

Stoffwechselftypen

Unterscheidung nach

Energiequelle

phototroph
(Lichtenergie)

chemotroph
(Oxidations-Reduktions-Reaktionen)

H- (e⁻)-Donator

photo-lithotroph
(z. B. H₂O, H₂, NH₃, H₂S, S, Fe)

photo-organotroph
(organ. Substanzen)

chemo-lithotroph
(z. B. NH₄⁺, NO₂⁻)

chemo-organotroph
(organ. Substanzen)

z. B. grüne Pflanzen,
Cyanobakterien,
Schwefelpurpurbakterien

z. B. Purpurbakterien

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

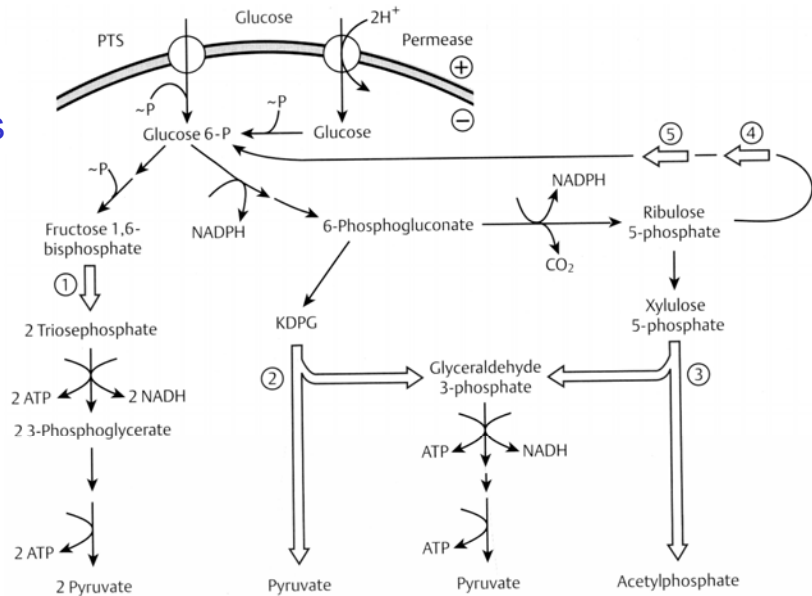
- Gärungen
- Anaerobe Atmung
- Aerobe Atmung
- Unvollst. Oxidation

C-Quelle

autotroph
(CO₂)

heterotroph
(organ. Substanzen)

Wege des Glukoseabbaus



Embden-Meyerhof

Entner-Doudoroff

Phosphoketolase

**Oxidativer Pentose-
phosphat-Weg**

2 Pyruvate
2 ATP
2 NADH

① ↓
Fructose-1,6-
phosphate aldolase

2 Pyruvate
1 ATP
1 NADH
1 NADPH

② ↓
KDPG aldolase

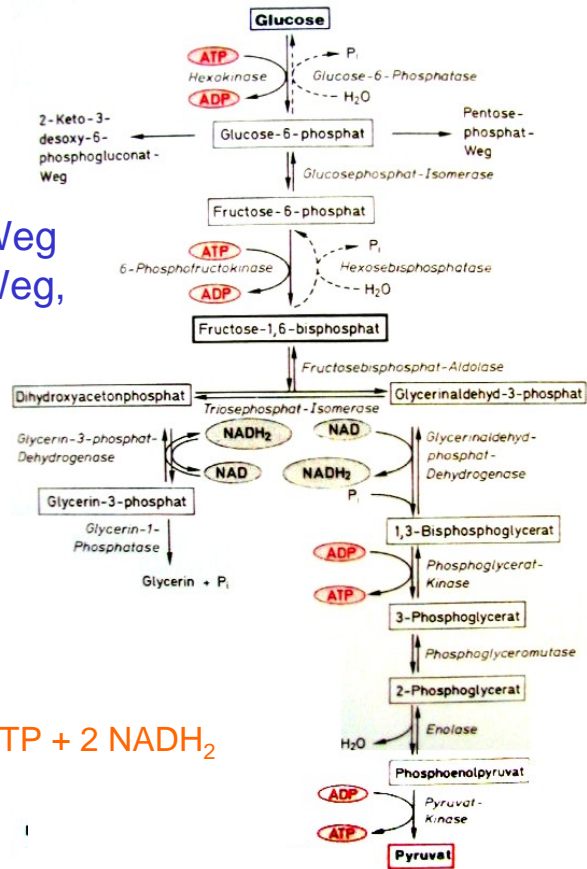
Acetylphosphate,
Pyruvate, CO₂
1 ATP
2 NADPH
1 NADH

