

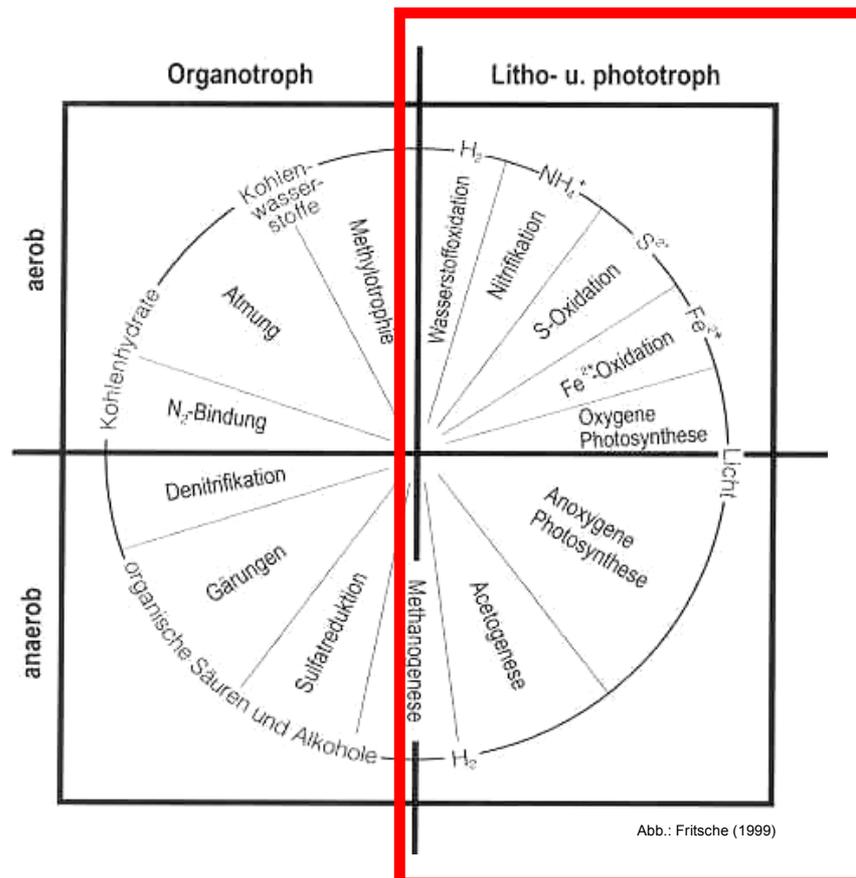
# Vorlesung: Allgemeine Mikrobiologie

## Ausgewählte Prokaryoten -

### Lithotrophe Organismen

www.icbm.de

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Stoffwechseltypen von Mikroorganismen

Chemo / Phototroph

Energiekonservierung

Litho / Organotroph

Elektronendonator (Dissimilation)

Auto / Heterotroph

Kohlenstoffquelle (Assimilation)

Chemoorganoheterotroph

*Escherichia coli*

*Homo sapiens*

Photolithoautotroph

*Microcystis* sp. (Cyanobakterium)

*Chlorella* sp. (Grünalge)

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



Sergej Nikolaevitch Winogradsky (1857–1953)

Konzept der Lithotrophie

Sergej N. Winogradsky (1886)

Schwefeloxidation 1886

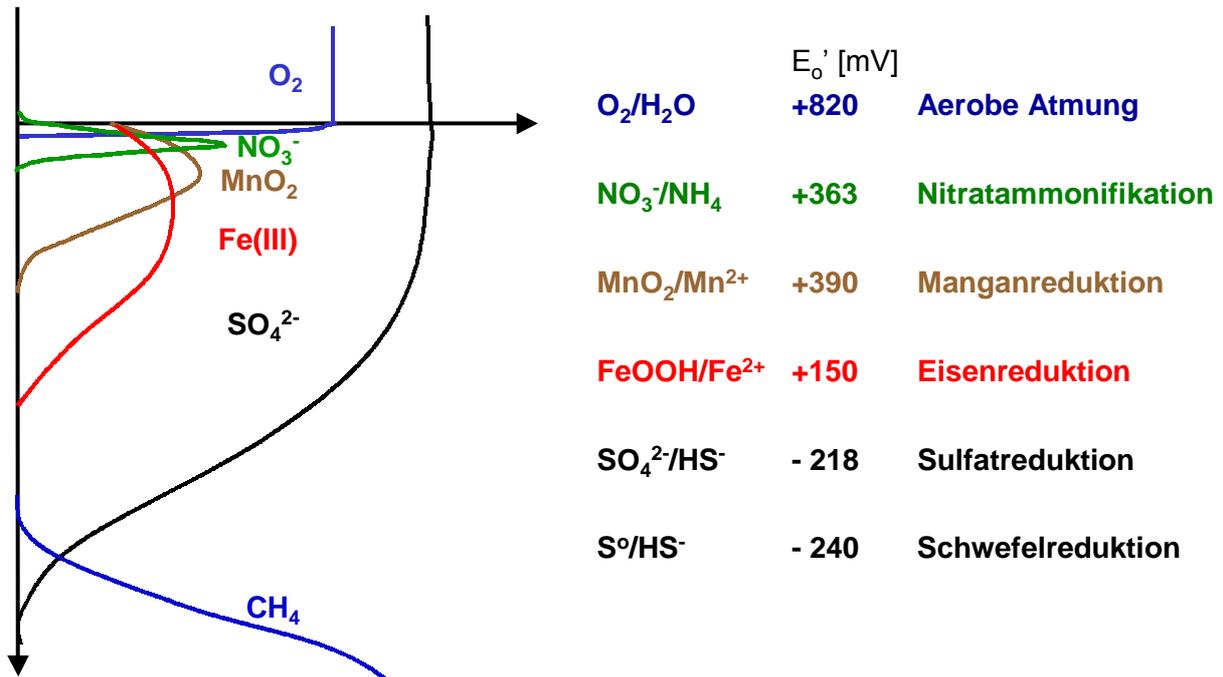
Eisenoxidation 1888

Nitrifikation 1890

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Idealisiertes Schema:

## Abfolge der verschiedenen Elektronenakzeptoren im Sediment



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Lithotrophe Prozesse sind für die Reoxidation der Elektronenakzeptoren notwendig

- Reoxidation von reduzierter Elektronenakzeptoren ( $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $HS^-$ )
- Detoxifikation ( $HS^-$ ,  $NH_4^+$ )
- Verantwortlich für etwa 50% der Sauerstoffaufnahme in Sedimenten

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

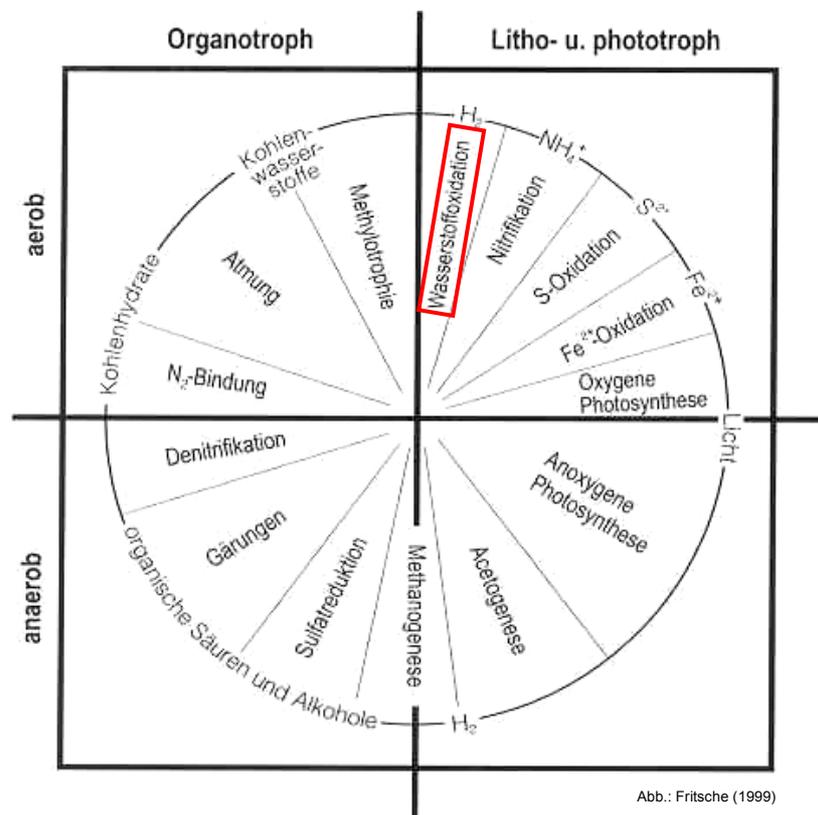


Abb.: Fritsche (1999)

## Knallgasbakterien und andere Wasserstoffoxidierer

*Ralstonia eutropha*  
 (früher: *Alcaligenes eutrophus*)  
 und andere

Aerobe Wasserstoffoxidation (*Alcaligenes eutrophus*)



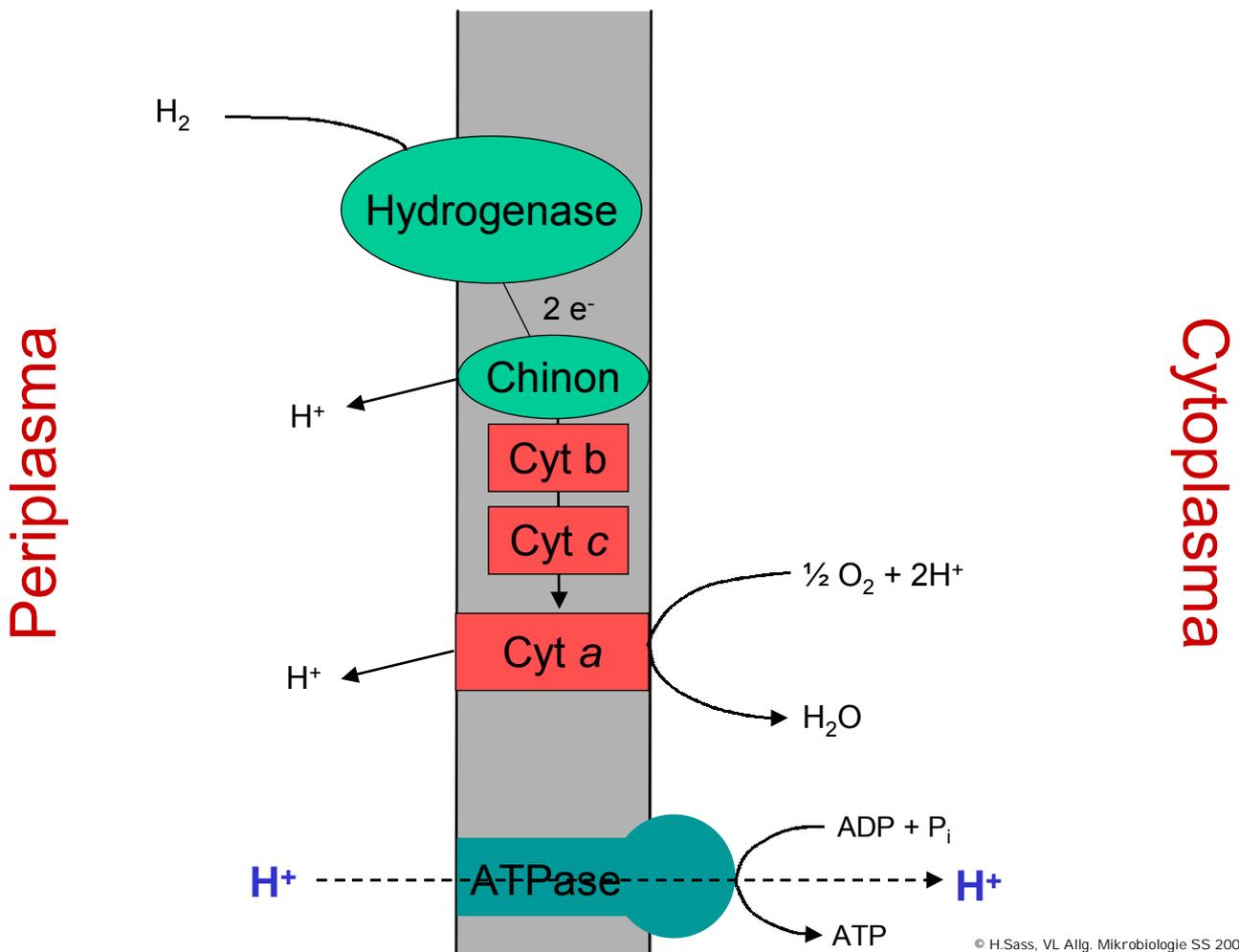
Anaerobe Wasserstoffoxidation



(Denitrifikation, Eisen-Reduktion, Sulfatreduktion)

ATP?

