

# Stoffwechselftypen

Unterscheidung nach

Energiequelle

**phototroph**  
(Lichtenergie)

**chemotroph**  
(Oxidations-Reduktions-Reaktionen)

H- (e<sup>-</sup>)-Donator

**photo-lithotroph**  
(z. B. H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, S, Fe)

**photo-organotroph**  
(organ. Substanzen)

**chemo-lithotroph**  
(z. B. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

**chemo-organotroph**  
(organ. Substanzen)

z. B. grüne Pflanzen,  
Cyanobakterien,  
Schwefelpurpurbakterien

z. B. Purpurbakterien

z. B. Ammonium-oxidierer  
(*Nitrosomonas*,  
*Nitrobacter*)

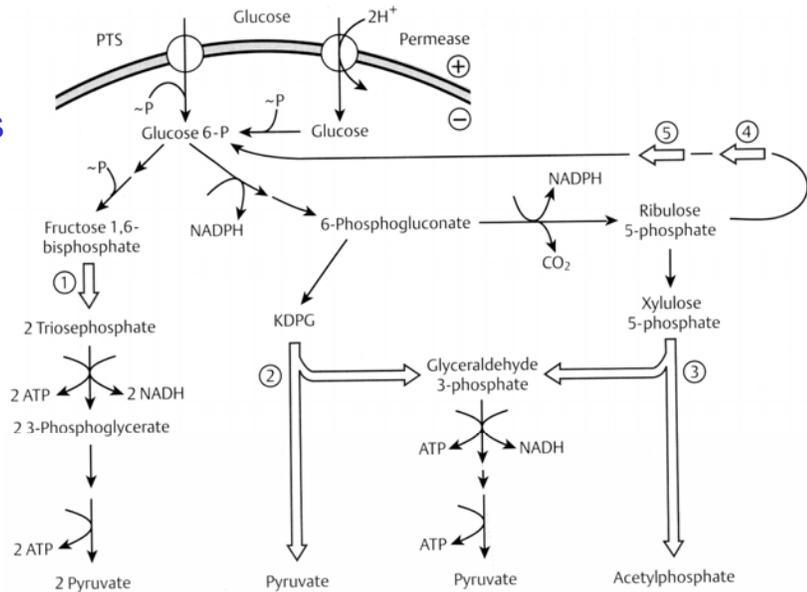
- Gärungen  
- Anaerobe Atmung  
- Aerobe Atmung  
- Unvollst. Oxidation

C-Quelle

**autotroph**  
(CO<sub>2</sub>)

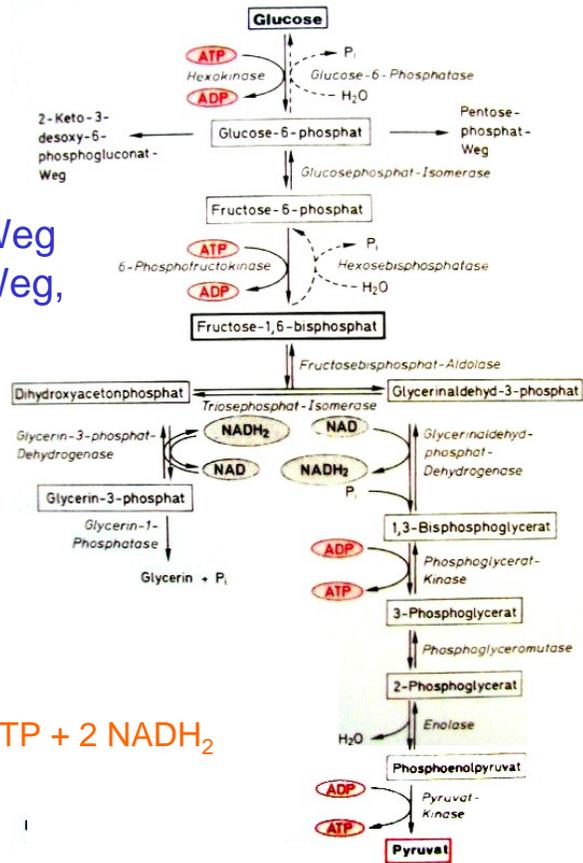
**heterotroph**  
(organ. Substanzen)

## Wege des Glukoseabbaus



Embden-Meyerhof	Entner-Doudoroff	Phosphoketolase	Oxidativer Pentose-phosphat-Weg
2 Pyruvate 2 ATP 2 NADH	2 Pyruvate 1 ATP 1 NADH 1 NADPH	Acetylphosphate, Pyruvate, CO <sub>2</sub> 1 ATP 2 NADPH 1 NADH	3 CO <sub>2</sub> , Pyruvate 1 ATP 6 NADPH 1 NADH
① ↓ Fructose-1,6-bisphosphate aldolase	② ↓ KDPG aldolase	③ ↓ Phosphoketolase	④ ↓ Transaldolase, ⑤ ↓ Transketolase