③ ↓
Phosphoketolase

3 CO₂, Pyruvate
1 ATP
6 NADPH
1 NADH

④ ↓ ⑤ ↓
Transaldolase,
Transketolase

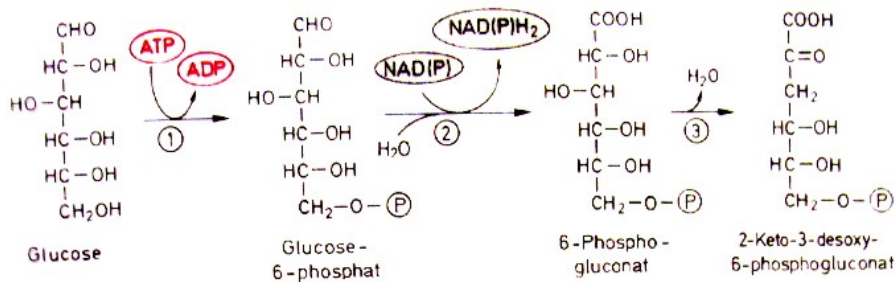
Embden-Meyerhof-Parnas-Weg (Fruktose-1,6-bisphosphat-Weg, FBP-Weg)



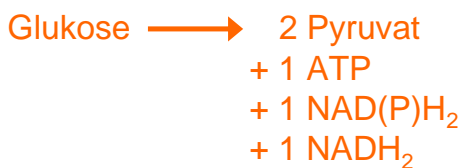
Bilanz:



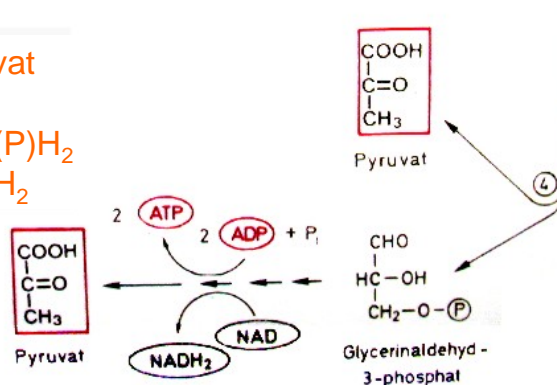
Entner-Doudoroff-Weg (2-Keto-3-desoxy-phosphogluconat-Weg, KDPG-Weg)



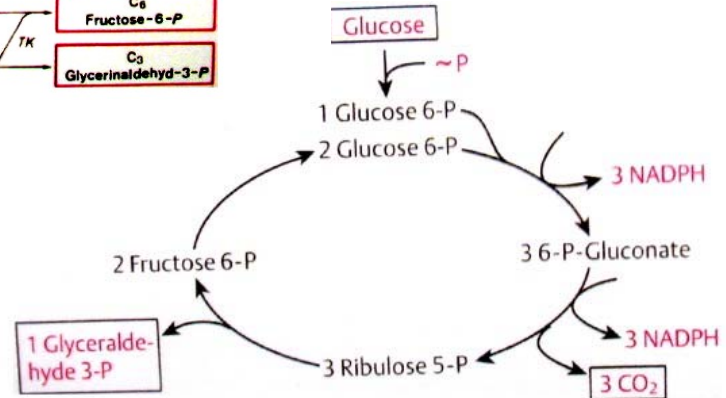
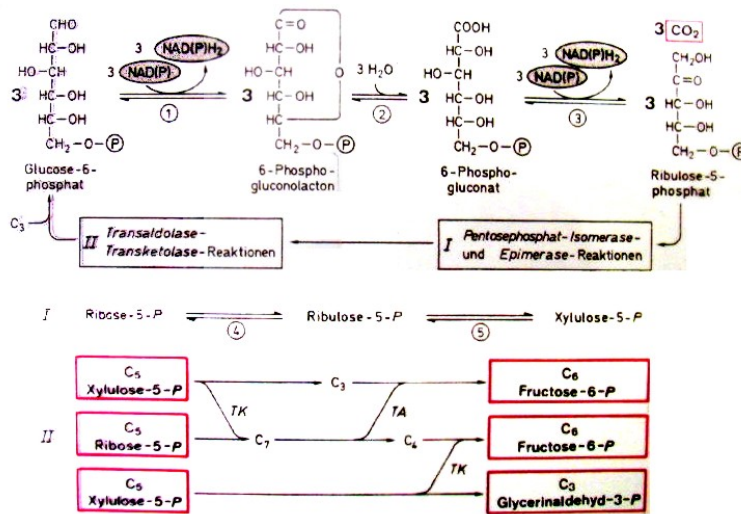
Bilanz:



z.B.
Pseudomonas
Wautersia (Rlstonia)
Zymomonas

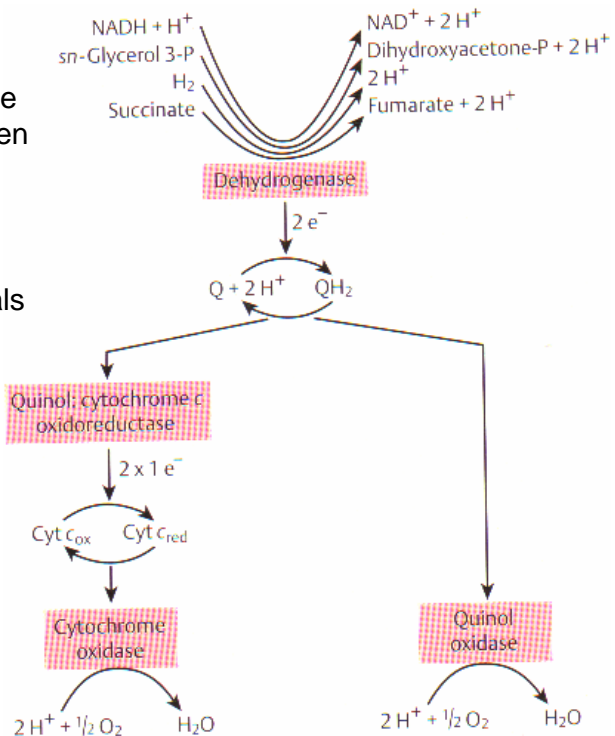


Oxidativer Pentosephosphat-Weg



Variationen der Atmungskette in Bakterien

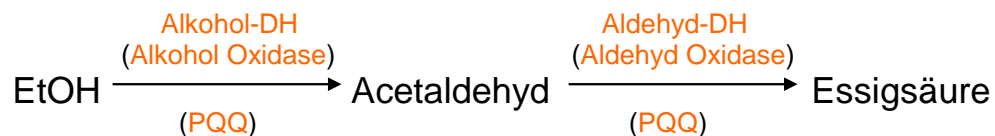
- Elektronen können über verschiedene Dehydrogenasen in die Atmungsketten eingeschleust werden
- es gibt Atmungsketten mit und ohne Chinol:Cytochrom c Oxidoreductase
- viele Bakterien verfügen über mehr als eine terminale Reductase (Oxidase)



Unvollständige Oxidation

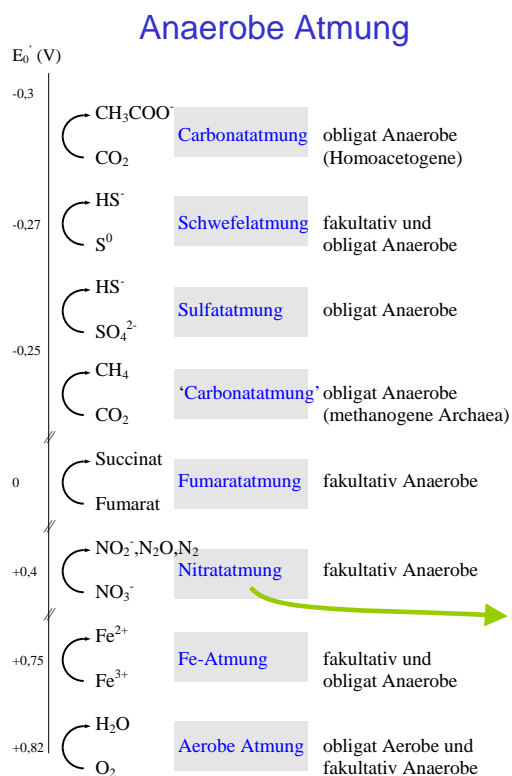
- Substrate werden unvollständig oxidiert
- Unvollständig oxidierte Substanzen wie organische Säuren häufen sich im Medium an (z.B. Acetat, Gluconat, Fumarat, Citrat)