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

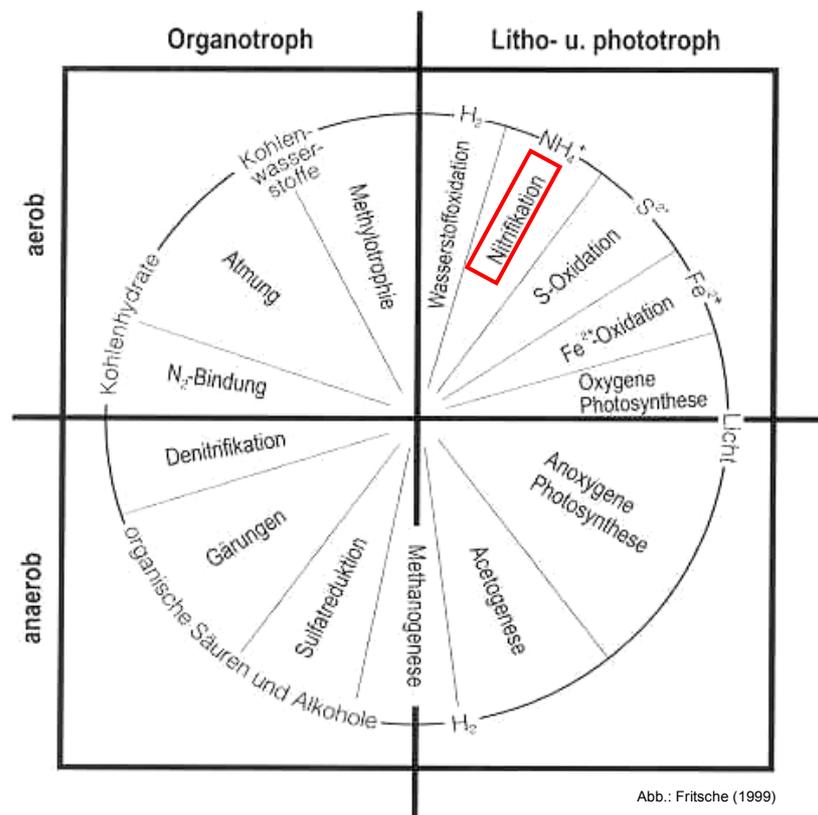


Abb.: Fritsche (1999)

## Nitrifikation

*Nitrosomonas europaea*

und

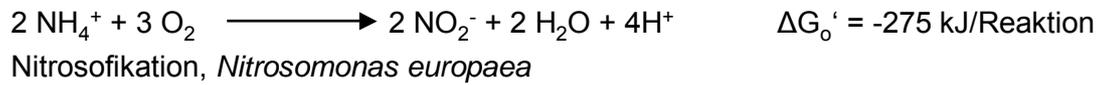
*Nitrobacter winogradskyi*

## Nitrifikation

Oxidation von Ammonium zu Nitrat

Zweistufige Reaktion mit unterschiedlichen Organismengruppen.

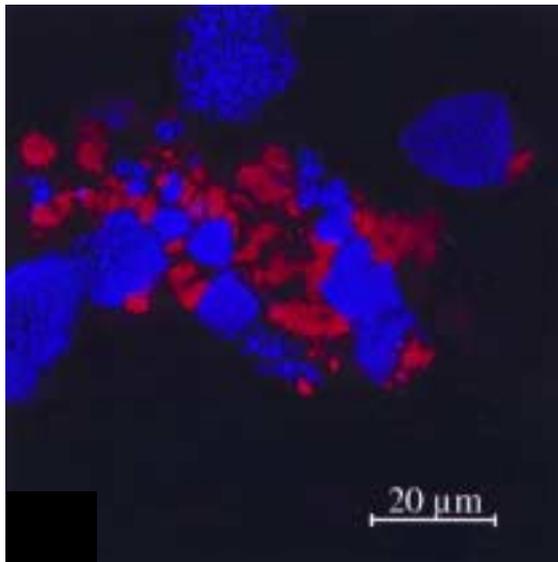
1. Stufe: Oxidation des Ammonium zu Nitrit (*Nitroso-*)



2. Stufe: Oxidation des Nitrit zu Nitrat (*Nitro-*)



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



Aus Schramm et al. (1998) Appl. Environ. Microbiol. 64:3480 ff

Populationen Ammonium- und Nitrit-oxidierender Bakterien in Belebtschlammflocken. Zellen wurden mit 16S rRNA-Sonden angefärbt.

Blau: Ammonium-Oxidierer

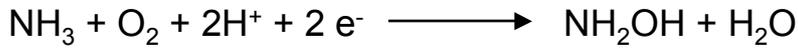
Rot: Nitrit-Oxidierer

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

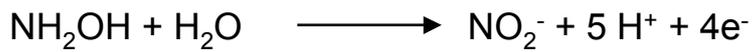
*Nitrosomonas europaea*

Problem: Oxidation des Ammoniums

Schlüsselenzym 1: Ammonium-Monooxygenase (Amo)

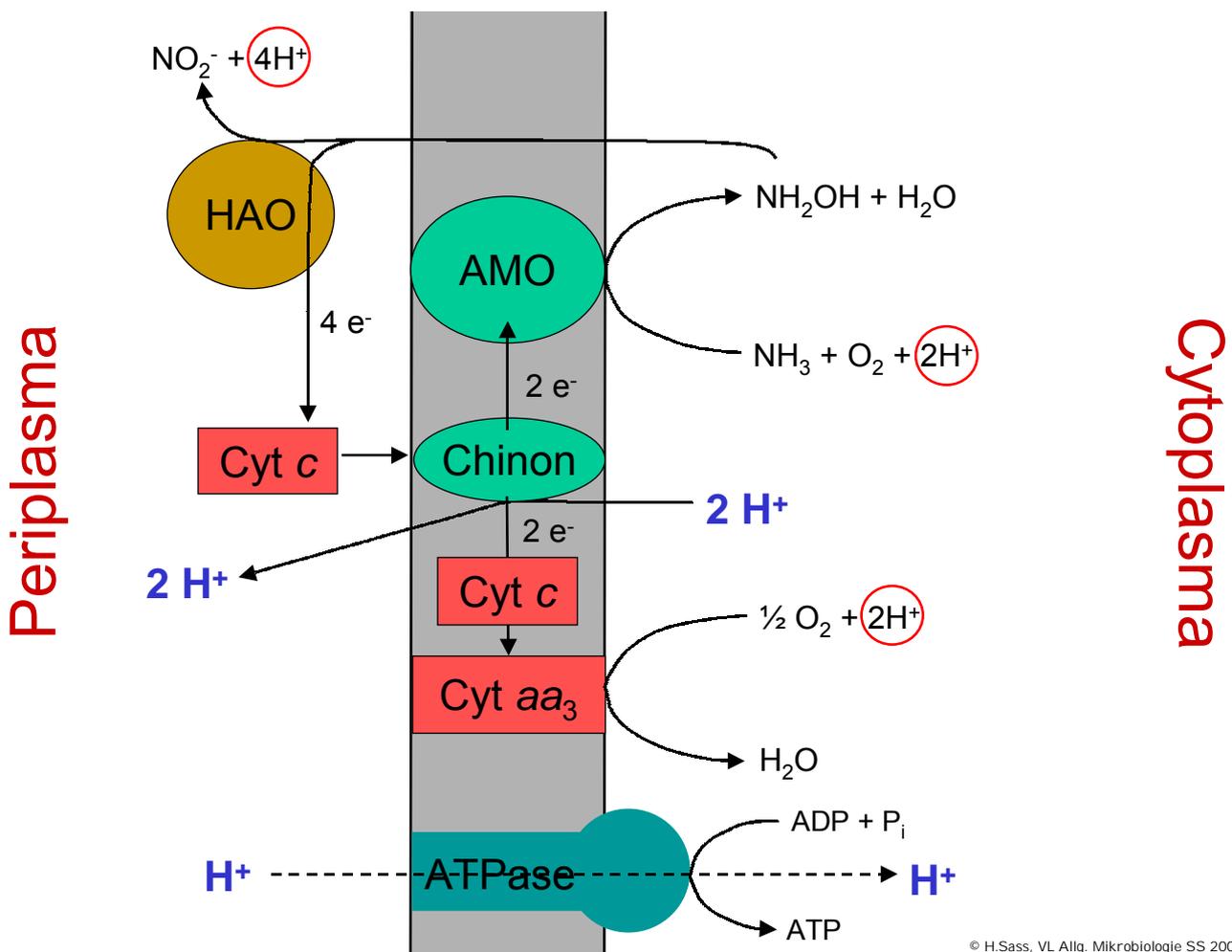


Schlüsselenzym 2: Hydroxylamin-Oxidoreductase (Hao)



ATP?

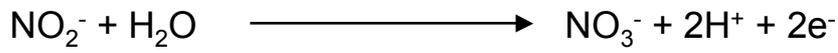
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

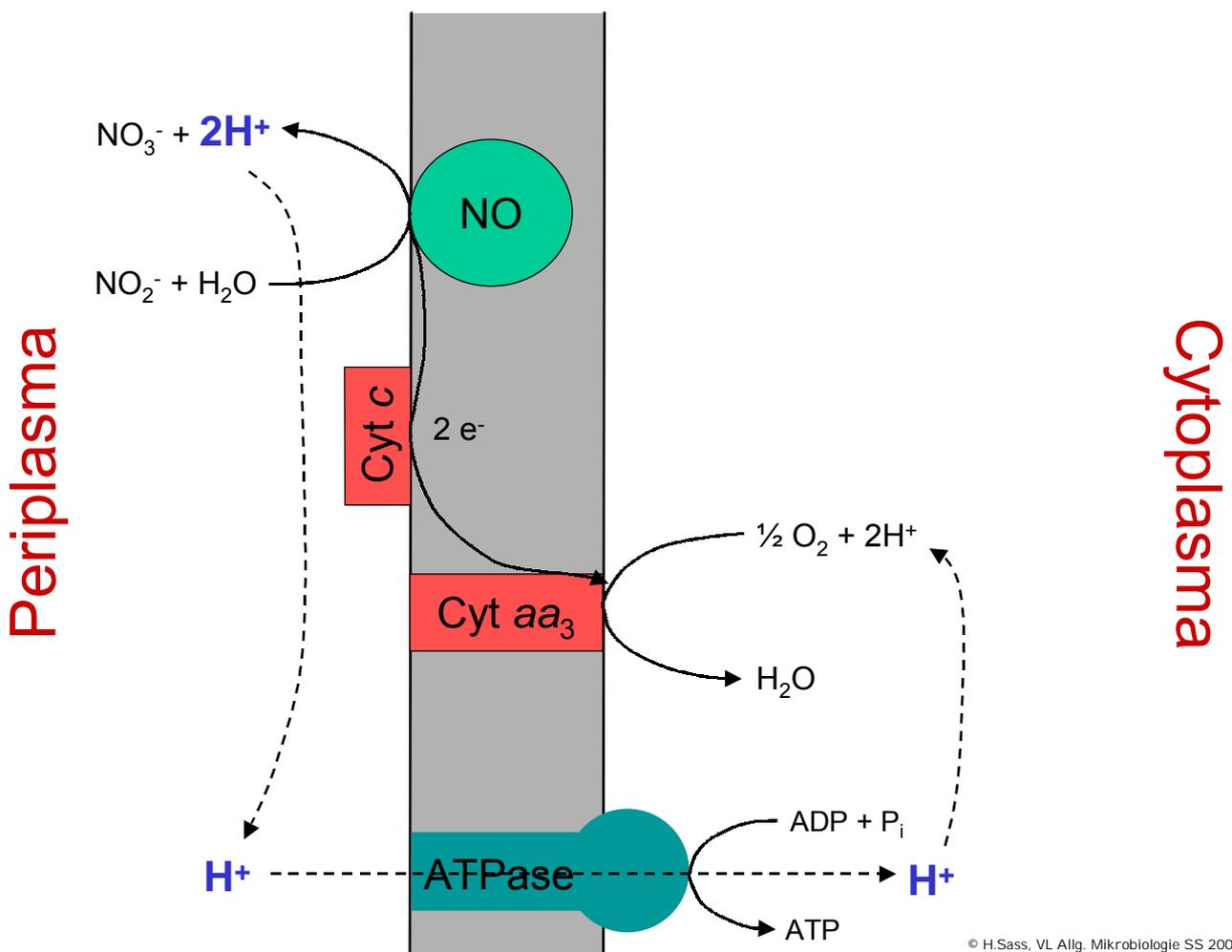
*Nitrobacter winogradskyi*

Schlüsselenzym: Nitrit-Oxygenase (NO)

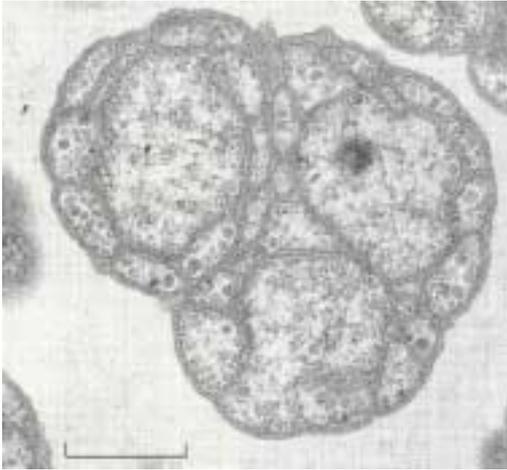


ATP?

