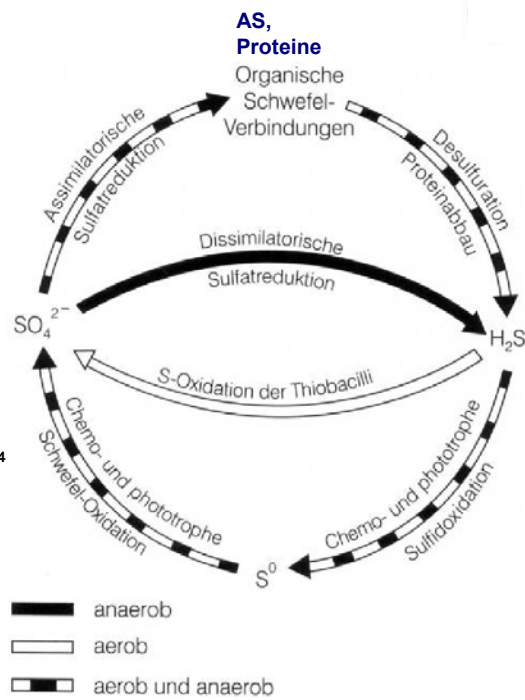


- **Reisböden:**

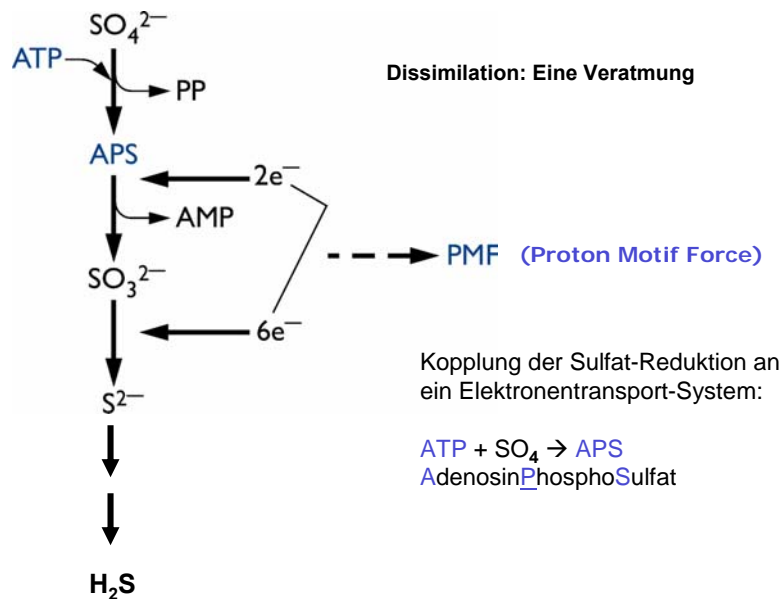


- → Wurzelschäden

(Fritsche 1998)

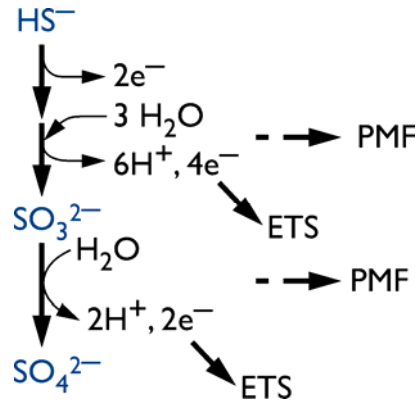


Dissimilatorische Sulfat-Reduktion



..und zurück: Sulfid-Oxidation

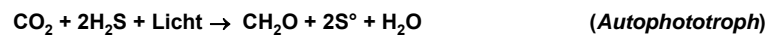
Durch
phototrophe
Bakterien:



HS: Oxidation durch Elektronenfluß aus **Photonen**
ETS = Elektronen-Transport-System

Photosynthese – Schwefel-Oxidation

Häufig durch Schwefelbakterien in der Nähe reduzierter Gase wie H_2S :



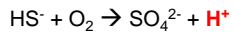
Z.B.: **Grüne** u. **Purpur**- Schwefelbakt. in Salzmarschen.