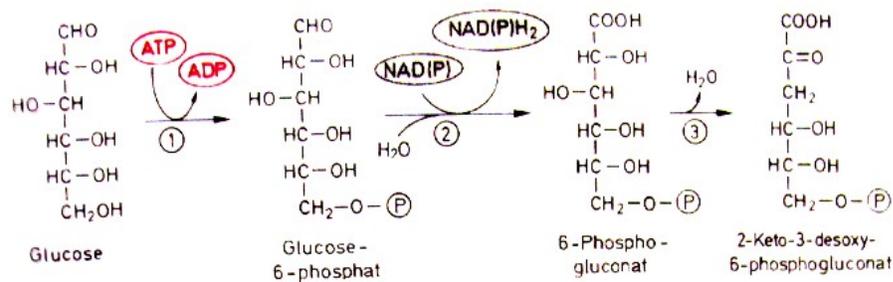
## Embden-Meyerhof-Parnas-Weg (Fruktose-1,6-bisphosphat-Weg, FBP-Weg)



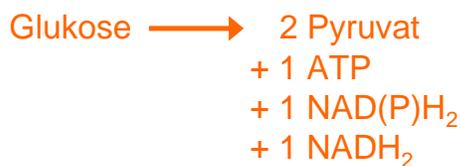
Bilanz:



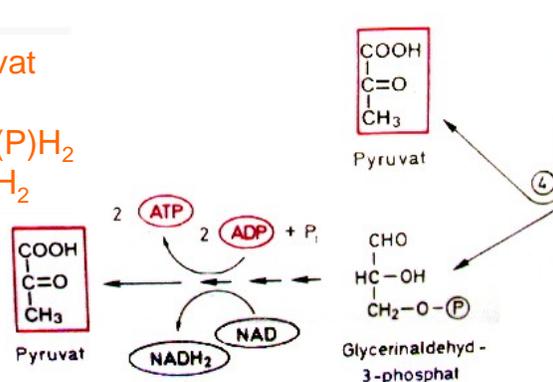
## Entner-Doudoroff-Weg (2-Keto-3-desoxy-phosphogluconat-Weg, KDPG-Weg)

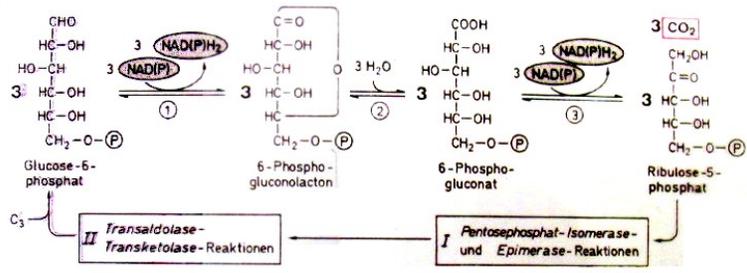


Bilanz:

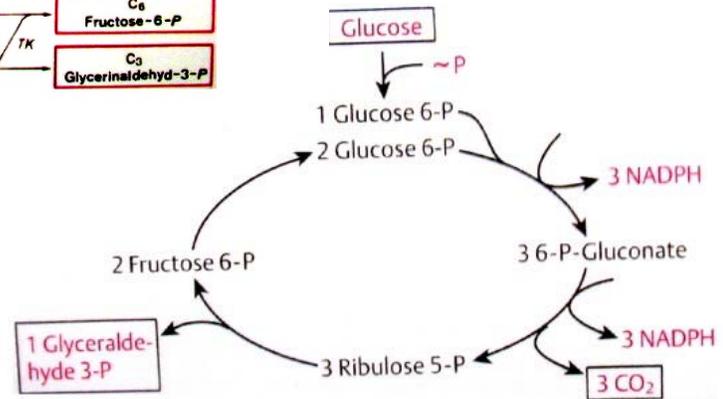
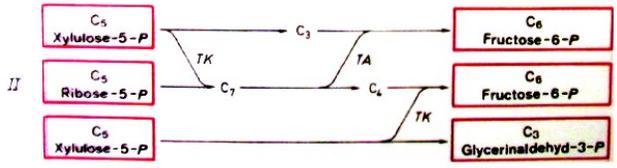
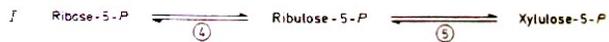