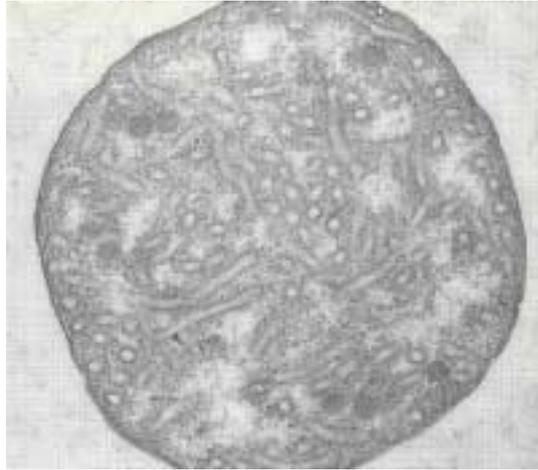
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



*Nitrosolobus multififormis*  
Maßstab: 0,5 µm



*Nitrococcus mobilis*

Aus: Perry & Staley, Microbiology, Dynamics and Diversity

Intrazelluläre Membransysteme bei nitrifizierenden Mikroorganismen.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

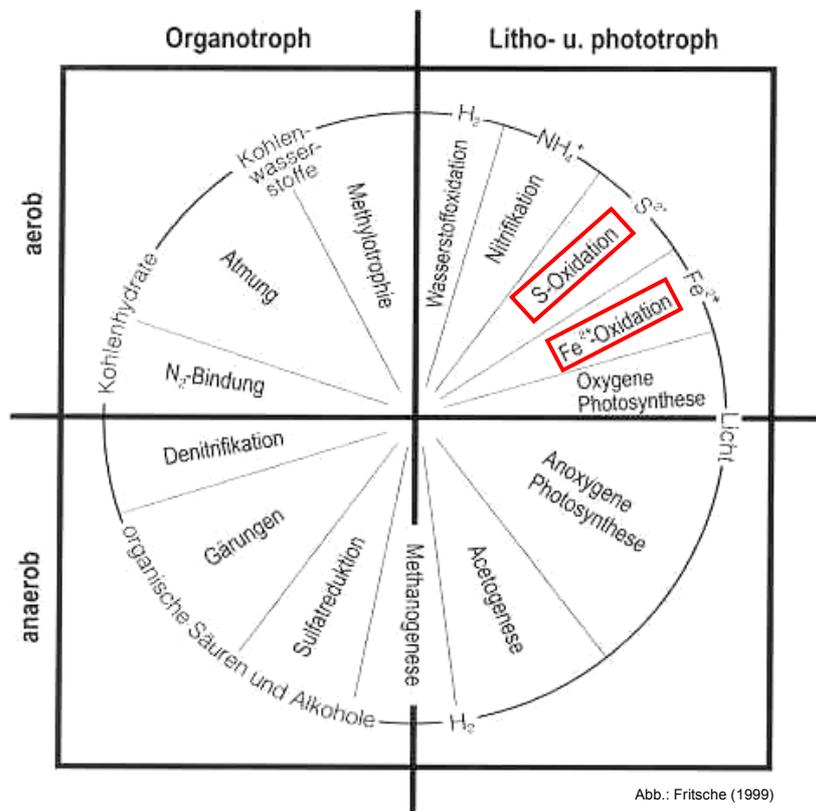
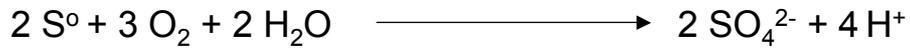
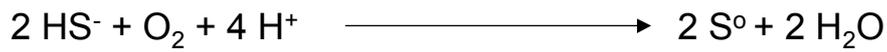


Abb.: Fritsche (1999)

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Oxidation reduzierter Schwefelverbindungen

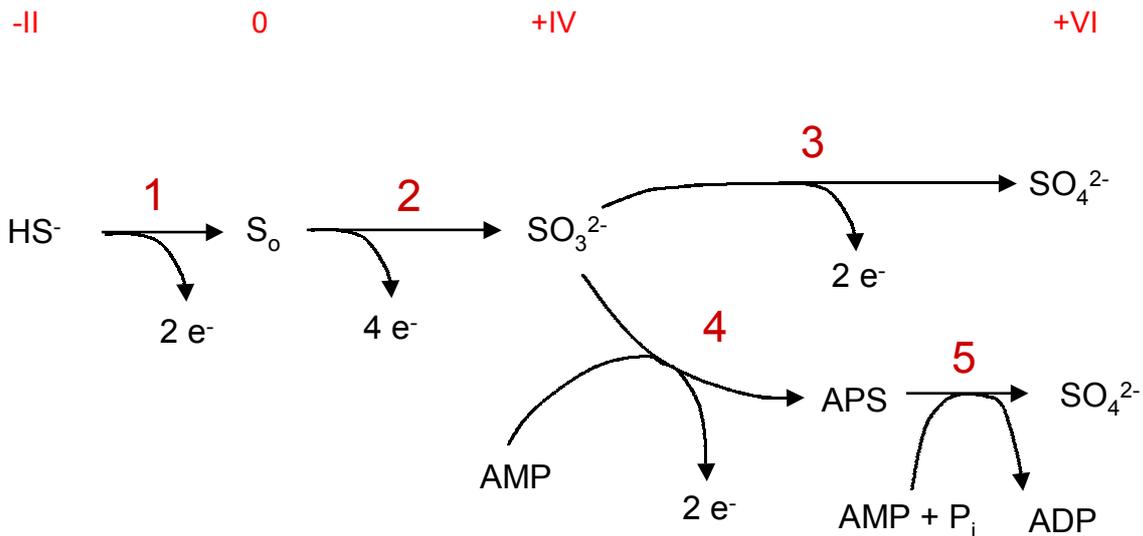


Filamente von *Beggiatoa* sp. Mit intrazellulären Schwefelkörnern.  
(Brock, 9th Ed.)

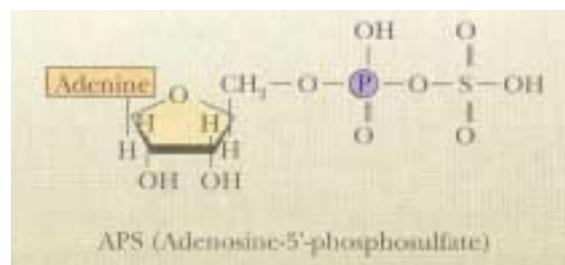
ATP?

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Oxidationsstufe des Schwefels



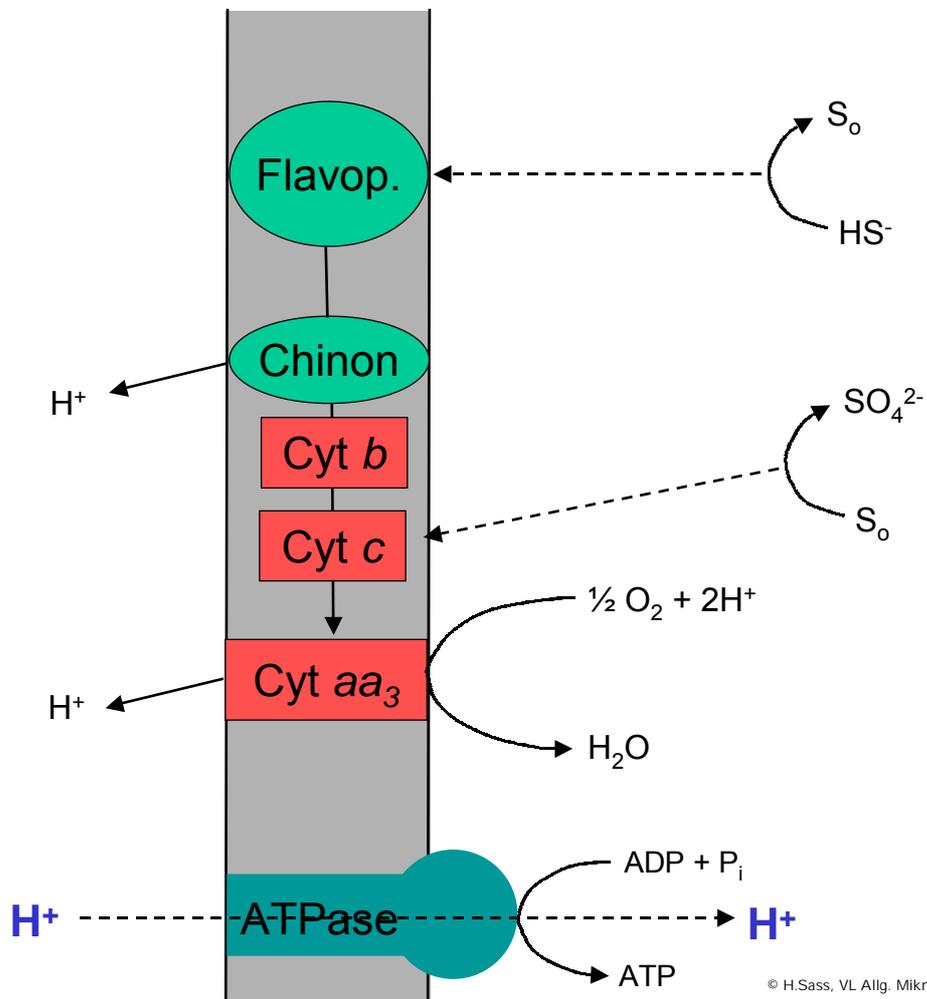
- 1 Sulfid-Oxidoreduktase
- 2 Schwefel-oxidierendes Enzym
- 3 Sulfit-Oxidoreduktase
- 4 Adenosin-Phosphosulfat-Reduktase
- 5 ADP-Sulfurylase



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Periplasma

Cytoplasma

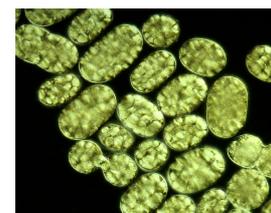
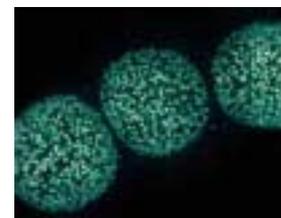


© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

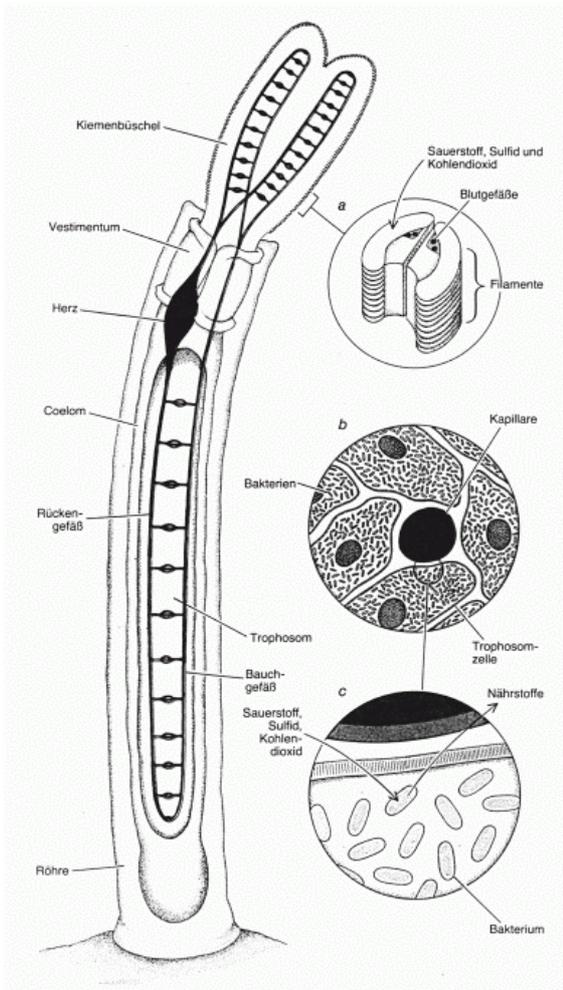
Weitere schwefeloxidierende Mikroorganismen:

Archaea      *Acidianus* sp.  
                  *Sulfolobus* sp.

Bacteria      *Thiosphaera* sp.  
                  *Thiomicrospira* sp.  
                  *Thiomargarita* sp.  
                  *Thioploca* sp.  
                  *Achromatium* sp.



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



## *Riftia pachyptila*

Bis zu 2 m langer Röhrenwurm an *hydrothermal vents* der Tiefsee.