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



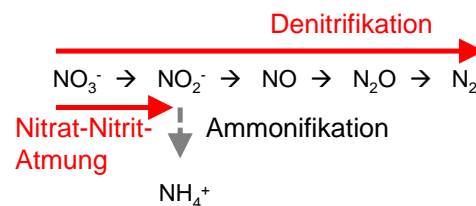
Peroxidierer können die organischen Säuren langsam weiter oxidieren

Suboxidierer oxidieren die organischen Säuren nicht weiter



Nitratatmung = Dissimilatorische Nitratreduktion

- dient dem Energiegewinn durch Elektronentransport-Phosphorylierung.
- Nitrat und nicht O₂ 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, H₂, CO₂



H⁺ reduzierende Acetogene
Sulfatreduzierer

Acetat, H₂, CO₂

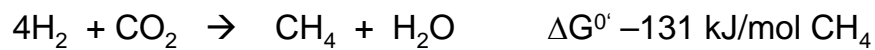


Methanogene

CH₄, CO₂

Methanogenese

außergewöhnliche Coenzyme beteiligt



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



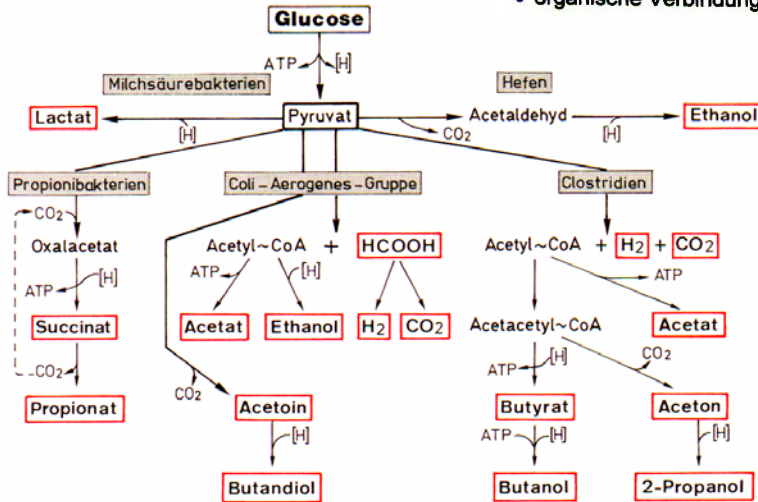
intern ausbalancierte Oxidations-Reduktions-Reaktion

Gärung (Fermentation)

Im klassischen Sinn haben Gärungen folgende charakteristische Merkmale:

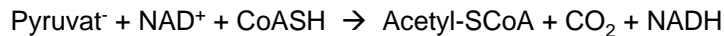
- keine externen e^- -Acceptoren
- keine direkt mit Substratoxidation gekoppelte Elektronentransport-Phosphorylierung
- organische Verbindungen als Substrate

Pyruvat : zentrales Intermediat vieler Gärungen



Spaltung von Pyruvat: verschiedene Möglichkeiten

Pyruvat Dehydrogenase (fast alle aerobe Organismen)



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



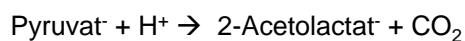
Pyruvat Formiat Lyase (Enterobacteriaceae, Lactobazillen, manche Clostridien)



Pyruvat Decarboxylase (Hefe, *Zymomonas*)