z.B.  
*Pseudomonas*  
*Wautersia (Rlstonia)*  
*Zymomonas*



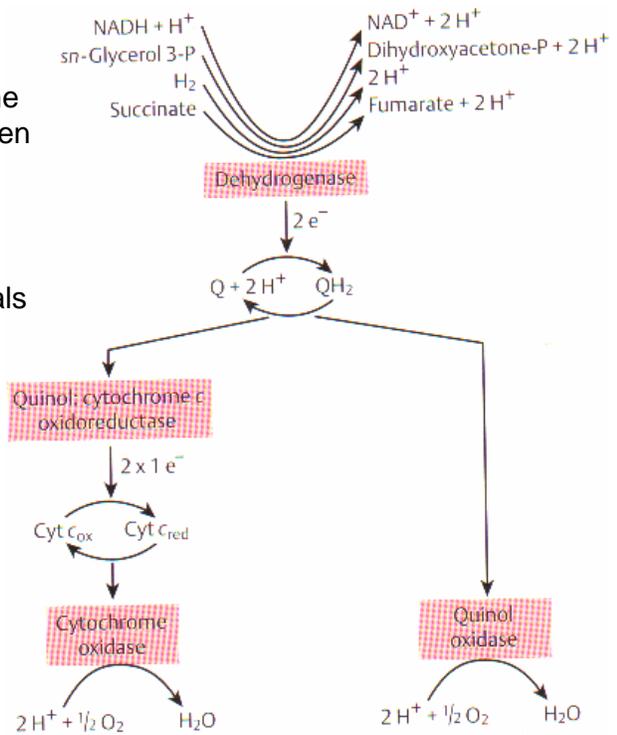


## Oxidativer Pentosephosphat-Weg



## Variationen der Atmungskette in Bakterien

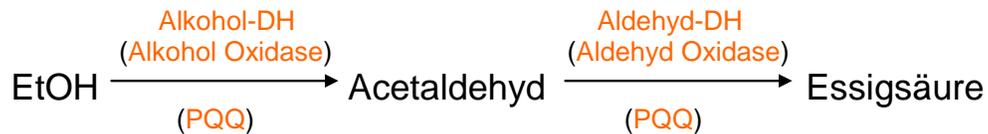
- Elektronen können über verschiedene Dehydrogenasen in die Atmungsketten eingeschleust werden
- es gibt Atmungsketten mit und ohne Chinol:Cytochrom c Oxidoreductase
- viele Bakterien verfügen über mehr als eine terminale Reductase (Oxidase)



## Unvollständige Oxidation

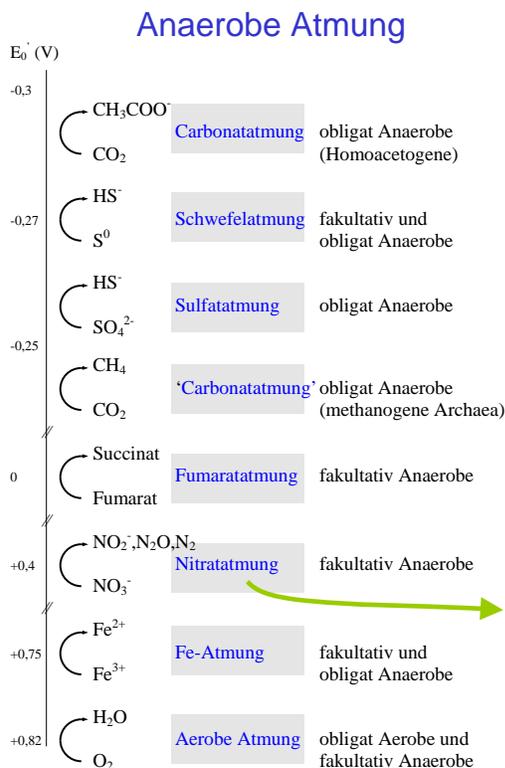
- Substrate werden unvollständig oxidiert
- Unvollständig oxidierte Substanzen wie organische Säuren häufen sich im Medium an (z.B. Acetat, Gluconat, Fumarat, Citrat)

z.B.: Essigsäurebakterien wie *Acetobacter* oder *Gluconobacter*



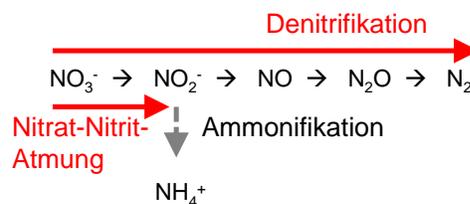
Peroxidierer können die organischen Säuren langsam weiter oxidieren

Suboxidierer oxidieren die organischen Säuren nicht weiter



### Nitratatmung = Dissimilatorische Nitratreduktion

- dient dem Energiegewinn durch Elektronentransport-Phosphorylierung.
- Nitrat und nicht O<sub>2</sub> der e-Akzeptor
- wenn Nitrat zu einer gasförmigen N-Verbindung reduziert wird → **Denitrifikation**.
- fakultative Eigenschaft, i.d.R. nur bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck und Anwesenheit von Nitrat



## Die anaerobe Nahrungskette

Kohlenhydrate, Aminosäuren, Purine, Pyrimidine, usw.