Der Wirt versorgt die im Trophosomengewebe sitzenden symbiontischen Bakterien mit allen notwendigen Nährstoffen, die er über die Kiemen aufnimmt. Das Trophosom macht etwa 50 % der Masse des Wurms aus.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Schwefel- und Eisenoxidierer

*Acidithiobacillus thiooxidans*

und

*Acidithiobacillus ferrooxidans*

früher

*Thiobacillus thiooxidans* und *Thiobacillus ferrooxidans*

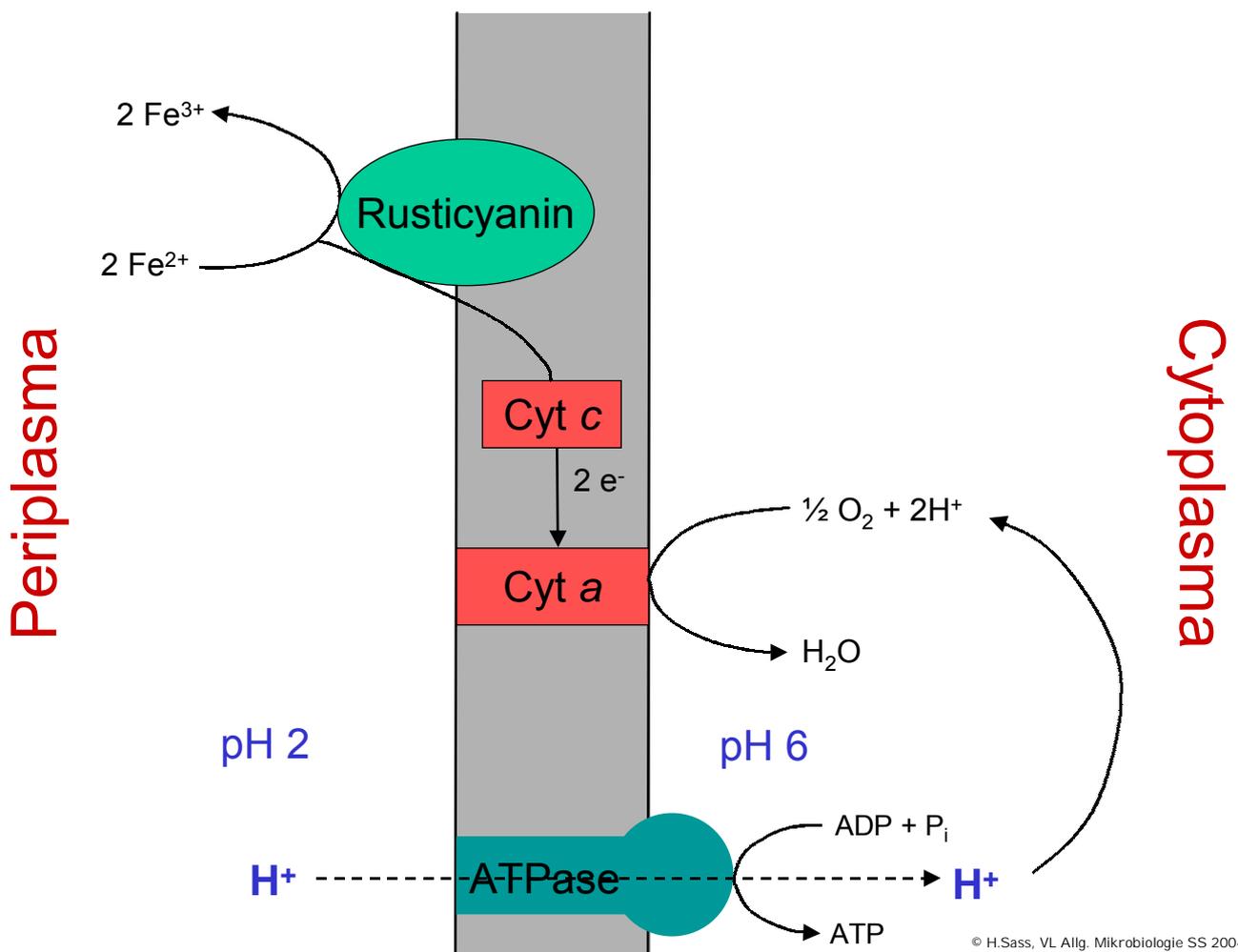
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

# Eisenoxidation



ATP?

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

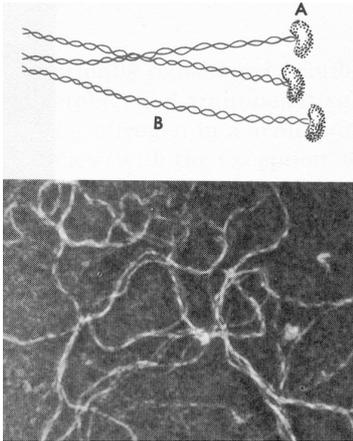


Acidophile Eisenoxidierer

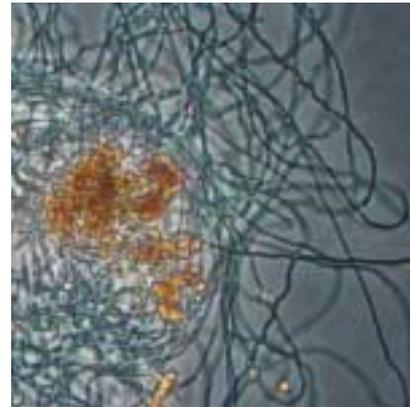
*Acidithiobacillus ferrooxidans*  
*Leptospirillum ferrooxidans*  
*Metallosphaera sedula*

Neutrophile Eisenoxidierer

*Gallionella ferruginea*  
*Leptothrix discophora*



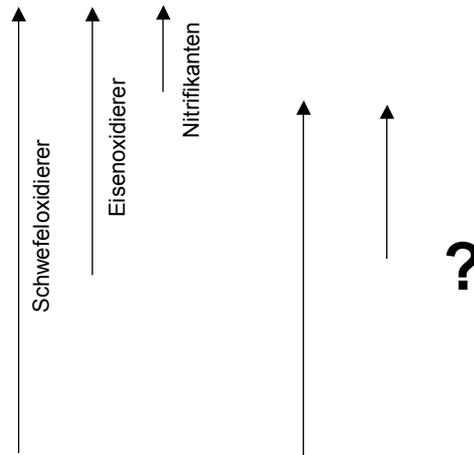
Links:  
*Gallionella ferruginea*,  
Oben: schematische  
Darstellung, unten:  
„Eisenstiele“



Rechts: *Leptothrix* sp.,  
gewachsen auf  $Mn^{2+}$ , zu  
erkennen die braunen  
 $MnO_2$ -Ausfällungen.

Anaerobe lithotrophe Organismen ?

	$E_o'$ [mV]	
$O_2/H_2O$	<b>+820</b>	<b>Aerobe Atmung</b>
$NO_3^-/NH_4$	<b>+363</b>	<b>Nitratammonifikation</b>
$MnO_2/Mn^{2+}$	<b>+390</b>	<b>Manganreduktion</b>
$FeOOH/Fe^{2+}$	<b>+150</b>	<b>Eisenreduktion</b>
$SO_4^{2-}/HS^-$	<b>- 218</b>	<b>Sulfatreduktion</b>
$S^0/HS^-$	<b>- 240</b>	<b>Schwefelreduktion</b>



—————→ Nitratabhängige Oxidation von Fe(II) und Sulfid

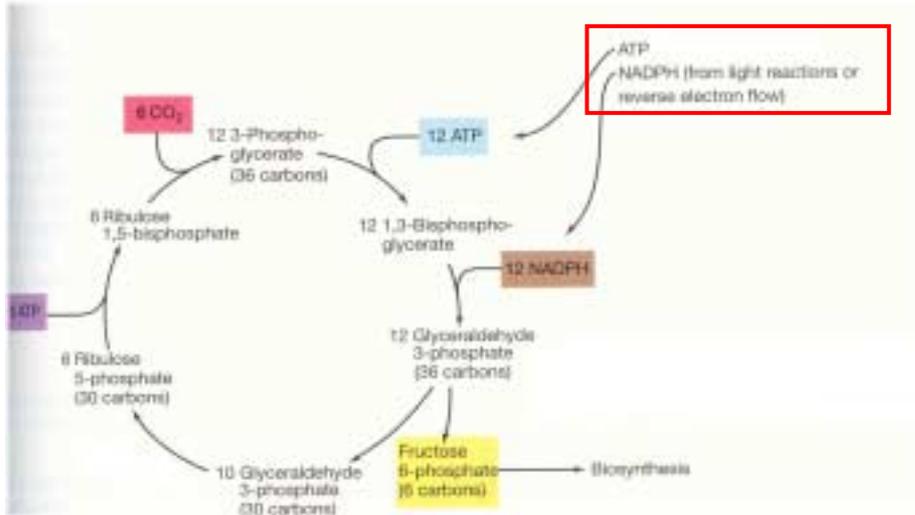
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Assimilation ?

Die meisten lithotropen Mikroorganismen sind autotroph.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## CO<sub>2</sub>-Fixierung meist über Calvin-Zyklus



Für den Aufbau eines Moleküls Fructose-6-Phosphat werden benötigt:

**6 CO<sub>2</sub>**

**18 ATP**

**12 NADPH**

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Problem: Woher kommen die NADH für den Biomasseaufbau?

	$E_o'$ [mV]	
<b>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O</b>	<b>+820</b>	<b>Aerobe Atmung</b>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/N<sub>2</sub></b>	<b>+751</b>	<b>Denitrifikation</b>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NH<sub>4</sub></b>	<b>+363</b>	<b>Nitratammonifikation</b>
<b>MnO<sub>2</sub>/Mn<sup>2+</sup></b>	<b>+390</b>	<b>Manganreduktion</b>
<b>FeOOH</b>	<b>+150</b>	<b>Eisenreduktion</b>
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/HS<sup>-</sup></b>	<b>- 218</b>	<b>Sulfatreduktion</b>
<b>S<sup>0</sup>/HS<sup>-</sup></b>	<b>- 240</b>	<b>Schwefelreduktion</b>
<hr/>		
<b>NADH/NAD<sup>+</sup></b>	<b>- 320</b>	
<b>FADH/FAD<sup>+</sup></b>	<b>- 220</b>	
<b>H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub></b>	<b>- 420</b>	

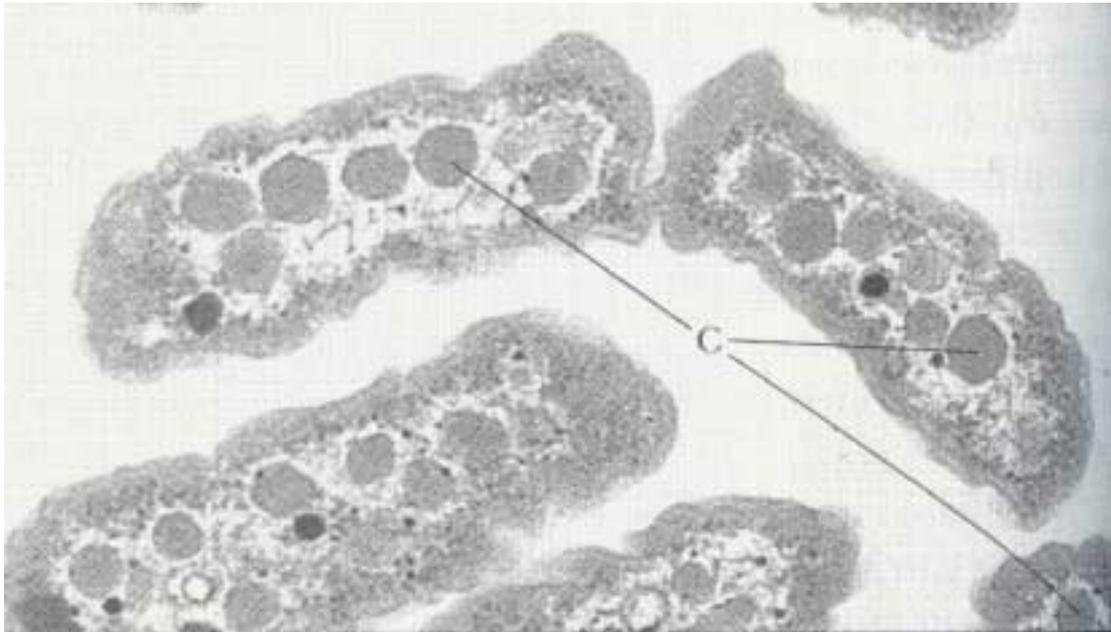
↑ Elektronen müssen gegen das thermodynamische Gefälle auf NADH übertragen werden.