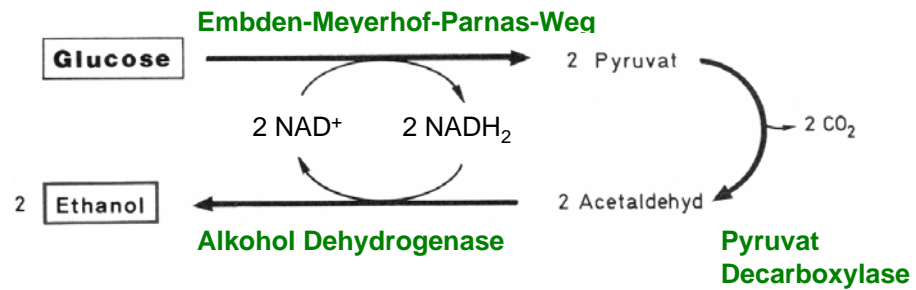


Acetylactat-Synthase (Enterobacteriaceae, *Bacillus*)

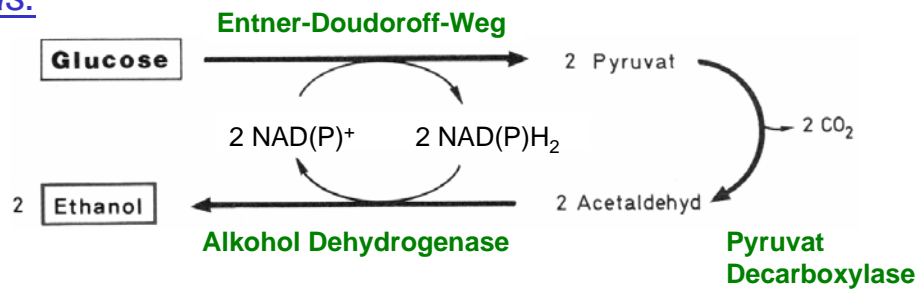


Alkoholische Gärung

Hefe:

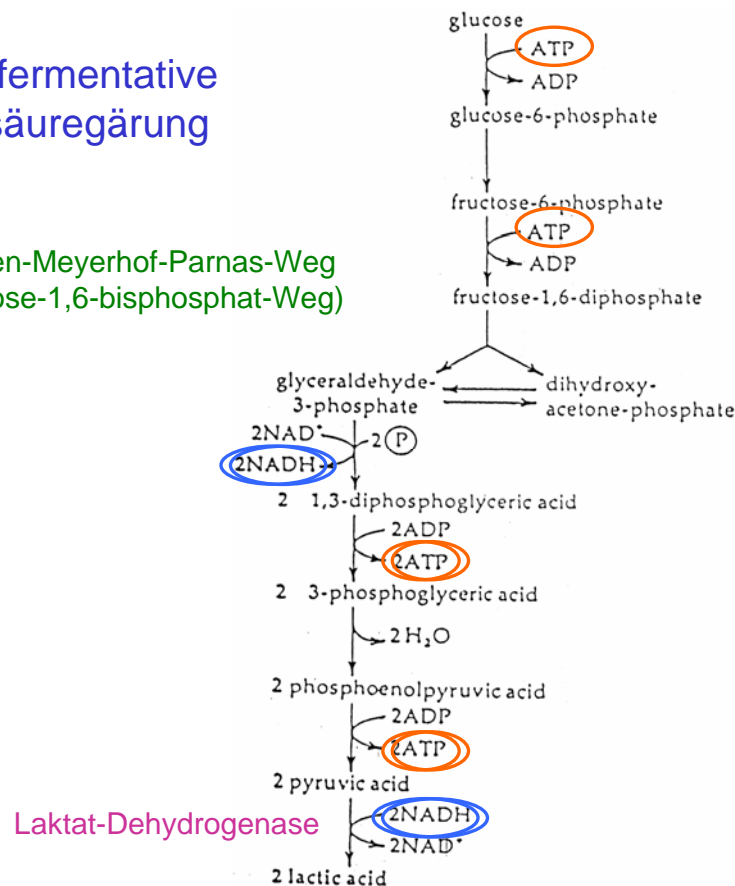


Zymomonas:



Homofermentative Milchsäuregärung

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



Clostridien

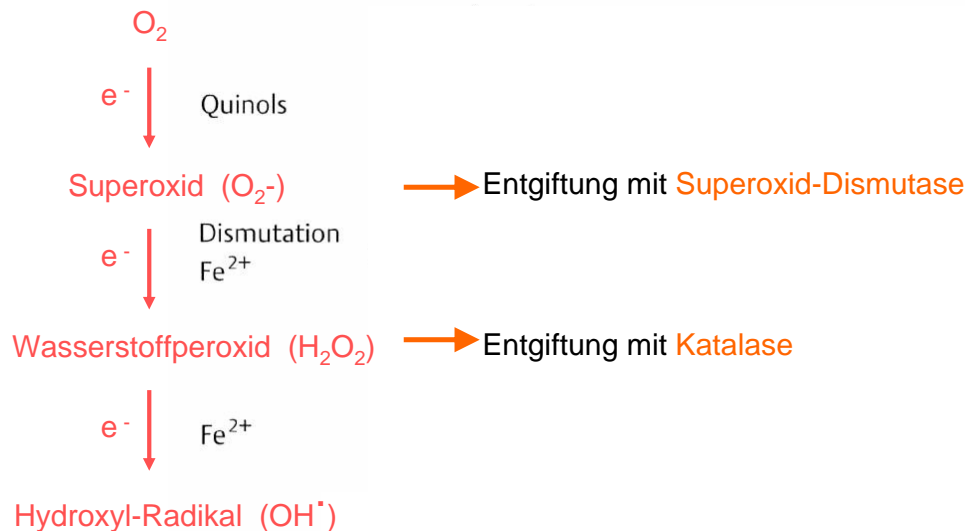
- Gram-positive Stäbchen
- niedriger GC-Gehalt der DNA
- strikt anaerob
- Sporenbildner
- bevorzugen neutralen oder alkalischen pH
- manche können N_2 fixieren

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



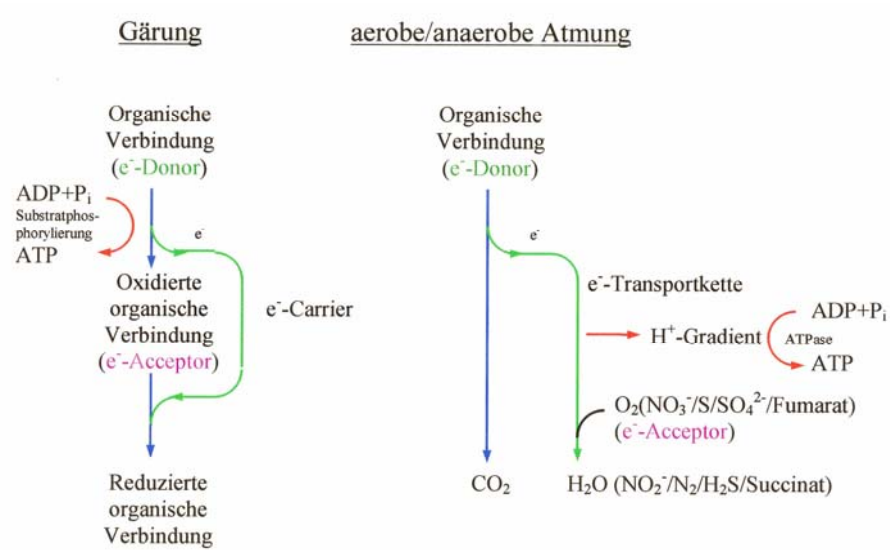
Superoxid und H_2O_2 können FeS-Cluster und SH-Gruppen oxidieren und können Enzyme mit solchen Gruppen inaktivieren.