Fermentierer

organische Säuren, Alkohole, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>

H<sup>+</sup> reduzierende Acetogene  
Sulfatreduzierer

Acetat, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>

Methanogene

CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>

## Methanogenese

außergewöhnliche Coenzyme beteiligt



Disproportionierung von Acetat (*Methanosarcina*, *Methanotrix*):



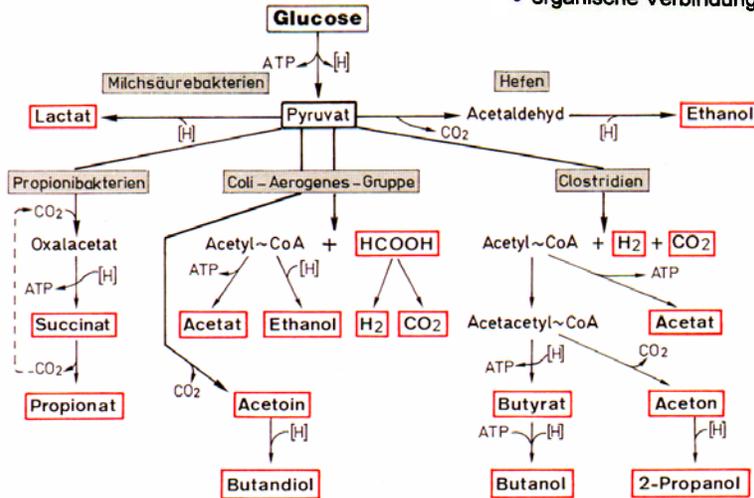
intern ausbalancierte Oxidations-Reduktions-Reaktion

## Gährung (Fermentation)

Im klassischen Sinn haben Gährungen folgende charakteristische Merkmale:

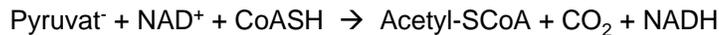
- keine externen e<sup>-</sup>-Acceptoren
- keine direkt mit Substratoxidation gekoppelte Elektronentransport-Phosphorylierung
- organische Verbindungen als Substrate

Pyruvat : zentrales Intermediat vieler Gährungen



## Spaltung von Pyruvat: verschiedene Möglichkeiten

**Pyruvat Dehydrogenase** (fast alle aerobe Organismen)



**Pyruvat Ferredoxin Oxidoreductase** (Archaea, anaerobe Gram+, anaerobe euk. Parasiten)



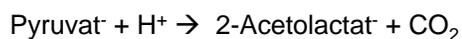
**Pyruvat Formiat Lyase** (Enterobacteriaceae, Lactobazillen, manche Clostridien)