**Reverser Elektronentransport**

Bsp. Fe-Oxidierer

$$\begin{aligned} \Delta G_o' &= - z \cdot F \cdot \Delta E_o' \\ &= - 2 \cdot 96500 \text{ As} \cdot 0,47 \text{ V} \\ &= - 90,7 \text{ kJ/mol NADH} \end{aligned}$$

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



Carboxysomen

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

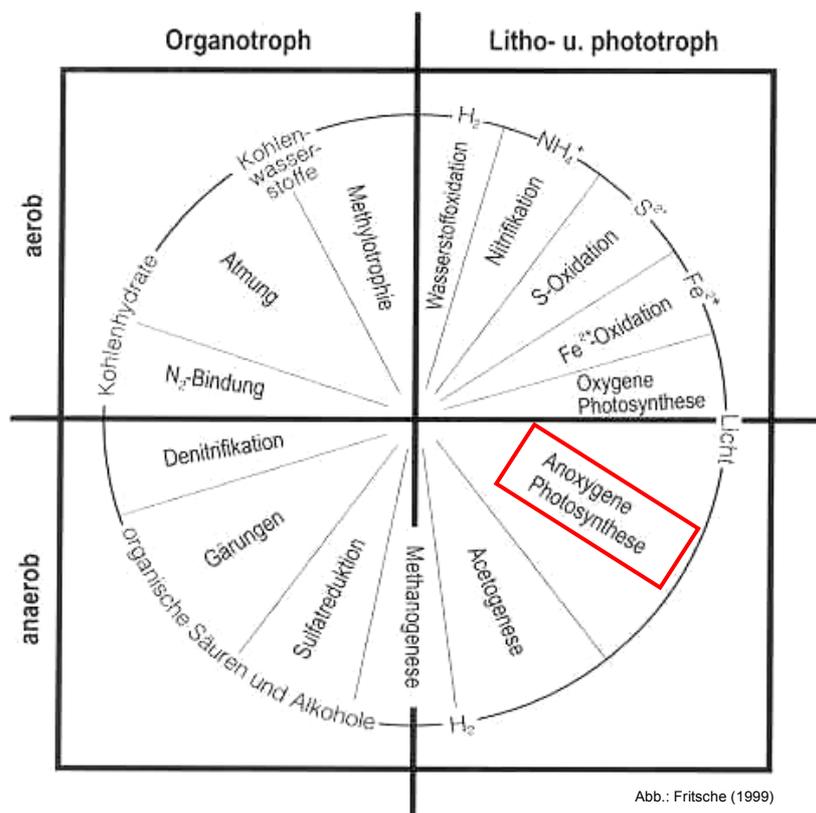


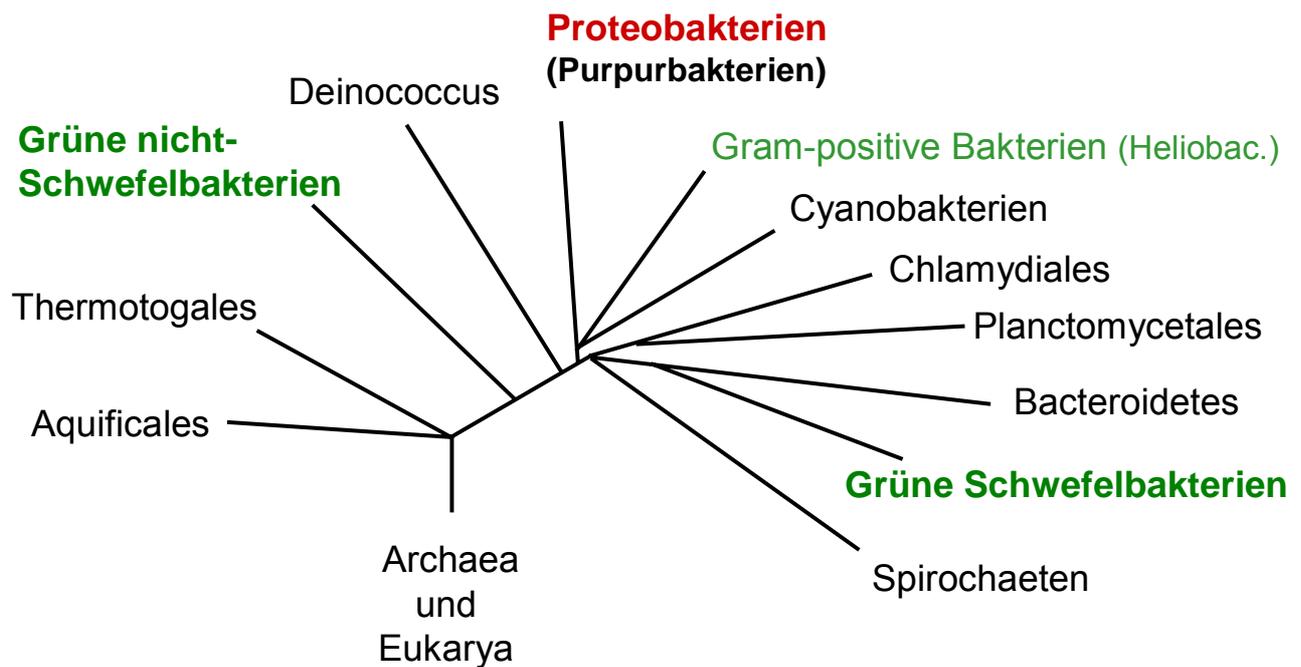
Abb.: Fritsche (1999)

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Anoxygene Phototrophe Bakterien

- |                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Nicht-Schwefel-Purpurbakterien | <i>Rhodospirillum rubrum</i>    |
| 2. Schwefel-Purpurbakterien       | <i>Chromatium okenii</i>        |
| 3. Grüne Schwefelbakterien        | <i>Chlorobium limicola</i>      |
| 4. Grüne nicht-Schwefelbakterien  | <i>Chloroflexus aurantiacus</i> |
| 5. Heliobakterien                 | <i>Heliobacillus chlorum</i>    |

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

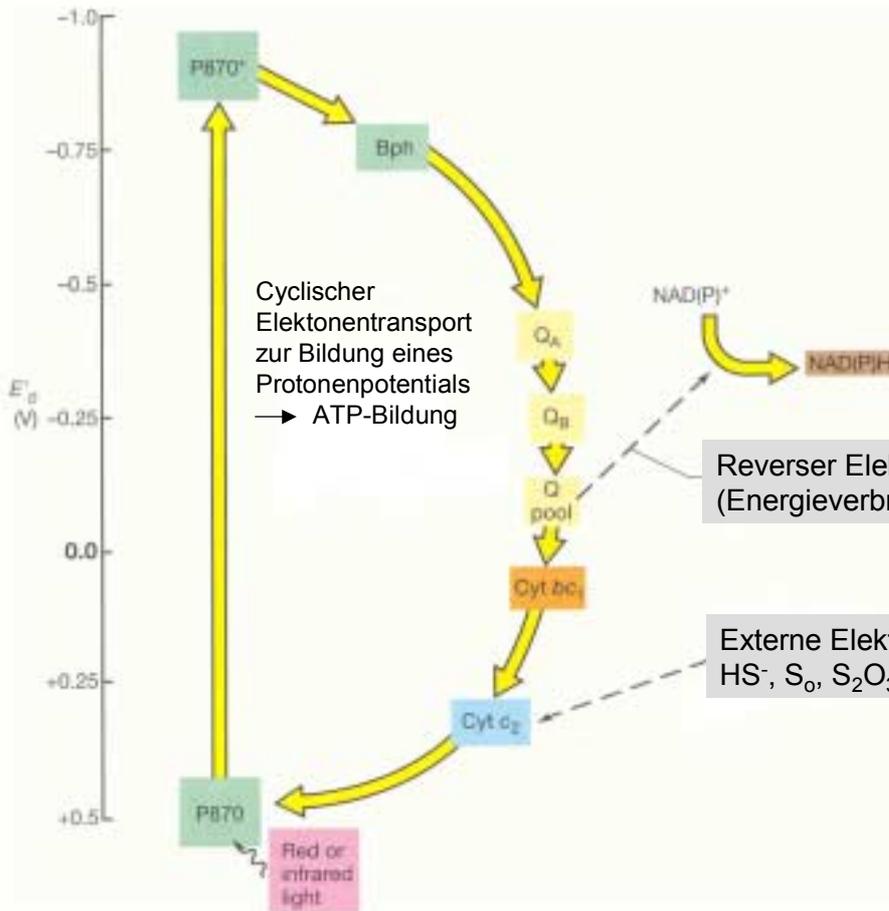
	Pigmente	e <sup>-</sup> -Donatoren , CO <sub>2</sub> -Fixierung
1. Nicht-Schwefel-Purpurb.	Bacteriochlorophyll a, b Carotinoide	einfache org. Substrate Calvin-Cyclus
2. Schwefel-Purpurbakterien	Bacteriochlorophyll a, b Carotinoide	H <sub>2</sub> , HS <sup>-</sup> , S <sub>0</sub> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> einfache org. Substrate Calvin-Cyclus
3. Grüne Schwefelbakterien	Bacteriochlorophyll c, d, e Chlorobactin, Carotinoide (Chlorophyll a)	H <sub>2</sub> , HS <sup>-</sup> , S <sub>0</sub> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Reduktiver Tricarbonsre.-Cyclus
4. Grüne nicht-Schwefelb.	Bacteriochlorophyll a, c, d β-, γ-Carotin	H <sub>2</sub> , einfache org. Substrate Hydroxypropionat-Weg
5. Heliobakterien	Bacteriochlorophyll g Hydroxychlorophyll a	H <sub>2</sub> , einfache org. Substrate

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Aerob chemoorganoheterotrophes Wachstum bei  
Purpur-Schwefelbakterien  
Nicht-Schwefel-Purpurbakterien

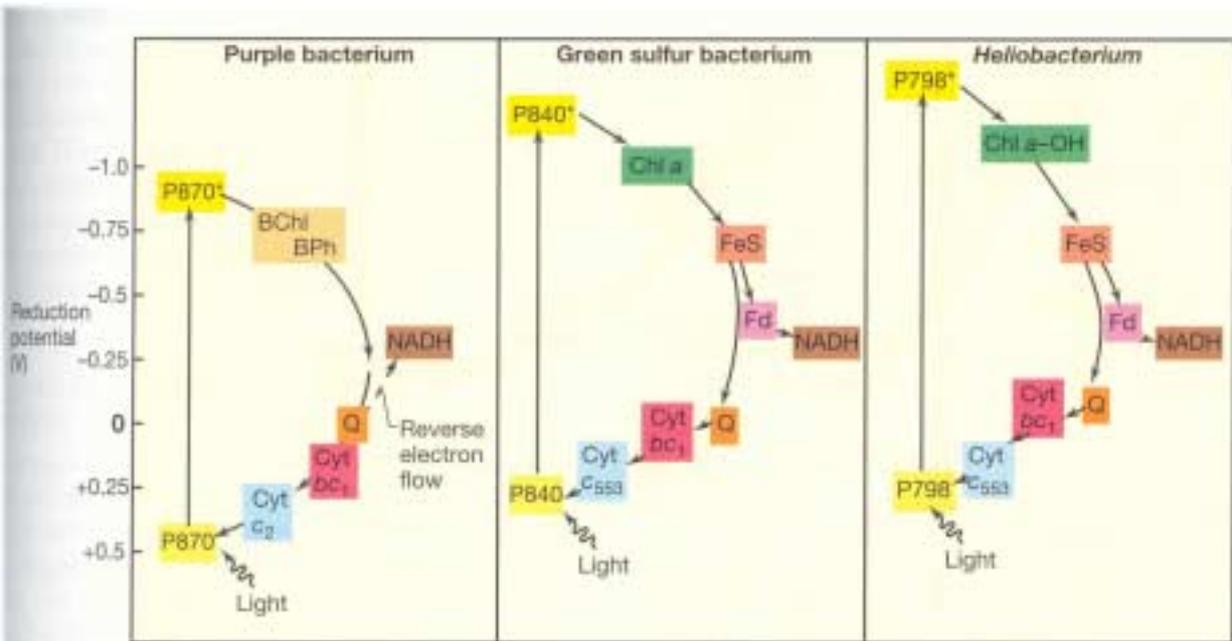
Grüne Schwefelbakterien und Heliobacillen sind strikt anaerob

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



Schematischer Aufbau des Photosyntheseapparates von Schwefel-Purpurbakterien

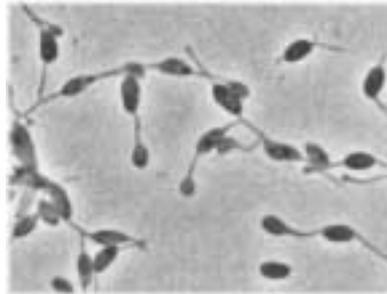
Vergleich des Elektronenflusses bei unterschiedlichen anoxygenen phototrophen Bakterien



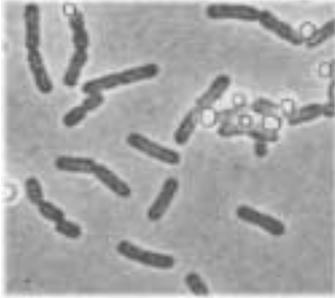
Brock, 9th Ed.