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

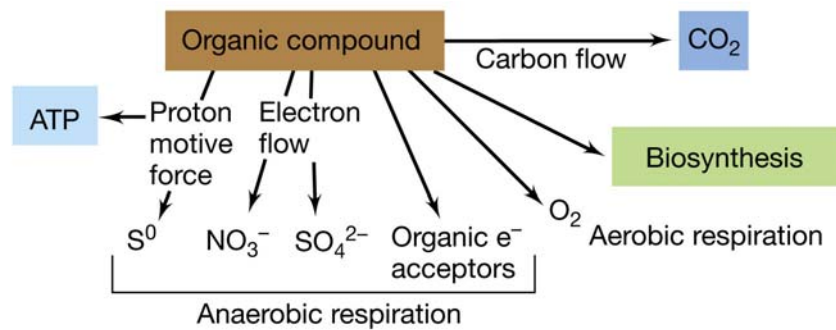


Möglichkeiten des Energiegewinns unter aeroben und anaeroben Bedingungen

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

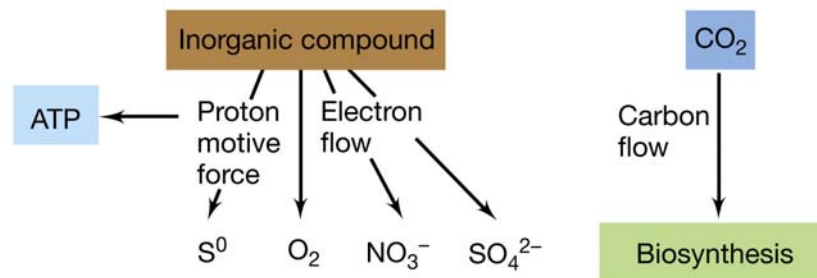
Chemoorganotropher Stoffwechsel

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 CO₂-Fixierung

Habitats von Chemolithotrophen :

- ausreichende Mengen red. anorganischer Verbindungen,
- geeignete Elektronenakzeptoren (oft O₂ , NO₃⁻),
- oft an extreme Standorte angepasst,
- wo wenig organische Substanz verfügbar

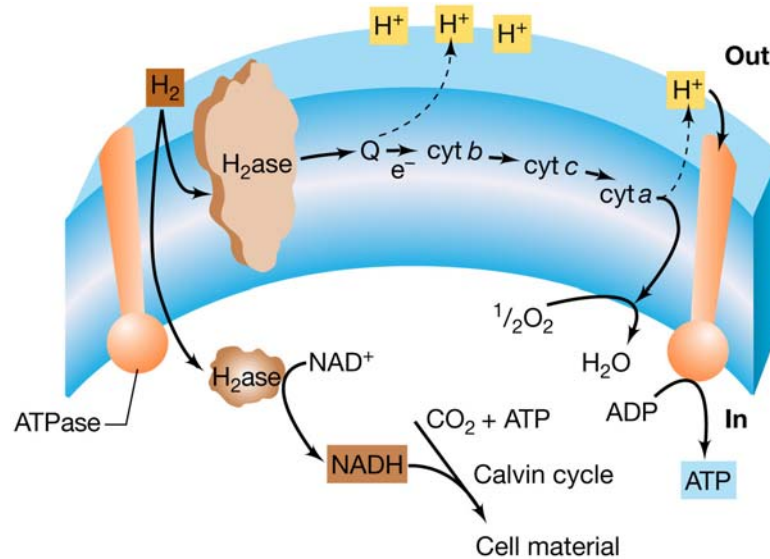
z.B. Grenzschichten aerob/anaerob

z.B. extrem saure Habitats

Chemolithotrophie spielen eine wichtige Rolle in den Stoffkreisläufen

z.B. N-Kreislauf, S-Kreislauf

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



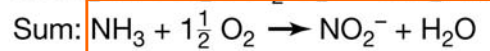
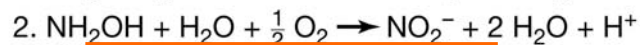
Die meisten „Knallgasbakterien“ sind **fakultativ chemolithoautotroph**, d.h. sie können auch organische Verbindungen als Energie- u./o. C-Quelle nutzen

Mixotrophes Wachstum:

H_2 u./o. CO_2 und ein organisches Substrat werden gleichzeitig genutzt

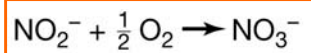
Nitrifikation

„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

Chemolithoautotrophe müssen oft große Mengen eines Elektronendonators verbrauchen

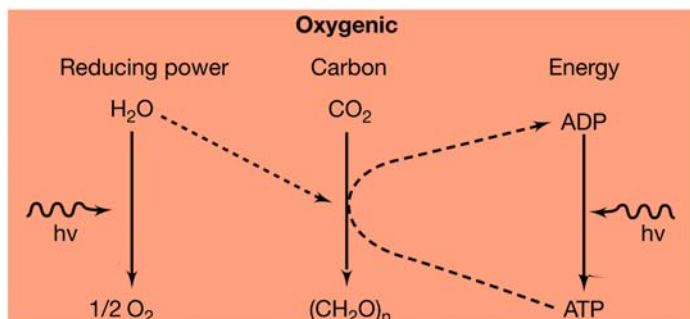
Für Synthese von 1 g Zellmasse (Trockenmasse) werden umgesetzt durch