**Pyruvat Decarboxylase** (Hefe, *Zymomonas*)

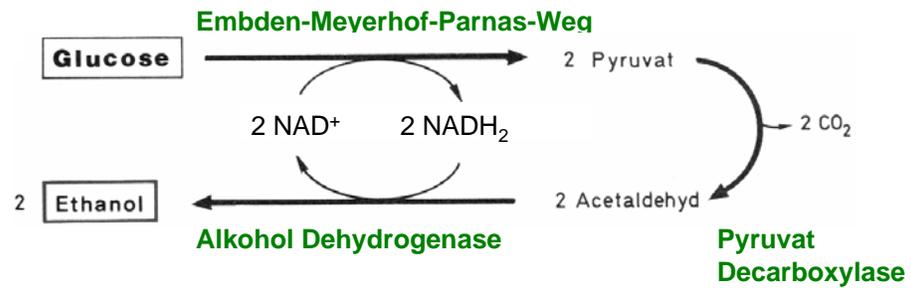


**Acetylactat-Synthase** (Enterobacteriaceae, *Bacillus*)

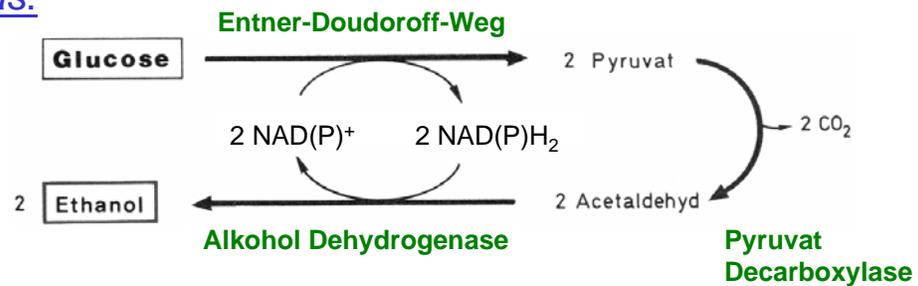


# Alkoholische Gärung

## Hefe:

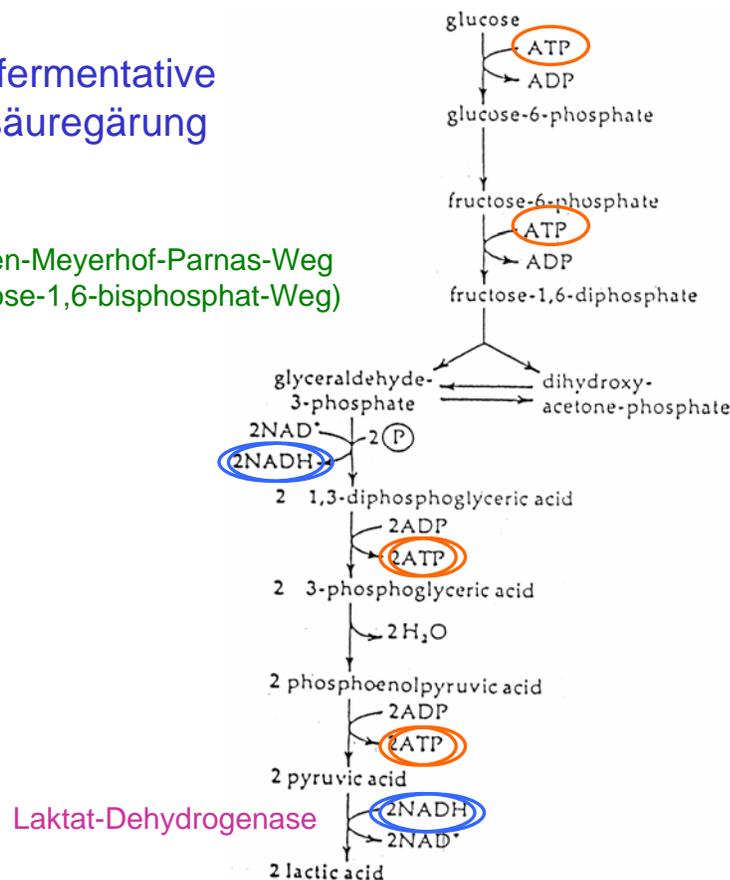


## Zymomonas:



## Homofermentative Milchsäuregärung

### Embden-Meyerhof-Parnas-Weg (Fruktose-1,6-bisphosphat-Weg)



## Clostridien

- Gram-positive Stäbchen
- niedriger GC-Gehalt der DNA
- strikt anaerob
- Sporenbildner
- bevorzugen neutralen oder alkalischen pH
- manche können  $N_2$  fixieren

Saccharolytische Clostridien → Gärprodukte: Essigsäure, Buttersäure, Ethanol, Butanol, Aceton, Isopropanol,  $CO_2$ ,  $H_2$

Peptolytische Clostridien

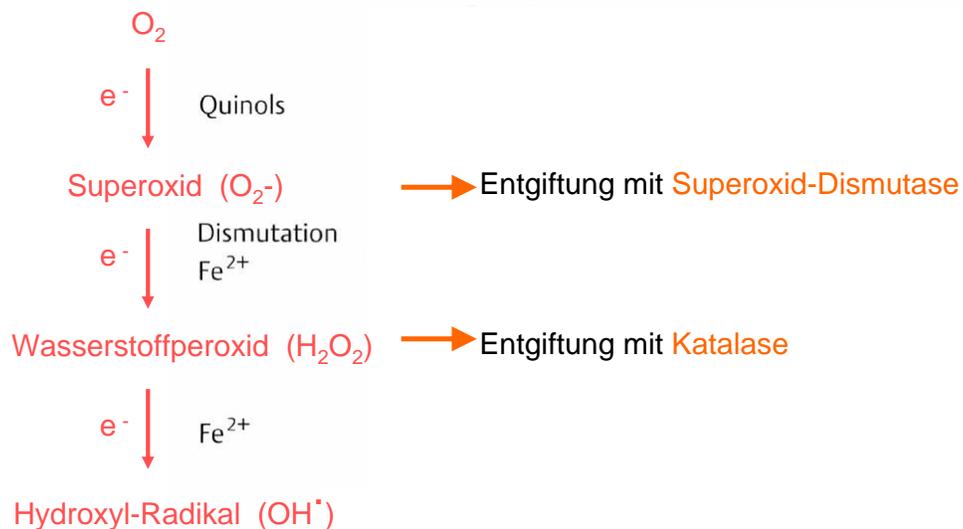
*C. histolyticum*, *C. septicum* → Wundinfektionen