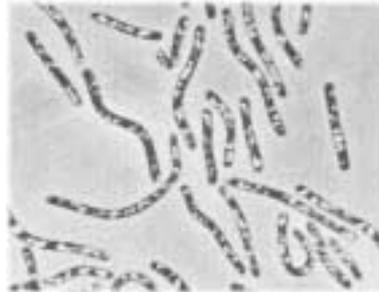
*Chromatium okenii*, ein Schwefel-Purpurbakterium mit intrazellulären Schwefeltropfen



*Rhodomicrobium vanielii*, ein knospendes Nicht-Schwefel-Purpurbakterium



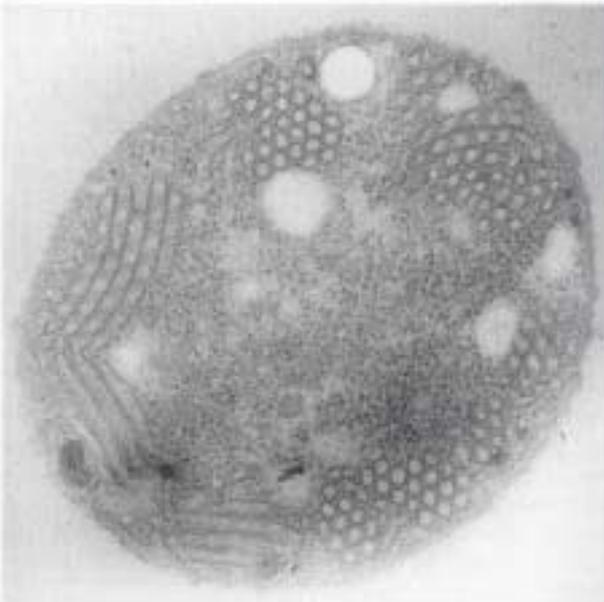
*Chlorobium limicola*, ein Grünes Schwefelbakterium mit extrazellulären Schwefeltropfen



*Chloroherpeton* sp., ein Grünes Nicht-Schwefel-Purpurbakterium mit Gasvakuolen

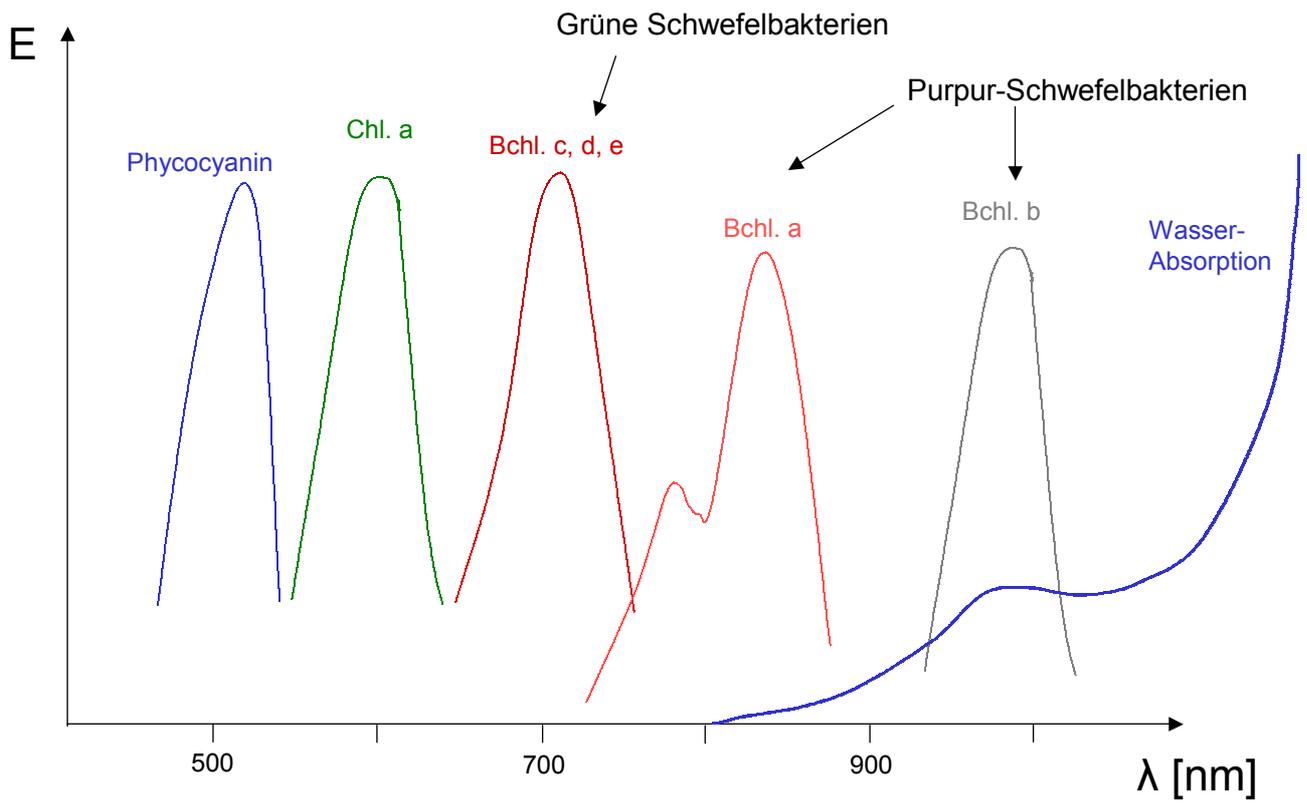
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Brock, 9th Ed.



*Thiocapsa pfennigii* mit intrazellulären Membransystemen.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



Mikrobenmatte an der Sippewisset Salt Marsh (Ostküste, USA).

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

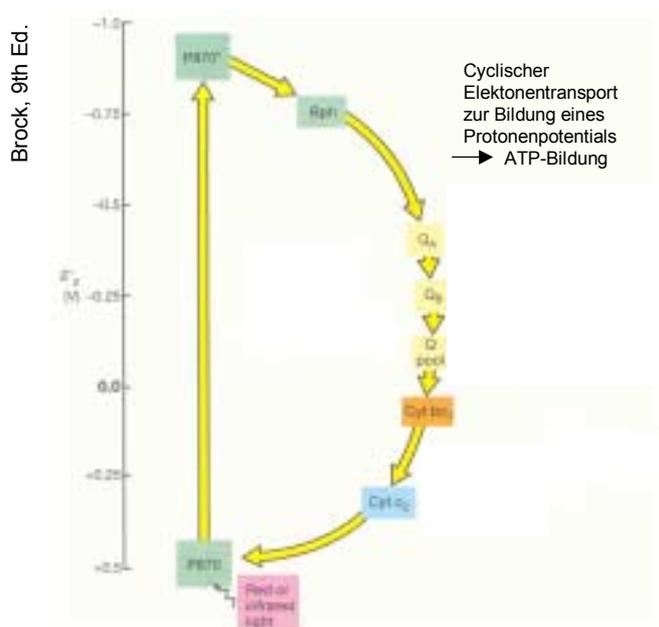
	Gelb-Braun	Diatomeen, Cyanobakterien	<i>Navicula</i> , <i>Lyngbya</i> , u.a.	Chl a 680 nm	Oxygene Photosynthese $2 \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{light}} \text{O}_2 + 4 [\text{H}]$
	Bläulich-Grün	Cyanobakterien	<i>Microcoleus</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Phormidium</i>		
	Rosa-rot	Schwefel- Purpurbakterien	<i>Thiocapsa roseopersicina</i> , <i>Thiocystis</i>	Bchl a 850 nm	Anoxygene Photosynthese $\text{H}_2\text{S} \xrightarrow{\text{light}} \text{S} + 2 [\text{H}]$
	Orange-Braun			<i>Thiocapsa pfennigii</i>	
	Oliv	Grüne Schwefel- Bakterien	<i>Prosthecochloris</i>	Bchl c 740 nm	
	Grau- schwarz	FeS-haltiges Sediment	Sulfatreduzierer		

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Bacteriochlorophyll in aerob anoxygenen phototrophen Bakterien:

Bsp. *Erythromicrobium* sp., *Roseobacter* sp.

Ökologische Rolle noch weitgehend ungeklärt.



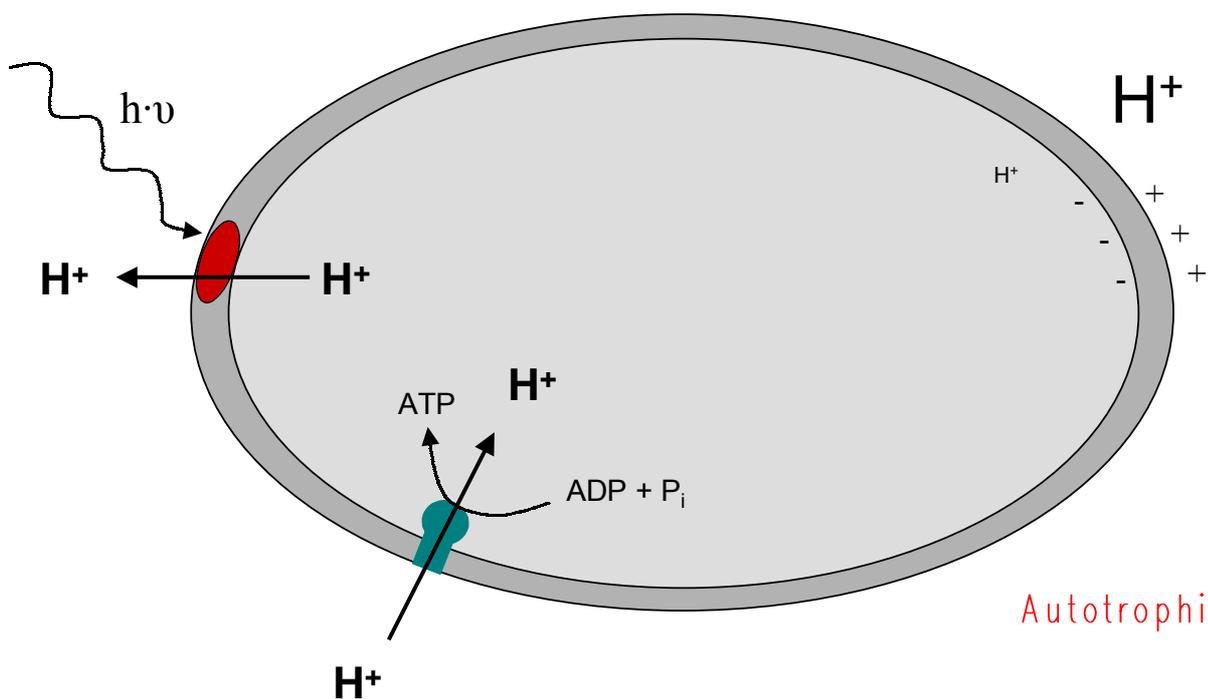
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Andere phototrophe Mikroorganismen

*Halobacillus salinarum*

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Halobakterien gehören zu den Archaeen. Sie enthalten in den Membran eines dem Sehpurpur analoges Pigment, das Bacteriorhodopsin (Purpurmembran).



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Eine dem Bakteriorhodopsin homologe Protonenpumpe wurde in Klonbibliotheken aus dem Oberflächenwasser des Pazifischen Ozeans nachgewiesen (Proteorhodopsin).

Die ökologische Bedeutung dieser Enzyme ist noch unklar.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Vorlesung: Allgemeine Mikrobiologie

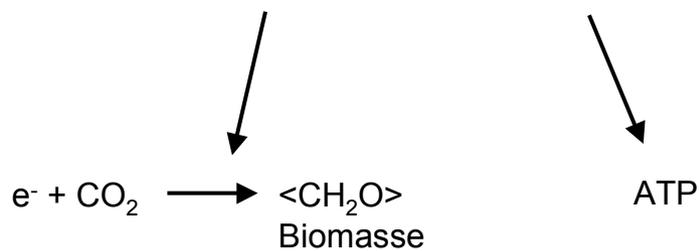
Ausgewählte Prokaryoten -

Lithotrophe Organismen

[www.icbm.de](http://www.icbm.de)

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

	Elektronen- donator	Energie- quelle	
Anoxygene Photosynthese	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , H <sub>2</sub>	Licht	Photolithoautotroph
Oxygene Photosynthese	H <sub>2</sub> O	Licht	Photolithoautotroph
Chemosynthese	NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, Fe <sup>2+</sup>	Chemische Reaktion	Chemolithoautotroph



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

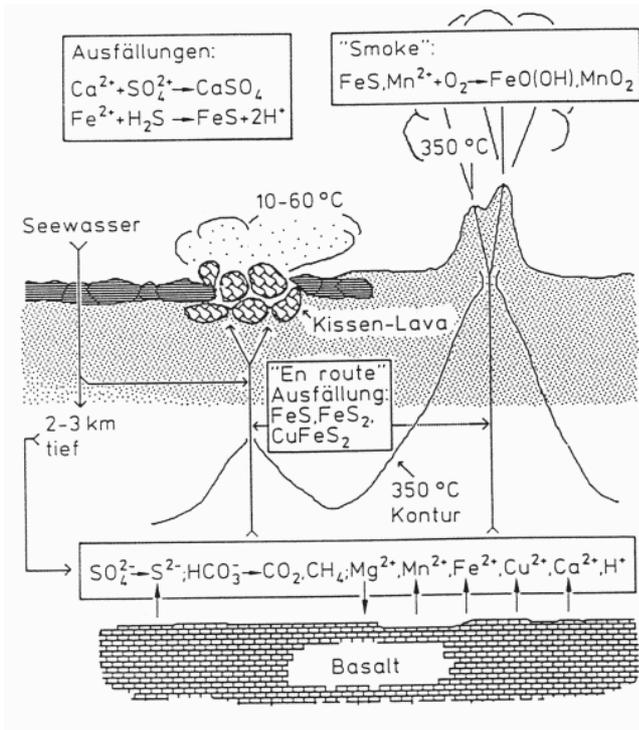
## Produktion in Sedimenten

-Chemosynthese, z.B. *hydrothermal vents*

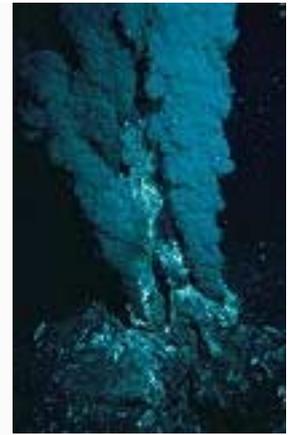


Oben: Die Richtungen der Bewegung der 12 großen Platten sind hier dargestellt, die Länge der Pfeile gibt die wahrscheinlichen relativen Geschwindigkeiten an.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



**Abb. 4.1.** Geophysikalische und -chemische Prozesse innerhalb der ozeanischen Erdkruste und in der Umgebung der heißen Tiefseequellen. Während des Eindringens in die Erdkruste wird das Seewasser auf 400 bis 800 °C erhitzt und stark reduziert, wobei Metallsulfide ausgefällt werden. Nach Lösung verschiedener Mineralien steigt die Hydrothermalflüssigkeit wieder auf und erreicht den Meeresboden entweder unvermischt mit 350 bis 360 °C oder vermischt mit sauerstoffhaltigem kaltem (2 bis 3 °C) Seewasser (nach [7]).