Die oxygene Photosynthese begann vor ~ 3.5 Mrd. J., aber die Akkumulation von O_2 in der Atmosphäre begann erst nach der Oxidation des oberflächlichen Fe^{2+} (~1.8 Mrd.J.).

S Oxidation

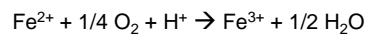
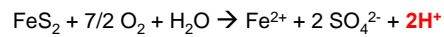
- S oxidierende Bakterien sind Chemolithotrophe:

- aerobes Bakt. *Thiobacillus thiooxidans*:
- nutzen S Verbindungen als Energiequellen:



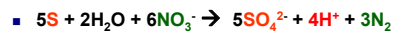
- Bei Drainagen von Minen:

- → Pyrit- Oxidation (*Thiobacillus thiooxidans*)
- → große Mengen an Säuren
- → Oberflächenwasser: **pH <2.0**: (Bild)

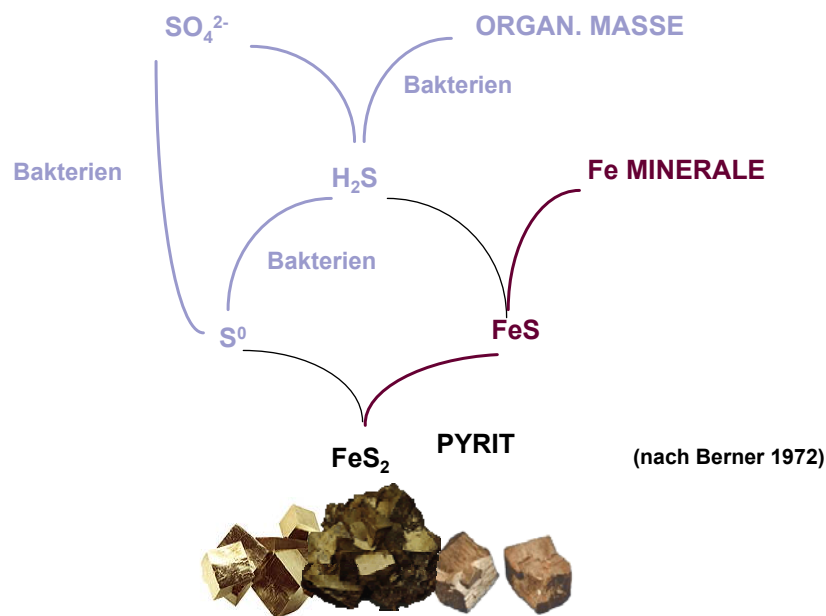


- Unter anaeroben Bedingungen:

- *Thiobacillus denitrificans* koppelt S-Oxidation mit respiratorischer Denitrifikation:



Pyrit (FeS₂)- Bildung in Sedimenten



Pyrit-Bildung in Sedimenten

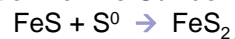
Sulfat-Reduktion : $\text{SO}_4^{2-} + 2 (\text{CH}_2\text{O}) \rightarrow 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$

2 Schritt-Reaktion

- Reaktion des H_2S mit Fe^{2+} oder reaktiven Fe-Mineralen



- Reaktion von Fe-Sulfiden mit elementarem Schwefel:



auch unvollständige Oxidation
zu H_2S oder FeS durch
 O_2 , NO_3^- , MnO_2 oder FeOOH

Erdgeschichtlich:

- In strikt anoxischen Sedimenten: $\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS}_2 + \text{H}_2$
- In Salz-Sedimenten $\text{Fe}^{2+} + \text{S}^0 \rightarrow \text{FeS}_2$

Aus Schultze/Zabel 2000

Zum Ausfüllen .. Bakterieller S Zyklus