*C. tetani* → Wundstarrkrampf

*C. botulinum* → Lebensmittelvergiftung, Botulismus

*C. sporogenes*, *C. butyricum*, *C. thermosaccharolyticum*, u.a.  
→ Lebensmittelverderb

## Entstehung und Entgiftung reaktiver Sauerstoffspezies



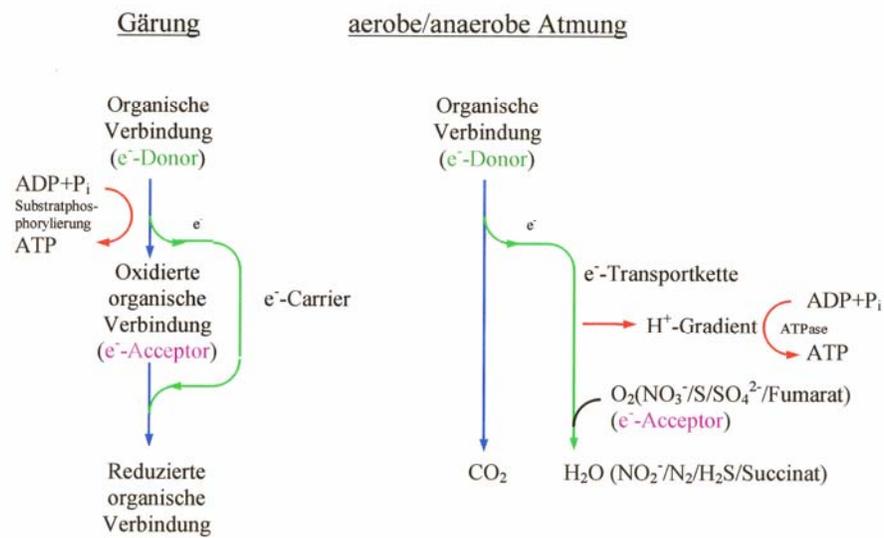
Superoxid und  $H_2O_2$  können FeS-Cluster und SH-Gruppen oxidieren und können Enzyme mit solchen Gruppen inaktivieren.

Hydroxyl-Radikale reagieren aggressiv mit praktisch allen Biomolekülen.

Strikt Anaerobe haben keine oder unzureichende Entgiftungsmechanismen

Strikt Anaerobe haben oft Enzyme für chemisch schwierige Reaktionen (mit Radikalen oder Metallzentren m. niedrigem Potential), die  $O_2$ -empfindlich sind.

## Vergleich chemoorganotropher Stoffwechselarten: Gärungsstoffwechsel – respiratorischer Stoffwechsel

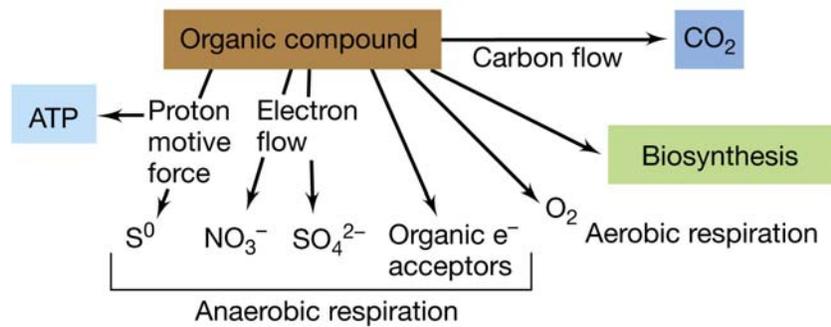


### Möglichkeiten des Energiegewinns unter aeroben und anaeroben Bedingungen

	Energiequelle	$e^-$ -Donor	aerob/anaerob	$e^-$ -Acceptor	ATP-Gewinn
<b>Gärung (Fermentation)</b>	Redoxreaktionen	organische Substanzen	anaerob	organ. Stoffe	Substrat-Phosphorylierung (direkte ATP-Synthese)
<b>Atmung (Respiration)</b>	Redoxreaktionen	organische o. anorg. Substanzen (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> , S, S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , Fe <sup>2+</sup> )	aerob	O <sub>2</sub>	$e^-$ -Transport-Phosphorylierung (indirekt über Aufbau eines Protonengradienten)
			anaerob	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , CO <sub>2</sub> , Fumarat	

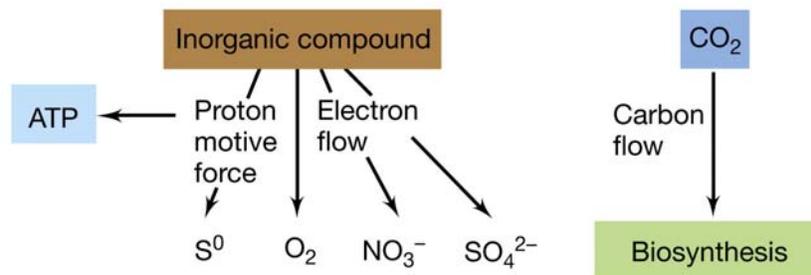
## Chemoorganotropher Stoffwechsel

heterotroph



## Chemolithotropher Stoffwechsel

autotroph



Chemolithotrophie ist beschränkt auf Prokaryonten (Bakterien und Archaeen)