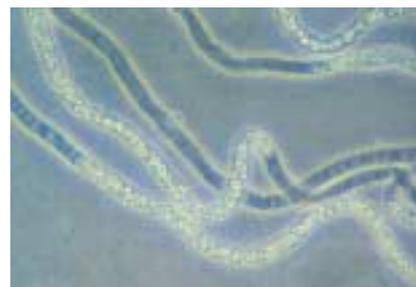
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Energiegewinnung (Dissimilation)



-204 kJ / Reaktion (2 ATP)

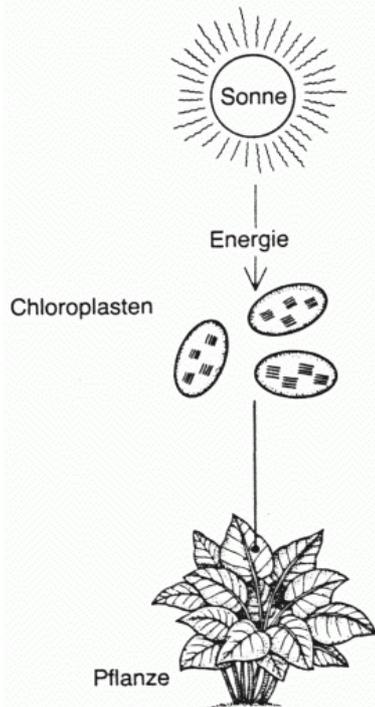
Biomassesynthese (Assimilation)



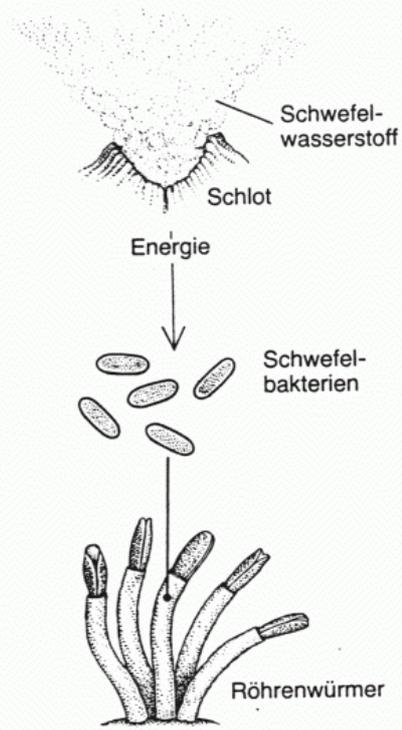
Filamente von *Beggiatoa* sp. Mit intrazellulären Schwefelkörnern. (Brock, 9th Ed.)

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Photosynthese

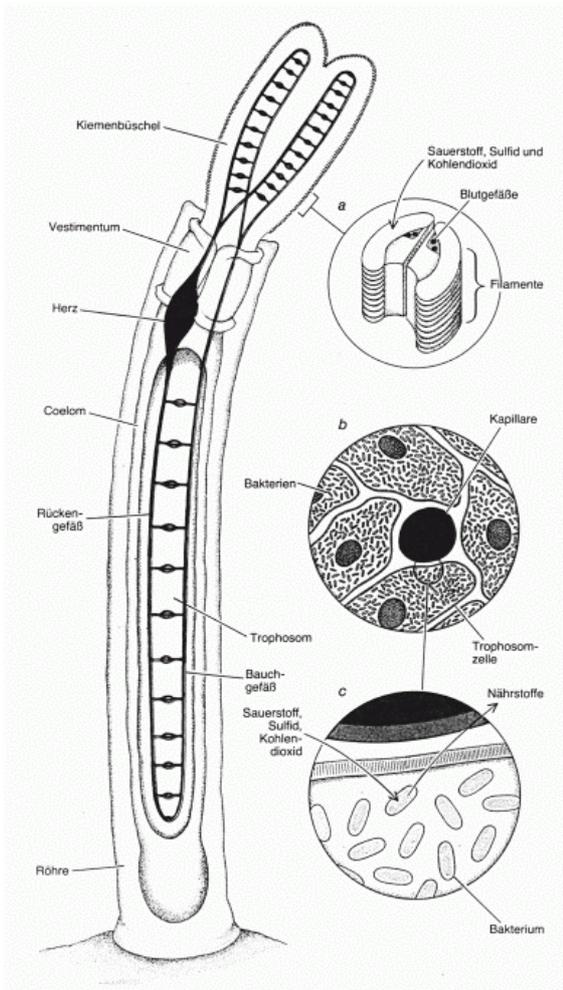


## Chemosynthese



Childress et al. 1987

## Chemosynthetische Bakterien als Symbionten



### *Riftia pachyptila*

Bis zu 2 m langer Röhrenwurm.

Der Wirt versorgt die im Trophosomengewebe sitzenden symbiontischen Bakterien mit allen notwendigen Nährstoffen, die er über die Kiemen aufnimmt. Das Trophosom macht etwa 50 % der Masse des Wurms aus.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

-Schwefeloxidierende Bakterien als Aufwuchs der abgegrast wird



*Alvinella pompeijana* ein Röhrenwurm, der an Hydrothermalquellen. Der Wurm besitzt einen Aufwuchs von fädigen SOB, der vom Wurm abgeweidet wird.

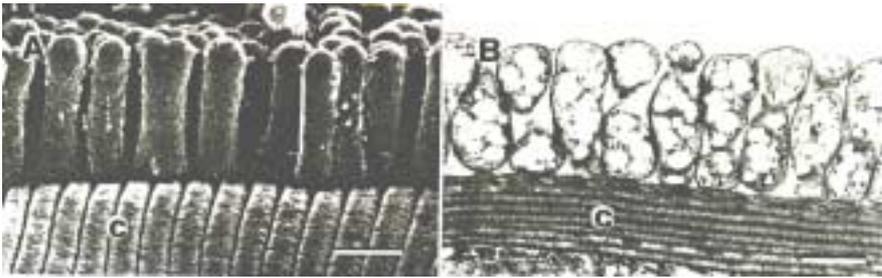
-Schwefeloxidierende Bakterien als Endosymbionten



*Calyptogenia magnifica*, mit endosymbiontischen schwefeloxidierenden Bakterien in den Kiemen

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

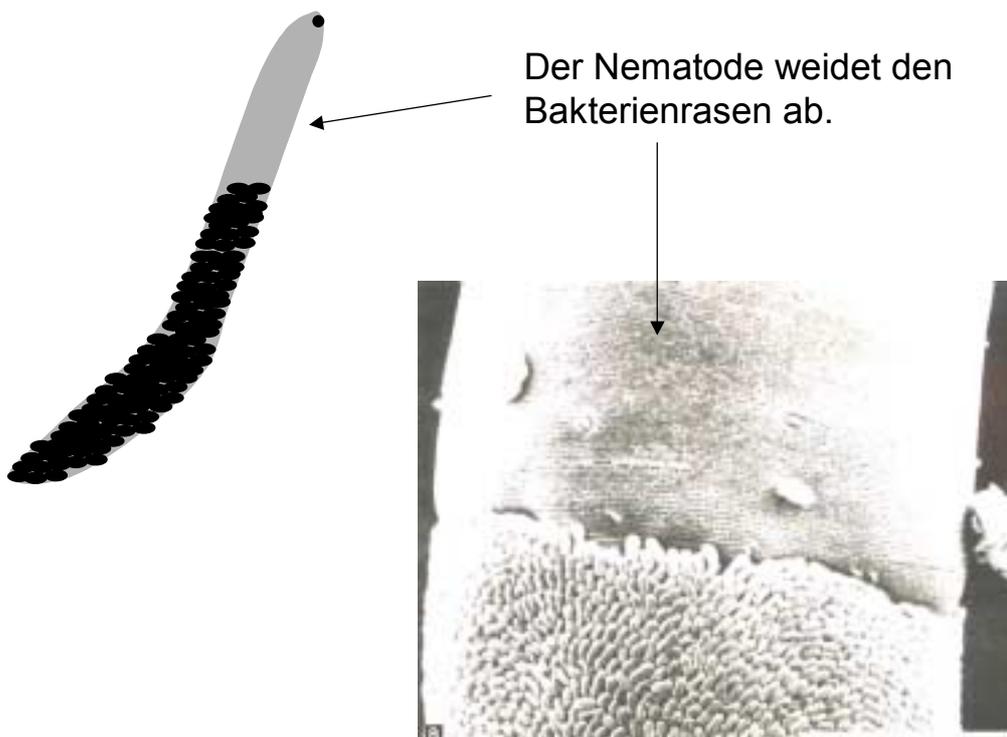
## Nematoden (*Stilbonematidae*):



A: Anordnung epibiontischer Bakterien auf der Cuticula eines *Laxus* sp. (*Stilbonematidae*). Gut zu erkennen die sehr regelmäßige Anordnung der Bakterien und der "Kragen" an dem der Bakterienaufwuchs endet.

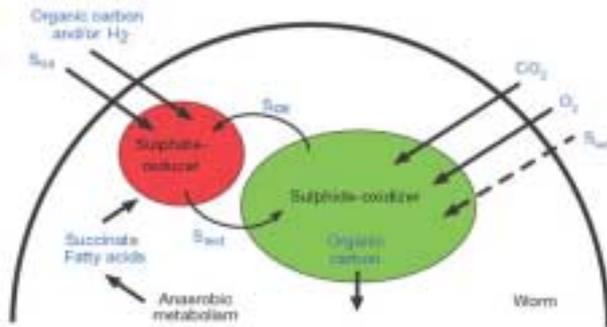
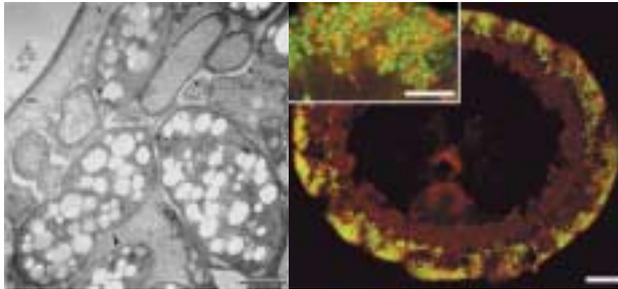
B: TEM Schnitt durch Wurmcuticula und Bakterienrasen. (Polz et al. 1994 Appl Environ Microbiol 60:4461ff.)

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

*Olavius algarvensis* (Tubificidae, Oligochaeta):  
 Vorkommen in sandigen Sedimenten von Seegrasbeständen.  
 Der Organismus hat zwei Typen von Endosymbionten:  
 einen Sulfatreduzierer und einen Schwefeloxidierer.



Oben links: TEM Aufnahme eines Querschnitts durch *O. algarvensis*. Dicht unterhalb der Cuticula die endosymbionten; SOB mit Zelleinschlüssen, SRB ohne Zelleinschlüsse.

Oben rechts: Fluoreszenz *in situ* Hybridisierung der Endosymbionten, SOB sind grün, SRB rot angefärbt.  
 Unten: Schema des postulierten Schwefelkreislauf in *O. algarvensis*. Das System benötigt allerdings externe Elektronendonatoren.

Dubilier et al. 2001 Nature 411:298ff

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Methanoxidierende Bakterien als Endosymbionten

Bsp.

- Pogonophoren (z.B. *Siboglinum poseidon*).
- Muscheln (z.B. *Thyasira sarsii*).



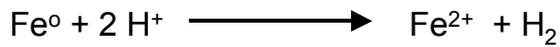
Sickertrichter aus anaerob methanoxidierenden Bakterien und Calciumcarbonat (schwarzes Meer).