<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	156 g Fe^{2+}
<i>Thiobacillus neapolitanus</i>	30 g $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
<i>Nitrosomonas</i>	30 g NH_3
<i>Ralstonia eutropha</i>	0,5 g H_2

zum Vergleich:

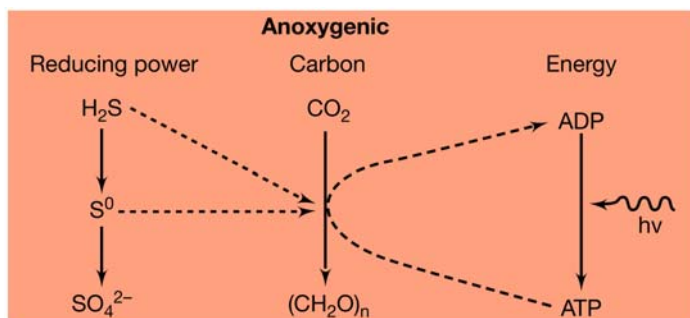
E. coli 2 g Glucose

Gewinnung von Energie und Reduktionskraft durch oxygene und anoxygene Photosynthese



Oxygene:
Pflanzen
Cyanobakterien

► Gewinnung von Reduktionskraft immer durch lichtgetriebene Oxidation von H_2O zu O_2



Anoxygene:
Purpurbakterien,
Grüne Bakterien
Heliobakterien

► Gewinnung von Reduktionskraft aus Substanzen wie H_2S ist nicht immer lichtgetrieben

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 H₂O

1. Purpurbakterien

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

2. Grüne Bakterien

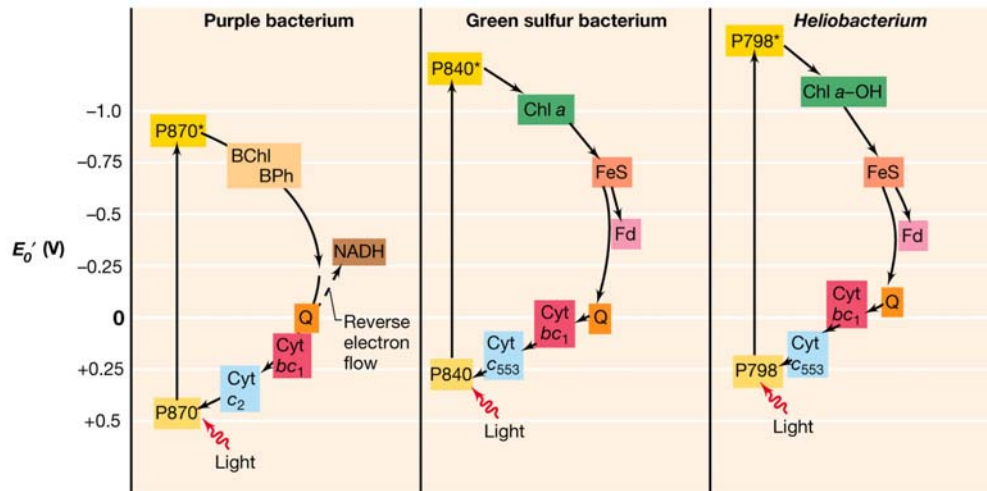
- A. Grüne Schwefelbakterien (z.B. *Chlorobium*, *Chloronema*)
- B. Grüne Nichtschwefelbakterien (z.B. *Chloroflexus*, *Heliobacterium*)

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

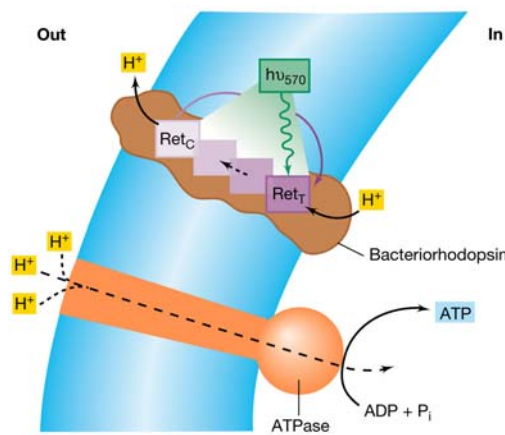
Vergleich des Elektronenflusses bei Purpurbakterien, Grünen Schwefelbakterien und Heliobakterien



- ▶ 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