In Chemolithoautotrophen dient der reduzierte Elektronendonator für 2 Zwecke :

- (1) Energiekonservierung (Aufbau eines Protonengradienten)
- (2) Bildung von Reduktionsäquivalenten (auf Kosten des Protonengradienten) für die CO<sub>2</sub>-Fixierung

Habitats von Chemolithotrophen :

- ausreichende Mengen red. anorganischer Verbindungen,
- geeignete Elektronenakzeptoren (oft O<sub>2</sub> , NO<sub>3</sub><sup>-</sup>),
- oft an extreme Standorte angepasst,
- wo wenig organische Substanz verfügbar

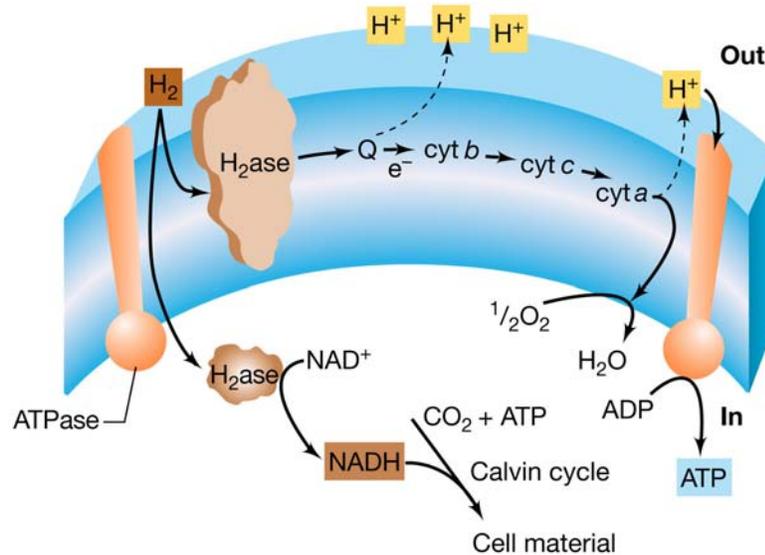
z.B. Grenzschichten aerob/anaerob

z.B. extrem saure Habitats

Chemolithotrophie spielen eine wichtige Rolle in den Stoffkreisläufen

z.B. N-Kreislauf, S-Kreislauf

„Knallgasbakterium“ *Wautersia eutropha* (*Ralstonia eutropha*)



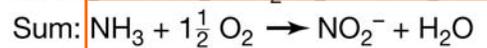
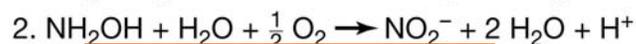
Die meisten „Knallgasbakterien“ sind **fakultativ chemolithoautotroph**, d.h. sie können auch organische Verbindungen als Energie- u./o. C-Quelle nutzen

**Mixotrophes Wachstum:**

H<sub>2</sub> u./o. CO<sub>2</sub> und ein organisches Substrat werden gleichzeitig genutzt

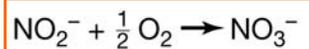
**Nitrifikation**

„**Nitroso-Bakterien**“ oxidieren Ammonium zu Nitrit  
z.B. **Nitrosomonas**



$$\Delta G^{0'} = -275 \text{ kJ/reaction}$$

„**Nitro-Bakterien**“ oxidieren Nitrit zu Nitrat  
z.B. **Nitrobacter**



$$\Delta G^{0'} = -74.1 \text{ kJ/reaction}$$

**Bedeutung der Nitrifikation**

- Rolle im N-Kreislauf
- Entfernung von Ammonium bei der Abwasserbehandlung
- Verwitterung poröser Gesteine  
→ Ausblühungen von Salpeter



# Gruppen phototropher Bakterien

## Oxygene Photosynthese

1. Cyanobakterien (z.B. *Synechococcus*, *Oscillatoria*, *Nostoc*)
2. Prochlorophyten (z.B. *Prochloron*, *Prochlorothrix*)

## Anoxygene Photosynthese

- ▶ Kommt nur bei phototrophen Bakterien vor
- ▶ Im Gegensatz zur oxygenen Photosynthese ist nur ein Photosystem beteiligt
- ▶ Keine Oxidation von H<sub>2</sub>O

### 1. Purpurbakterien

- A. Nichtschwefel-Purpurbakterien (z.B. *Rhodobacter*, *Rhodospirillum*)
- B. Schwefel-Purpurbakterien (z.B. *Chromatium*, *Thiocapsa*)