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Biokorrosion, *Microbially influenced corrosion* (MIC)

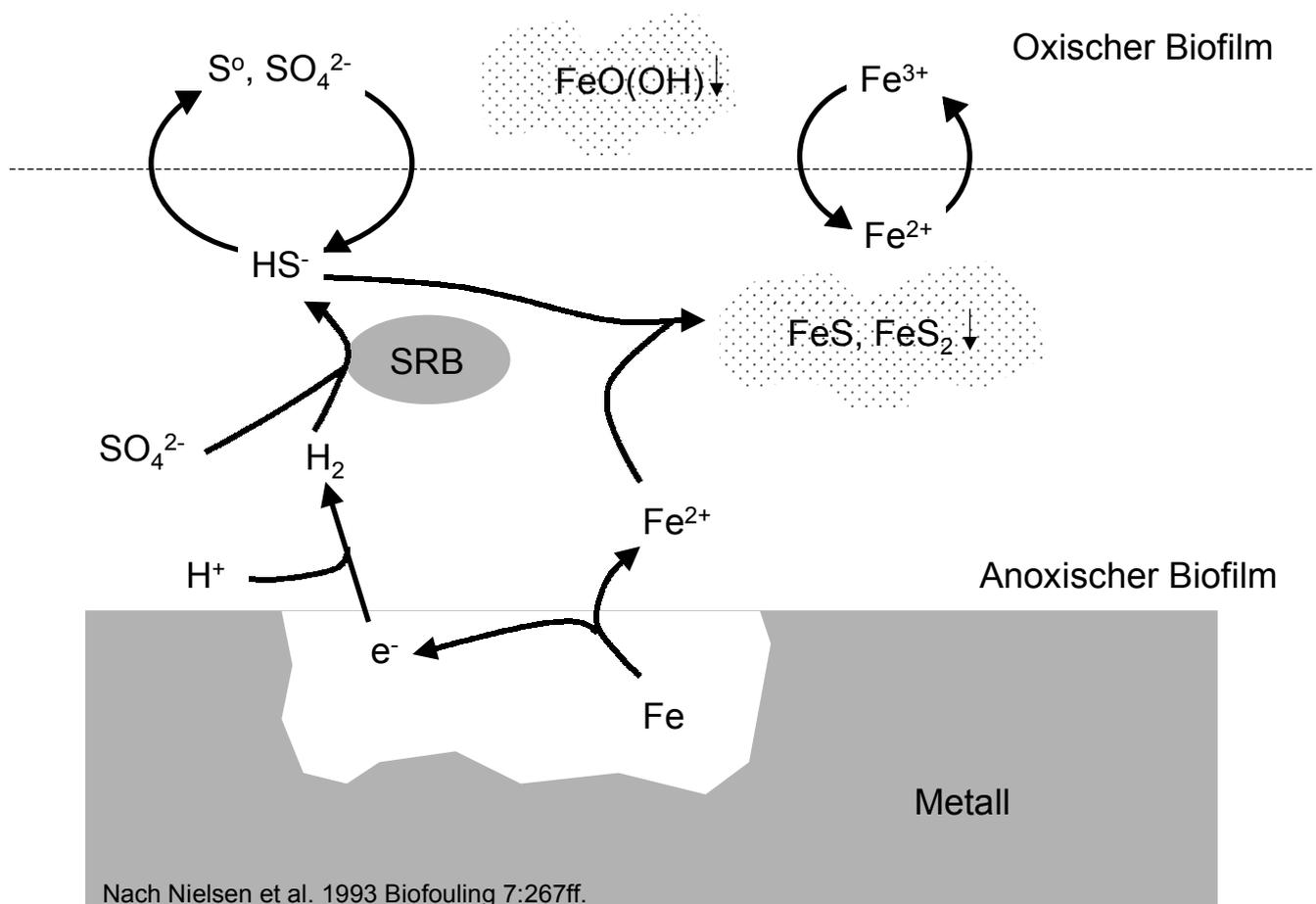
Biokorrosion ist ein Elektrochemischer Prozess, der durch mikrobielle Aktivität gefördert wird.

Die Kathodenreaktion (von Wolzogen Kuhr & van der Vlugt 1934)



Eine wichtige Rolle in der Biokorrosion spielen sulfatreduzierende Bakterien. Sulfatreduzierende Bakterien sind effektive Wasserstoff-Oxidierer. Als Endprodukt des Stoffwechsels entsteht Schwefelwasserstoff, der mit  $\text{Fe}^{2+}$  als schwerlösliches Eisensulfid  $\text{FeS}$  ( $L_p 4 \cdot 10^{-19} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$ ) ausfällt.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Erzlaugung, *Bacterial Leaching*

Bakterielle Erzlaugung wird eingesetzt, wenn der Gehalt an dem zu gewinnenden Metall im Erz nicht sehr hoch ist und sich konventionelle Erzanreicherung nicht rentiert (z.B. Kupfererze meist unter 1 % Cu) oder es sich hauptsächlich um sulfidische Erze handelt (z.B. mit Covellit CuS, Pyrit FeS<sub>2</sub>).

Metallsulfide sind in der Regel sehr schwer löslich:

CuS  $4 \cdot 10^{-28} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$

Ag<sub>2</sub>S  $1 \cdot 10^{-51} \text{ mol}^3 \cdot \text{l}^{-3}$

CdS  $1 \cdot 10^{-29} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$

FeS  $4 \cdot 10^{-19} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$

PbS  $1 \cdot 10^{-29} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$

SnS  $1 \cdot 10^{-28} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$

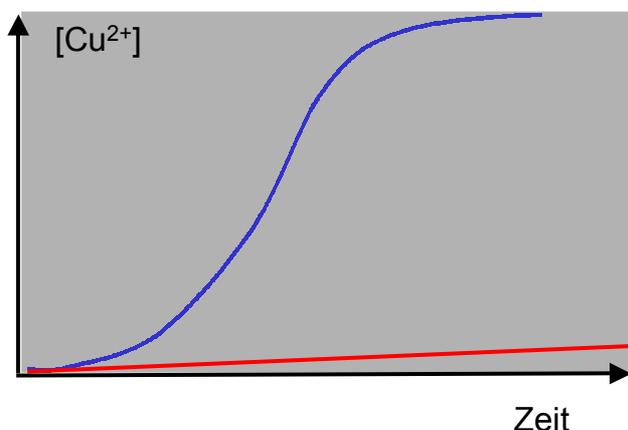
ZnS  $1 \cdot 10^{-24} \text{ mol}^2 \cdot \text{l}^{-2}$

Löslichkeitsprodukte einiger  
Metallsulfide

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Schwefelwasserstoff reagiert spontan mit Luftsauerstoff. Metallsulfide reagieren zwar auch mit O<sub>2</sub>, die Reaktion läuft aber ungemein langsam ab.

→ Beschleunigung der Auflösung der Metallsulfide  
z.B. durch Bakterien wie *Thiobacillus ferrooxidans*



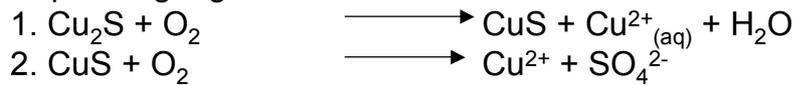
Freisetzung von Cu<sup>2+</sup> aus einem  
Erz mit *Thiobacillus ferrooxidans*  
(blau) und in steriler Kontrolle  
(rot).

Mineralien die leichter spontan oxidieren werden auch von sind auch von Mikroorganismen zuerst aufoxidiert (FeS>CuS>PbS).

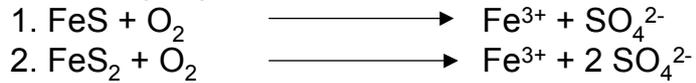
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

*Thiobacillus ferrooxidans* kann Metalle ( $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) als auch Sulfid oxidieren.

Kupferlaugung:



Eisenlaugung (seltener):



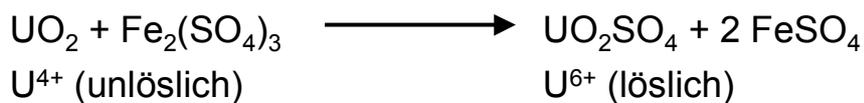
Eisen(III) ist nur bei sauren pH-Werten in Lösung. Bei neutralen pH-Werten fällt es als  $\text{FeO}(\text{OH})$  aus.

Die gelösten Metalle werden nach dem *Leaching*-Vorgang ausgefällt und verhüttet.

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

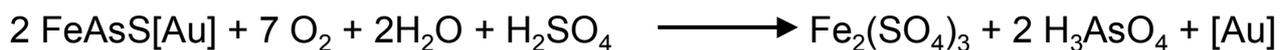
Andere mikrobielle Metalllaugungen:

Uran:



Gold:

Liegt sehr häufig in Mischherzen mit Eisen und Arsen vor.



© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

Schwermetalle die als Elektronendonatoren für die Energiegewinnung durch Lithotrophe genutzt werden können

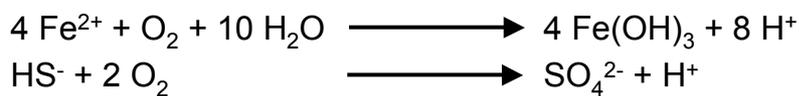
Arsen	Antimon
Chrom	Eisen
Kupfer	Mangan
Molybdän	Quecksilber
Selen	Silber
Technetium	Tellur
Uran	Wismut
Vanadium	Zinn
.....	

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Tagebaurestseen

Häufiges Problem: starke Versauerung (bis pH 1,5, *Acid mine drainage*)  
wenig Pufferkapazität (kalkarmes Grundgestein)  
mikrobielle Oxidation von Eisensulfiden (v.a. Pyrit  $\text{FeS}_2$ )  
(*Thiobacillus* sp.)

Eisen- und Sulfidoxidation:



Pyritoxidation:



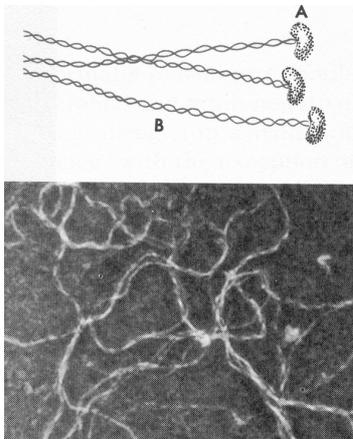
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004



Versauertes Braunkohletagebau-Restloch in der Lausitz.  
Die rostrote Färbung wird durch gelöstes Eisen(III) verursacht.

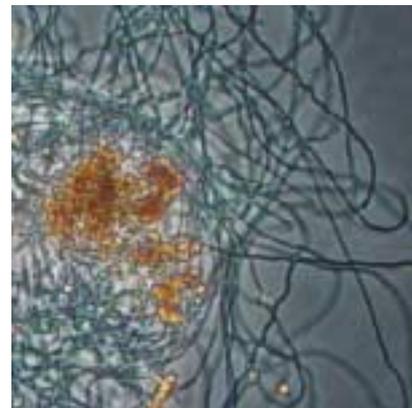
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

## Lithotrophre Mikroorganismen als Mineral/Gesteinsbildner



Links:  
*Gallionella ferruginea*,  
Oben: schematische  
Darstellung, unten:  
„Eisenstiele“

Rechts: *Leptothrix* sp.,  
gewachsen auf  $Mn^{2+}$ , zu  
erkennen die braunen  
 $MnO_2$ -Ausfällungen.



—————> Buntsandstein, Manganknollen

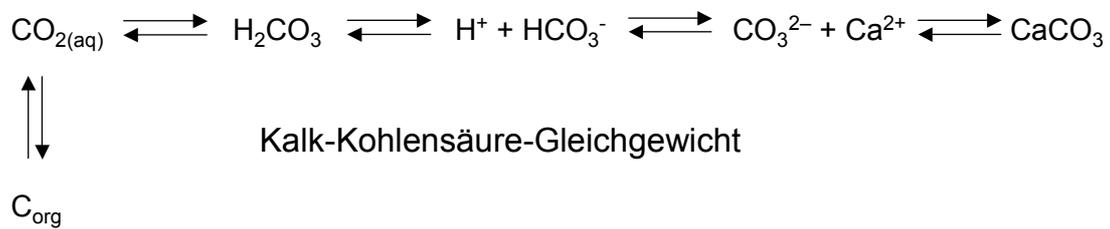
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

# Ausfällung von Calciumcarbonat durch Mikroorganismen

Cyanobacteria (Stromatolithen), Coccolithophoriden (*Emiliana* sp.)



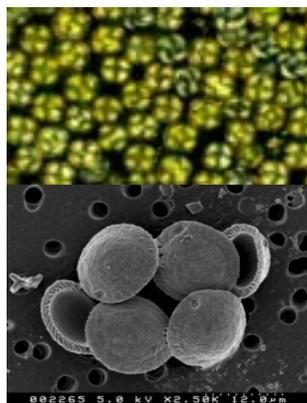
Stromatolithen



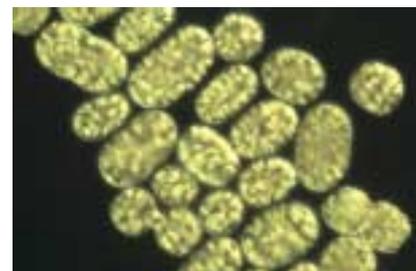
© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004

# Ausfällung von Calciumcarbonat durch Mikroorganismen

Cyanobacteria (Stromatolithen), Coccolithophoriden (*Emiliana* sp.)



*Phacotus lenticularis*, eine Grünalge mit einer  $\text{CaCO}_3$  Hülle  
(Photograph: I. Schlegel)



*Achromatium oxaliferum*, ein Schwefeloxidierer mit intrazellulären  $\text{CaCO}_3$  Kristallen

© H.Sass, VL Allg. Mikrobiologie SS 2004