### 2. Grüne Bakterien

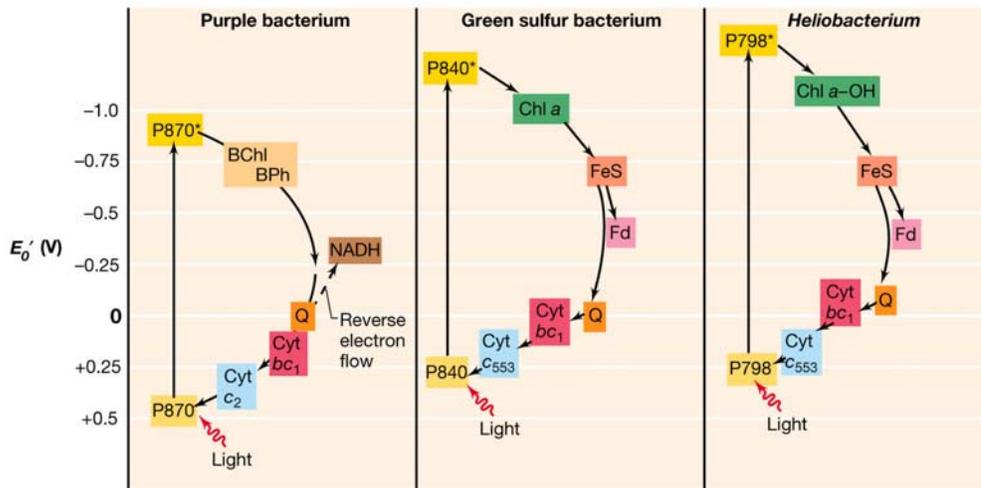
- A. Grüne Schwefelbakterien (z.B. *Chlorobium*, *Chloronema*)
- B. Grüne Nichtschwefelbakterien (z.B. *Chloroflexus*, *Heliobacterium*)

### 3. Heliobakterien (z.B. *Heliobacterium*, *Heliobacillus*)

In phototrophen Bakterien gibt es mehrere Arten von Bacteriochlorophyll, die Licht mit unterschiedlicher Wellenlänge absorbieren

- ▶ Mehr Energie des elektromagnetischen Spektrums kann genutzt werden
- ▶ Zur Energiegewinnung kann nur absorbierte Lichtenergie verwendet werden. Daher können verschiedene phototrophe Arten in einem Habitat koexistieren, indem jede andere Wellenlängen nutzt.
- ▶ Pigmentvielfalt erlaubt die Besetzung unterschiedlicher ökologischer Nischen

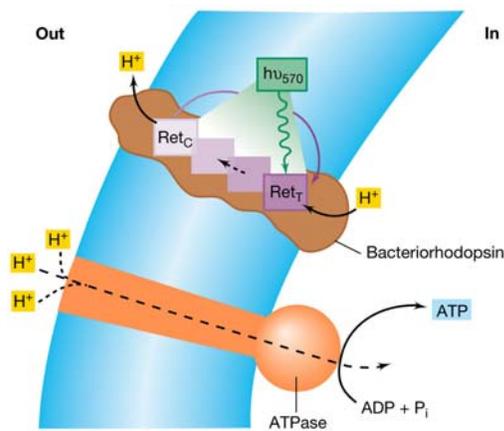
## Vergleich des Elektronenflusses bei Purpurbakterien, Grünen Schwefelbakterien und Heliobakterien



- ▶ ATP-Bildung durch **zyklische Photo-phosphorylierung**
- ▶ Grüne Bakterien und Heliobakterien können im Zuge der Photosynthese neben ATP auch NADH bilden, da das erste stabile Akzeptormolekül (FeS-Protein) im Vergleich zu Purpurbakterien (Chinon) ein deutlich elektronegativeres  $E_0'$  besitzt
- ▶ **Heliobakterien + Grüne Bakterien** → ATP + Reduktionskraft direkte Produkte der Lichtreaktion
- ▶ **Purpurbakterien** → nur ATP direktes Produkt der Lichtreaktion

## Lichtvermittelte ATP-Synthese ohne Chlorophyll-Pigmente

- ▶ Einige Arten extrem halophiler Archaea (z.B. *Halobacterium*) können lichtvermittelte ATP-Synthese ohne Chlorophyll-Pigmente betreiben



- ▶ Bildung einer protonenmotorischen Kraft durch **Bacteriorhodopsin**
  - ▶ Bacteriorhodopsin ähnelt dem Sehpigment des Auges dem Rhodopsin
  - ▶ Mit Bacteriorhodopsin ist ein Retinal-Molekül konjugiert, welches Licht (bei ca. 570 nm) absorbieren kann